

Vance Dickason

**ENCEINTES ACOUSTIQUES
&
HAUT-PARLEURS**

CONCEPTION, CALCUL & MESURE AVEC ORDINATEUR

PUBLITRONIC / ELEKTOR

Droit d'auteur

La protection du droit d'auteur s'étend non seulement au contenu mais également aux illustrations, y compris aux circuits imprimés et aux projets y relatifs. En conformité avec l'article 30 de la Loi sur les brevets, les circuits mentionnés ne peuvent être exécutés qu'à des fins particulières ou scientifiques et non pas dans ou pour une entreprise; ces exécutions et/ou applications se font en dehors de toute responsabilité de l'éditeur.

En application de la loi du 11 mars 1957, toute reproduction ou copie de ce livre, même partielle et sur quelque support que ce soit, sans l'accord écrit de l'éditeur, est interdite.

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droits.

Toute reproduction ou copie, même partielle, de ce livre, sans l'accord écrit de l'éditeur, est interdite.

©1996 Elektor
première édition
première impression
juillet 1996

Ceci est la traduction de la 5^e édition de l'ouvrage *THE LOUDSPEAKER DESIGN COOKBOOK* publié aux Etats-Unis par *Audio Amateur Press*

Traduction : Henri JOSEPHON & Marguerite SABLE – Joseph KREUTZ – Larry KOSEK

Mise en page : Mariline THIÉBAUT-BRODIER

Couverture : ETCETERA (édition courante) – Ton GULIKERS (édition spéciale)

Photocomposition : Guillaume le Maréchal

Réalisation et coordination de l'édition française : Denis MEYER

Imprimé aux Pays-Bas par NND

Table des matières

1 Fonctionnement du haut-parleur

1.1	Haut-parleur électrodynamique	1
1.2	Moteur	1
1.2.1	Géométries d'entrefer et facteur de force BL	3
1.2.2	Bague de court-circuit et boucle de Faraday	5
1.3	Membrane	6
1.3.1	Modes de résonance des membranes	7
1.3.2	Directivité de la membrane	8
1.3.3	Forme de la membrane	8
1.3.4	Cache-noyau	9
1.3.5	Formes des dômes	10
1.4	Suspensions	10
1.4.1	Suspension périphérique	10
1.4.2	Suspension de centrage ou <i>Spider</i>	10
1.4.3	Systèmes de suspension linéaire et progressive	11
1.5	Impédance du haut-parleur	11
1.6	Puissance, rendement et volume de la pièce d'écoute	12

2 Enceintes closes

2.1	Définition	15
2.1.1	Terminologie	15
2.2	Historique	16
2.3	Paramètre Q du haut-parleur et réponse de l'enceinte acoustique	16
2.3.1	Méthodes d'analyse du facteur Q de l'enceinte acoustique	18
2.4	Choix du haut-parleur de graves et construction de l'enceinte	21
2.5	Détermination du volume de l'enceinte et des paramètres associés	22
2.5.1	Variations des paramètres Q_{ts} , f_s et V_{as}	23
2.6	Paramètres complémentaires	28
2.6.1	Efficacité caractéristique (η_0)	28
2.6.2	Puissance acoustique limitée par les excursions maximales de la bobine mobile (P_{ar})	29
2.6.3	Puissance électrique maximale d'entrée (P_{er})	30
2.7	Exemples de calculs	31
2.7.1	Fréquence de coupure de l'enceinte à -3 dB	32
2.7.2	Variation de la courbe de réponse avec la puissance	32
2.8	Amortissement du volume interne de l'enceinte	33
2.8.1	Détermination de l'amortissement du volume interne de l'enceinte	37
2.8.2	Comparaison empirique de matériaux amortissants	38
2.9	Enceintes closes à plusieurs haut-parleurs de graves	41
2.9.1	Configuration standard	41
2.9.2	Configuration en <i>push-pull</i>	62
2.9.3	Configuration à haut-parleurs de graves jumelés	62

2.10	Enceintes closes à compensation électronique	63
2.11	Les techniques d'augmentation de masse de l'équipage mobile	64
2.11.1	Modification par augmentation de la masse mobile	64
2.12	Haut-parleur à équipage mobile alourdi et filtre passe-haut série	65
2.13	Les enceintes closes à charges symétriques	66
2.13.1	Définition	66
2.13.2	Paramètres complémentaires	67
2.14	Historique	67
2.15	Choix du haut-parleur de graves	67
2.16	Détermination du volume de l'enceinte	67
2.17	Simulation par ordinateur et exemples de calculs	68
2.18	Variations autour de la charge symétrique	70
2.19	Enceinte close apériodique	70

3 Enceintes acoustiques bass-reflex

3.1	Définition	79
3.2	Historique	79
3.3	Coefficient de surtension Q et réponse de l'enceinte	80
3.4	Choix du haut-parleur de graves	80
3.5	Alignement des paramètres haut-parleur/enceinte <i>bass-reflex</i>	81
3.6	Calcul du volume de l'enceinte et des principaux paramètres	87
3.6.1	Pertes provenant du coffret	87
3.6.2	Utilisation des tables de calcul 3.1 à 3.10	93
3.7	Calcul des dimensions de l'évent	93
3.7.1	Résonance d'évent et couplage avec la membrane	101
3.7.2	Accord d'une enceinte <i>bass-reflex</i>	103
3.8	Paramètres complémentaires	104
3.8.1	Efficacité caractéristique (η_0)	104
3.8.2	Puissance acoustique limitée par les excursions maximales de la bobine mobile (P_{ar})	104
3.8.3	Puissance électrique d'entrée maximale (P_{er})	104
3.9	Exemples de calcul	105
3.10	Mesure du coefficient de perte totale Q_L	106
3.11	Modification de la courbe de réponse due à un mauvais alignement	107
3.11.1	Variations de la réponse dynamique en fréquence pour divers alignements	107
3.12	Filtre pour infra-sons	110
3.13	Amortissement de l'enceinte	111
3.14	Configuration à deux haut-parleurs de graves	111
3.15	Événements résistifs et événements multiples	111
3.16	Enceintes <i>bass-reflex</i> avec compensation électronique	113
3.17	Enceintes <i>bass-reflex</i> à charges symétriques	115

4	Enceintes acoustiques à radiateur passif	119
4.1	Définition	119
4.2	Historique	119
4.3	Coefficient Q du haut-parleur et réponse de l'enceinte	119
4.3.1	Choix du haut-parleur de graves	120
4.4	Les différents alignements	120
4.4.1	Calcul du volume de l'enceinte et des principaux paramètres	122
4.5	Détermination du rapport δ pour les radiateurs passifs	124
4.5.1	Calcul du volume de l'enceinte et des principaux paramètres à partir du tableau 4.1	126
4.5.2	Emplacement du radiateur passif et couplage mutuel	126
4.5.3	Accorder une enceinte à radiateur passif	126
4.5.4	Paramètres complémentaires	127
4.5.5	Exemples de calculs	127
4.5.6	Détermination du coefficient Q_L	128
4.5.7	Variations de la courbe de réponse	128
4.5.8	Filtrage infra-sonore	128
4.5.9	Amortissement	128
4.6	Enceintes à radiateur passif et à charge symétrique	128
4.7	Enceintes à radiateurs passifs couplés	130
4.7.1	Définition	130
4.7.2	Historique	130
4.7.3	Configuration	131
4.7.4	Sélection du haut-parleur de graves	131
4.7.5	Alignements	131
4.7.6	Calcul du volume de l'enceinte	131
4.7.7	Emploi du tableau numérique 4.4	132
4.7.8	Couplage entre haut-parleur de graves et radiateurs passifs couplés (APR)	133
4.7.9	Procédure pour accorder l'enceinte	133
4.8	Paramètres complémentaires	133
4.8.1	Cas du volume V_{pr} dans les enceintes APR	133
4.8.2	Exemples de calculs	134
4.8.3	Altération de la réponse due à de mauvais alignements	134
4.8.4	Filtrage infra-sonore	134
4.8.5	Amortissement	134
4.8.6	Configuration à deux haut-parleurs de graves	134
5	Enceintes acoustiques à ligne de transmission	
5.1	Définition	137
5.2	Historique	138
5.2.1	Coefficient de surtension du haut-parleur et réponse de l'enceinte	138
5.3	Longueur et amortissement de la ligne de transmission	139
5.4	Accord de la ligne de transmission	142
5.5	Configuration de l'enceinte à ligne de transmission	142
5.6	Sélection du haut-parleur de graves	143
5.7	Publications sur la construction d'enceintes à ligne de transmission	143

6 Coffret : construction et amortissement des vibrations des parois

6.1	Forme du coffret et courbes de réponse	145
6.2	Géométrie de coffret et ondes stationnaires	147
6.3	Amortissement des parois de l'enceinte acoustique	149

7 Haut-parleurs de registre médium et aigus : mise en œuvre et boîtiers

7.1	Introduction	153
7.1.1	Fréquence de coupure et bande passante	153
7.1.2	Enceintes acoustiques à deux ou à trois voies	154
7.2	Premières réflexions et fréquences de coupure	154
7.3	Directivité horizontale et distances entre les haut-parleurs	156
7.4	Enceintes pour haut-parleur médium	157
7.4.1	Interaction de la face avant avec les haut-parleurs médium et aigus	158

8 Filtres passifs et filtres actifs

8.1	Filtres passifs	161
8.1.1	Historique	161
8.2	Bases du filtrage	162
8.2.1	Combinaison des réponses des filtres à deux voies : somme passe-haut et passe-bas	165
8.2.2	Filtres passe-tout et filtres linéaires en phase	167
8.2.3	Somme acoustique : centre d'émission acoustique des haut-parleurs et plan zéro des retards	168
8.2.4	Réponse en puissance du filtre	173
8.3	Caractéristiques des filtres à deux voies	174
8.3.1	Formules de calcul pour filtres à deux voies	198
8.4	Filtres à trois voies	200
8.4.1	Caractéristiques des filtres à trois voies	201
8.4.2	Formules de calcul des filtres passe-tout à trois voies (APC)	201
8.4.3	Exemples d'application du calcul des filtres	205
8.4.4	Filtres : exemples d'applications	208
8.4.5	Courbes de réponse et conception de filtres	212
8.5	Compensation de la variation de l'impédance du haut-parleur	215
8.5.1	Circuits anti-résonants séries	215
8.5.2	Egalisation de la courbe d'impédance	217
8.6	Circuits d'atténuation pour haut-parleur	217
8.7	Circuits de correction de courbe de réponse	218
8.8	Selfs pour filtre	222
8.8.1	Condensateurs pour filtres d'enceintes acoustiques	224
8.8.2	Filtres passifs perfectionnés	225
8.9	Filtres actifs	225

9 Enceintes acoustiques et mesures

9.1	Terminologie	229
9.2	Rodage des haut-parleurs	230

9.3	Mesure de la fréquence de résonance du haut-parleur (f_s)	230
9.3.1	Mesure de l'impédance	231
9.3.2	Mesure de l'impédance complexe	234
9.4	Calcul de la masse de l'air mû par le haut-parleur	237
9.4.1	Mesure de l'équipage mobile d'un haut-parleur	237
9.4.2	Calcul de la compliance d'un haut-parleur	239
9.4.3	Mesure du facteur de force BL du haut-parleur	239
9.5	Calcul de l'inductance de la bobine mobile L_e	239
9.6	Calcul de la résistance de source R_G de l'amplificateur	241
9.6.1	Calcul de la résistance série totale, R_X	241
9.7	Calcul du volume d'air V_{as} équivalent à la compliance du haut-parleur	242
9.8	Mesure du coefficient Q , Q_{ts} , Q_{es} et Q_{ms} du haut-parleur	243
9.8.1	Techniques de mesure de la courbe de réponse en fréquence	246
9.8.2	Appareils pour la mesure des courbes de réponse en fréquence	249
9.8.3	Mesure de la phase	252
9.8.4	Microphones de mesure	252
9.8.5	Mesure des vibrations mécaniques des coffrets des enceintes acoustiques	254
9.8.6	Mesure de la température de la bobine mobile en fonction du temps	254
9.9	Quelques facteurs de conversion	256
 10 Enceintes acoustiques pour salle de projection vidéo domestique		
10.1	Sonorisation de salle de projection vidéo domestique contre stéréophonie binaurale	259
10.2	Aperçu des enceintes acoustiques de la salle de projection vidéo domestique	260
10.3	Enceintes frontales latérales	261
10.4	Blindage magnétique	262
10.5	L'enceinte centrale	264
10.6	Utiliser la directivité verticale	266
10.7	Enceintes arrière pour le son ambiophonique	268
10.8	Enceintes subsoniques	272
 11 Enceintes acoustiques pour l'auto		
11.1	Enceintes pour voitures et matériel domestique	275
11.2	Champ acoustique libre et champ clos	275
11.3	Effets du champ clos sur les performances des haut-parleurs de grave	276
11.4	Simulation par ordinateur du fonctionnement en champ clos	278
11.5	Image stéréophonique dans l'auto	285
11.6	Chasse aux bruits parasites	287
 12 Logiciels pour la conception d'enceintes acoustiques		289
13 Appendice		295
Index		319
Glossaire		323

Préface*

Quand ce livre a été publié pour la première fois, en 1977, il n'y en avait pas beaucoup d'autres pour montrer comment tirer parti des travaux de Thiele et Small dans la construction d'enceintes acoustiques. Les fabricants de haut-parleurs capables de suivre l'évolution n'étaient pas légion et les informations qu'ils vous fournissaient n'avaient rien d'encyclopédique. Les sources étaient disséminées, le débit incertain et chaque goutte d'information valait de l'or. Au propre comme au figuré. Les choses ont changé. Ce livre a évolué au fil des éditions, mais il décrit toujours la science de la conception des enceintes acoustiques. L'application de cette science relève de l'art. Nous sommes encore à des années-lumière de la vraie fidélité à la réalité, mais la quête se poursuit et les progrès sont encourageants. Le temps passe vite quand on s'amuse, et depuis que l'ordinateur a définitivement chassé tout ce qui dans notre discipline pouvait encore relever de la magie noire, le temps n'existe pour ainsi dire même plus.

* Ceci est un condensé des trois préfaces originales.

Au lecteur de l'édition française

La haute-fidélité a son jargon, qui parfois cache assez mal la vanité de ceux qui l'emploient. Ainsi le mot *boomer* désigne les haut-parleurs pour le registre grave en général, sans la moindre nuance qui justifierait éventuellement l'usage en français de ce mot apparemment d'origine anglaise ou américaine, mais que personne là-bas ne comprend, car le mot juste en anglais est *woofer*. Le haut-parleur pour le registre aigu s'appelle *tweeter* en anglais, que l'm adopterait bien parce qu'en le prononçant, on produit un son aigu qui imite la chose évoquée, mais il faudrait alors logiquement adopter aussi le moins élégant *squawker* qui désigne en anglais le haut-parleur du registre médium. Or la sonorité de ce mot-là est apparemment si laide que même la plupart des anglophones répugnent à le prononcer et préfèrent parler de *mid-range speaker* ou *mid-range driver*. C'est pourquoi nous avons adopté les vocables « haut-parleurs de grave(s), de médium(s) et d'aigu(s) », avec le pluriel quand il est question de sons (graves, médiums ou aigus) et le singulier quand il s'agit de registre (grave, médium ou aigu). Précisons à ce sujet qu'il est généralement admis que le registre médium s'étend de 300 à 3000 Hz.

Le mot *self* est un autre vrai faux-ami du jargon français du monde des haut-parleurs et des enceintes acoustiques, où il désigne la bobine, ce composant passif mis en œuvre dans les filtres pour sa propriété d'inductance.

Le terme correspondant en anglais est *inductor* ; le mot *self* du jargon français est sans doute ce qui reste de l'anglais *self-inductance* qui désigne l'inductance propre ou coefficient d'auto-induction. Il y a gros à parier que s'il s'est imposé dans l'esprit des gens habitués à manipuler en même temps des bobines (*selfs*) et des haut-parleurs, c'est précisément parce qu'il permet de bien faire la distinction entre d'une part le composant utilisé dans les filtres et d'autre part la bobine des haut-parleurs, pour lesquels l'anglais a un mot, *coil*, malheureusement sans équivalent en français. Pour éviter la confusion, il faut donc préciser, dans ce cas, qu'il s'agit d'une «bobine mobile». Pour en finir avec ces questions de terminologie, précisons encore que le mot «châssis» est utilisé ici ou là et qu'il désigne le haut-parleur, et de préférence un haut-parleur à membrane conique et saladier (par opposition aux modèles à dôme).

Comme ceci est un livre américain d'origine, vous y trouverez donc souvent le signe " , symbole des mesures en pouces (*inch*). Celles-ci n'ont pas été remplacées systématiquement par les mesures métriques. Les indications «pouces» ont été maintenues là où de toute évidence la conversion en mesures métriques aurait compliqué les choses au lieu de les simplifier. Une table de correspondance des mesures est donnée dans le chapitre 11.

Certains poids (pour le matériau amortisseur par exemple) sont indiqués en «lb», c'est-à-dire en livres américaines (1 lb = 0,453 kg). Dans les formules aussi, certains symboles renvoient à la terminologie anglaise. La connaissance des termes anglais est nécessaire parce que, dans les graphiques aussi, les paramètres sont inspirés de l'anglais (par exemple dans A_{tl} , si le A est le symbole de la surface (ou aire), le «tl» vient de «*transmission line*» qui désigne la ligne de transmission ; c'est le cas aussi pour l'indice b dans V_b (volume de l'enceinte) qui renvoie au mot *box* pour enceinte. Nous donnons à la fin de ce volume, un petit lexique des termes les plus courants.

Les chiffres que vous trouverez entre crochets dans le texte renvoient à la bibliographie abondante donnée à la fin de chaque chapitre. Certains paragraphes ont même une bibliographie spécifique. La référence fréquente «JAES» renvoie bien entendu au *Journal of the Audio Engineering Society*.

1 Fonctionnement du haut-parleur

1.1 Haut-parleur électrodynamique

Ce livre décrit le fonctionnement, les applications et les techniques de mesure des haut-parleurs électrodynamiques ainsi que des enceintes et des filtres associés. Les haut-parleurs électrodynamiques, qui équipent la vaste majorité des enceintes acoustiques, qu'ils soient des haut-parleurs de grave, de médium, d'aigus ou à large bande, fonctionnent tous selon le même principe de base : une bobine mobile, à laquelle est fixée une membrane, se déplace dans l'entrefer d'un aimant permanent ; le champ magnétique engendré par le signal dans la bobine interagit avec le champ permanent de l'aimant. Comme le disait Mark Gander de JBL : « Pour faire du son, il faut déplacer de l'air » [1].

Ce mécanisme est identique à celui du moteur électrique, le rotor du moteur étant remplacé par la bobine mobile du haut-parleur. La figure 1.1 représente une vue éclatée d'un haut-parleur électrodynamique classique à bobine mobile. Un courant appliqué à la bobine mobile engendre un champ électromagnétique perpendiculaire à la fois à l'axe de circulation de ce courant et au champ magnétique de l'aimant permanent. Il en résulte une force mécanique qui provoque le déplacement de la membrane (cône ou dôme) perpendiculairement au champ de l'entrefer, et donc le déplacement de l'air de part et d'autre de cette membrane. Dans un haut-parleur électrodynamique, trois systèmes distincts fonctionnent simultanément :

1. Le moteur : composé de l'aimant, de la plaque de champ arrière, de la pièce polaire du noyau central et de la plaque de champ avant qui définissent l'entrefer, enfin de la bobine mobile.

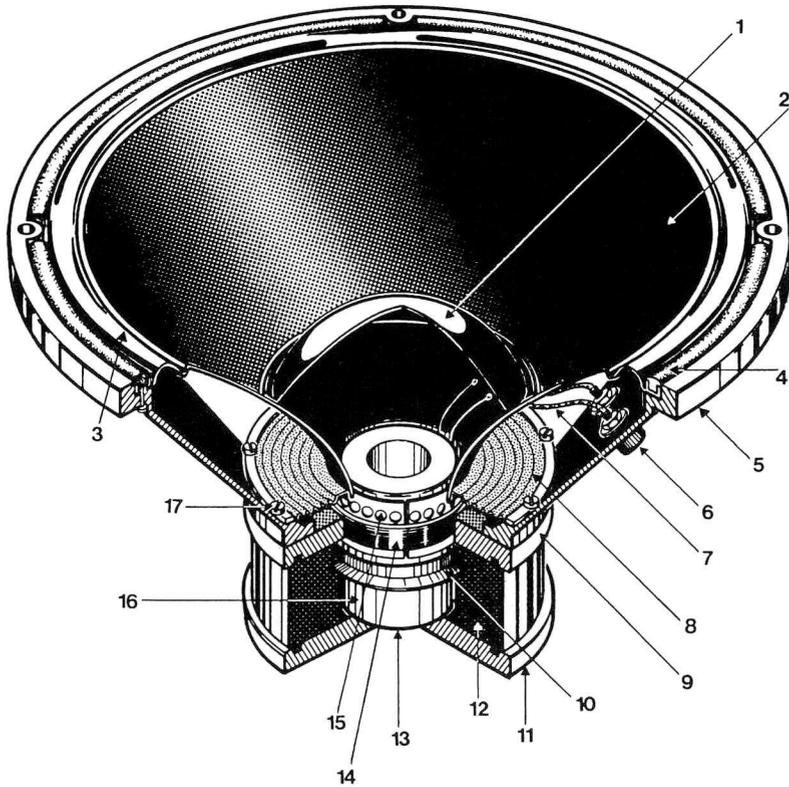
2. La membrane : composée généralement soit d'un cône muni d'un cache-noyau soit d'un dôme d'une seule pièce.

3. La suspension : constituée de la suspension de centrage ou *spider* et de la suspension périphérique.

1.2 Moteur

Le moteur est composé de cinq parties principales : la plaque de champ avant et le noyau central qui constituent l'entrefer, l'aimant, la bobine mobile et la plaque de champ arrière. La plaque de champ arrière, le noyau central ainsi que la plaque de champ avant sont constitués d'un matériau caractérisé par une grande perméabilité magnétique tel le fer (doux) et définissent ainsi le cheminement du champ magnétique engendré par l'aimant. En général, l'aimant en forme d'anneau est en céramique (ferrite). Le champ magnétique se boucle au niveau de l'entrefer et engendre ainsi un intense champ magnétique dans l'air situé entre la plaque de champ avant et le noyau central.

Si l'on applique un courant alternatif à la bobine mobile sous forme d'une sinusoïde à une fréquence donnée, par exemple 60 Hz, le débit du courant dans un sens, pendant la moitié positive de l'alternance, produira le déplacement de la bobine dans une direction. Quand, dans la deuxième moitié de l'alternance, le courant s'inversera, la polarité du champ engendré par la bobine mobile s'inversera également ainsi que son mouvement, conséquence de l'attraction et de la répulsion alternatives des deux champs.



1. Cache-noyau
2. Membrane
3. Suspension périphérique
4. Joint de montage
5. Saladier
6. Bornier
7. Fils de connexion (de la bobine mobile)
8. Suspension de centrage (*spider*)
9. Plaque de champ avant
10. Bague de court-circuit
11. Plaque de champ arrière
12. Aimant
13. Event de refroidissement
14. Bobine mobile
15. Support de bobine mobile
16. Noyau central
17. Vis de fixation

Figure 1.1 : Vue éclatée d'un haut-parleur de graves.

Si la membrane doit reproduire avec précision le mouvement créé par la sinusoïde, il faut que la bobine mobile se déplace symétriquement dans les deux directions à travers l'entrefer. Pour ce faire, il est important que le champ magnétique soit aussi symétrique que possible, de sorte que le mouvement dans une direction résulte d'une force égale à celle qui est exercée pour obtenir le même mouvement dans l'autre direction. Dans le cas contraire, le signal reproduit serait distordu. Il n'y aurait pas d'asymétrie du champ magnétique si son flux était uniquement confiné à l'espace étroit défini par l'entrefer. Malheureusement, les lignes de forces débordent la zone de l'entrefer et provoquent de part et d'autre des champs de fuite.

Plusieurs méthodes sont communément utilisées pour symétriser les champs de fuite, elles sont illustrées dans la figure 1.2. La pièce polaire de la figure 1.2a illustre l'influence de l'asymétrie de la géométrie de l'entrefer sur un champ de fuite. Quoique satisfaisante pour de nombreuses applications, ce serait la méthode de construction la moins souhaitable.

La figure 1.2b illustre l'influence d'un usinage approprié (en T) de la pièce polaire centrale sur les champs de fuite : ils sont symétriques. La figure 1.2c illustre l'influence d'un usinage en M (évidemment conique central) du noyau polaire sur les champs de fuite. Comme dans le cas précédent, la symétrie des champs de fuite est meilleure. Le produit BL représente la force mécanique développée par le courant à travers la bobine mobile.

La force $B \cdot L$ est produite par une longueur de fil conducteur L (nombre de tours de la bobine mobile) soumis à un champ magnétique de densité de flux B . Le produit BL est une mesure de la « force » du moteur et s'exprime en tesla mètre/newton. Des directives sur la manière de mesurer BL sont données au chapitre 9 qui traite des techniques de mesure.

1.2.1 Géométries d'entrefer et facteur de force BL

Lors de la conception des haut-parleurs, on utilise généralement deux types de géométrie pour la configuration de la bobine mobile et de l'entrefer : la bobine courte et la bobine longue. Lors de la conception des haut-parleurs, on utilise généralement deux types de géométrie pour la configuration de la bobine mobile et de l'entrefer : la bobine courte et la bobine longue. Des deux formats illustrés par la figure 1.3, la bobine longue est de loin la plus commune. La distance, nommée X_{\max} dans la figure, représente la distance que peut parcourir la bobine mobile dans une même direction tout en maintenant constant le nombre de spires de la bobine présentes dans l'entrefer. Pour calculer X_{\max} , on soustrait de la hauteur d'entrefer la longueur de la bobine mobile, et on divise le résultat par deux.

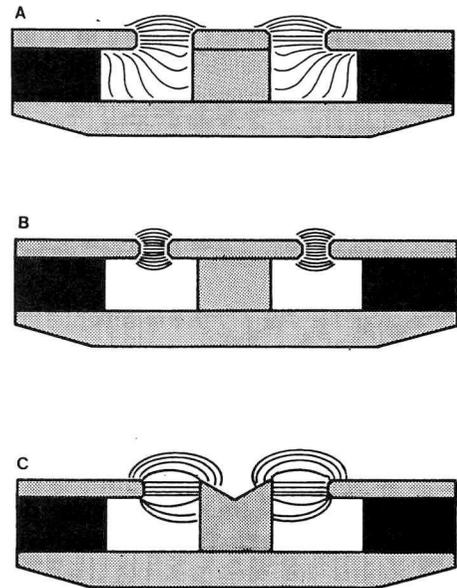


Figure 1.2 : Champs de fuite de différentes formes d'entrefer.

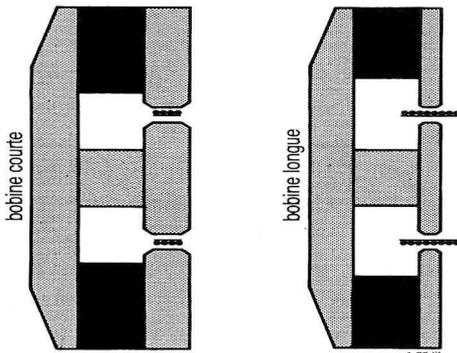


Figure 1.3 : Bobine mobile courte et bobine mobile longue.

La figure 1.4 compare, pour ces deux géométries d'entrefer, la variation de BL lors d'une excursion croissante de la bobine mobile (le graphe représente le mouvement de la bobine mobile dans une même direction à travers l'entrefer). Si on applique une tension croissante au haut-parleur, la bobine mobile s'éloigne de plus en plus de l'entrefer, le nombre de tours de fil dans l'entrefer décroît, et donc le facteur de force BL du moteur décroît aussi. On dit qu'un haut-parleur fonctionne d'une manière linéaire, si le nombre de spires présentes dans l'entrefer est constant, et d'une manière non linéaire, si le nombre de spires présentes dans l'entrefer varie (en augmentant ou en diminuant).

La bobine courte donne une excellente linéarité sur de petits déplacements, par contre son facteur de force BL est généralement inférieur à celui de la bobine longue (car elle nécessite une plus grande hauteur d'entrefer ainsi qu'un champ magnétique plus puissant). De par sa dimension restreinte, la masse de la bobine courte sera plus faible. La configuration à bobine longue présente l'avantage d'une linéarité satisfaisante et d'un meilleur rendement (malgré une masse plus élevée), ce qui explique sa popularité auprès des fabricants de haut-parleurs. On obtiendra la même valeur de X_{\max} à partir de différentes combinaisons de hauteur d'entrefer et de lon-

gueur de bobine mobile, mais les comportements différeront en termes de linéarité (quand on dépasse X_{\max}). Par exemple, une longueur de bobine mobile de 12 mm et un entrefer de 8 mm ont le même X_{\max} de 2 mm qu'une bobine mobile de 8 mm de long associée à un entrefer de 4 mm. Bien que les valeurs de X_{\max} de ces deux géométries soient identiques, le rapport entre la hauteur de l'entrefer et X_{\max} est très différent, 4/1 dans le cas de la bobine mobile de 12 mm et seulement 2/1 dans le cas de la bobine mobile de 8 mm. Ce rapport détermine la vitesse avec laquelle le facteur de force BL décroît quand la bobine sort de l'entrefer.

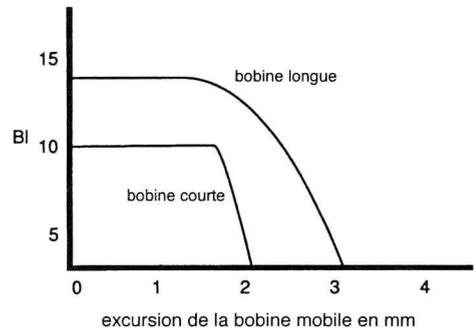


Figure 1.4 : Valeurs de BL en fonction de l'excursion et de la longueur de la bobine mobile.

Les courbes de la figure 1.5 illustrent les différences de non-linéarité pour des géométries ayant le même X_{\max} mais des rapports hauteur d'entrefer/ X_{\max} différents (à partir d'entretiens avec Chris Strahm, de la société Audio Teknology, auteur du programme *Loudspeaker Enclosure Analysis Programm*). La courbe montre que BL commence à décroître progressivement à partir de la distance X_{\max} jusqu'à une valeur environ égale au double de X_{\max} (X_{\max} fois 2), puis elle finit par décroître très fortement. Le facteur de force BL décroît plus lentement quand le rapport hauteur d'entrefer/ X_{\max} est grand, que quand ce rapport est petit. On remarque que le produit BL varie peu lorsque la bobine

mobile approche des limites de son excursion, zone où elle sort largement de son entrefer, puis la courbe s'aplatit en tendant vers zéro.

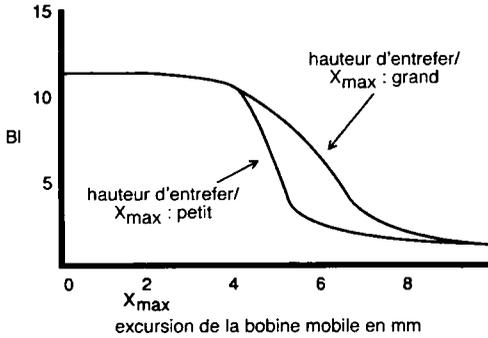


Figure 1.5 : Valeurs de BL en fonction de X_{max} , pour deux configurations hauteur d'entrefer/ X_{max} différentes.

Le facteur BL ne commence à décroître lentement qu'à partir d'une distance égale au double de celle de X_{max} , la distorsion mesurable se manifeste en revanche bien auparavant. En termes de distorsion, on accepte la valeur de X_{max} plus environ 15%, comme la limite extrême du déplacement de la bobine mobile. Pour déterminer cette excursion maximale, mesurez avec un distorsiomètre (analyseur de distorsion) la valeur de la distorsion de l'harmonique trois, quand on applique une tension croissante à la bobine mobile. Lorsque l'on augmente l'excursion de la bobine et que l'on dépasse les limites de X_{max} , on constate que la distorsion par harmonique trois augmente également. L'amplitude $X_{max} + 15\%$ tend à coïncider avec un niveau de distorsion de l'harmonique trois de 3% [1].

1.2.2 Bague de court-circuit et boucle de Faraday

Le courant qui provoque le mouvement de la bobine mobile produit indirectement, par ce mouvement, un autre courant qui circule en sens inverse du premier et que l'on nomme

courant d'auto-induction (correspondant à la force contre-électromotrice). Ce courant est induit dans la bobine mobile car celle-ci se comporte comme l'induit d'un générateur. Cet effet, ajouté au champ alternatif engendré par le courant du signal à travers la bobine mobile, provoque la modulation du champ magnétique de l'entrefer. Ce phénomène, identifié par W.J. Cunningham en 1949 [4], est à l'origine d'une importante distorsion de l'harmonique deux. Des recherches supplémentaires ont montré que la modulation de ce champ variait en fonction de la direction dans laquelle la bobine mobile traversait le champ. C'est un effet asymétrique [5].

La pièce polaire centrale agit en quelque sorte comme un noyau de transformateur vis-à-vis de la bobine mobile. Cette asymétrie provient en partie du fait que, lors des déplacements de la bobine au-delà de X_{max} , elle recouvre entièrement le noyau tant qu'elle se déplace vers l'arrière, alors qu'elle ne le recouvre que partiellement lorsqu'elle se déplace vers l'avant. On a également suggéré que le flux de la bobine mobile interagit et modifie la forme du champ de fuite. Cette observation explique, au moins en partie, le bénéfice apporté par une configuration en *push-pull*, exposée aux chapitres 2 et 3.

La solution la plus évidente est d'utiliser, pour les pièces proches de la bobine mobile, un fer au degré de perméabilité suffisamment élevé, pour que, le métal étant toujours saturé, on n'obtienne que des modulations négligeables du circuit magnétique. Cette technique n'est mise en œuvre que rarement, étant donné le prix relativement élevé des métaux à forte perméabilité magnétique. On appelle bague de court-circuit ou boucle de Faraday les techniques les plus communes mises au point pour s'opposer à cette modulation du champ (courant parasite, de Foucault). Illustrée dans la figure 1.6, l'application de la bague de court-circuit montre différentes variantes, qui ont toutes pour fonction d'engendrer un champ égal et

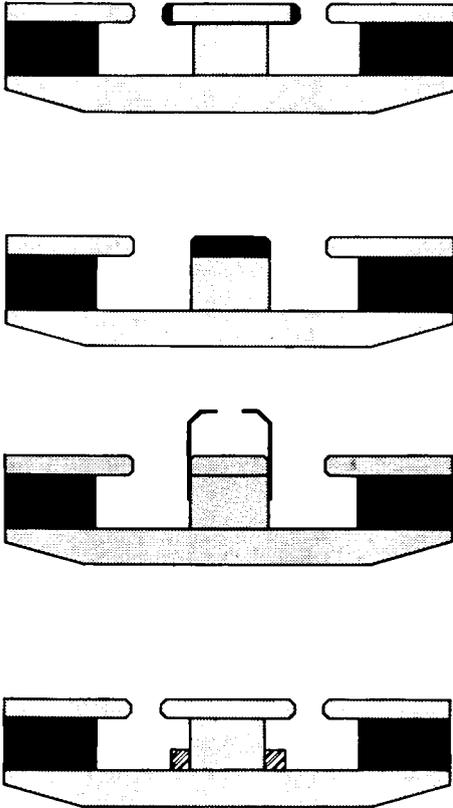


Figure 1.6 : Différentes géométries de bague de court-circuit.

opposé aux champs induits par la bobine mobile. La figure 1.6a montre la partie du noyau central définissant l'entrefer recouvert par un matériau conducteur tel le cuivre. La figure 1.6b montre un capuchon de cuivre recouvrant la pièce polaire. En 1.6c figure un cylindre de cuivre entourant la pièce polaire, et en 1.6d une bague de court-circuit (bague stabilisatrice de flux), réalisée parfois en aluminium et placée autour de la base du noyau polaire.

L'utilisation d'une pièce polaire blindée offre l'avantage supplémentaire de réduire l'inductance (effective) de la bobine, ce qui améliore la réponse aux fréquences élevées. On peut, en jonglant avec la quantité de blindage et son emplacement, contrôler la réponse en fréquence pour la bande médium et le registre aigu du haut-parleur. La bague de court-circuit, située à la base de la pièce polaire, diminue la distorsion par harmonique deux, comme les méthodes de blindage du noyau, mais elle n'affecte ni l'inductance de la bobine mobile, ni la réponse aux hautes fréquences. Bien que l'usage de la bague de court-circuit se caractérise par une diminution de la distorsion, on l'utilise essentiellement pour modeler la réponse en fréquences dans les registres médium et aigu.

1.3 Membrane

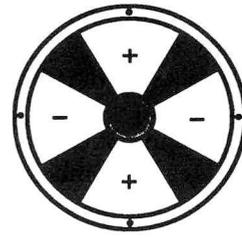
La description de la physique des membranes de haut-parleur commence d'habitude par l'exposé théorique du rayonnement dans l'air d'un piston infiniment rigide. Le transfert du mouvement du piston à l'air sera limité, en termes de fréquences, à la limite inférieure du spectre, par sa fréquence de résonance (en dessous de laquelle sa capacité de transmettre de l'énergie est limitée par des contraintes mécaniques), et à la limite supérieure, par la nature de l'impédance de rayonnement de l'air. L'air oppose une résistance au mouve-

ment, appelée impédance de rayonnement, qui décroît à mesure que la fréquence augmente, jusqu'à un point où toute augmentation supplémentaire de la fréquence provoquera une augmentation identique de la résistance.

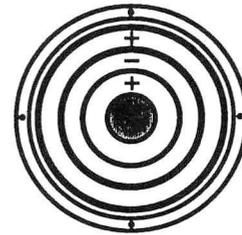
Cette limite supérieure en fréquence, en-deçà de laquelle le transfert d'énergie chutera continuellement, dépend à la fois de l'impédance de rayonnement de l'air et du diamètre de la surface de rayonnement. Les petites surfaces de rayonnement reproduisent des fréquences plus élevées que les grandes surfaces, une caractéristique qui est à l'origine de la spécialisation des haut-parleurs dans différentes bandes de fréquences. Dans la réalité, les membranes ne sont évidemment pas infiniment rigides. Elles se déformeront plus ou moins en fonction du matériau utilisé. La déformation de la membrane a un effet déterminant sur le rendement en haute fréquence, sur la courbe de réponse et sur la directivité du haut-parleur. S'ils sont différents, les matériaux sont caractérisés chacun par un degré de rigidité propre et transmettent donc les vibrations à des vitesses différentes ; ils ont néanmoins tous tendance à produire les mêmes déformations, nommées généralement « modes ».

1.3.1 Modes de résonance des membranes

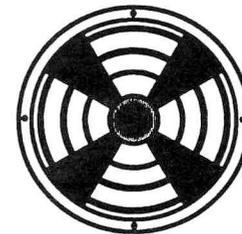
La figure 1.7 illustre les deux classes de modes, le mode radial et le mode concentrique, utilisées lors de l'analyse des vibrations des membranes de haut-parleur (d'après Beranek, avec modifications). Le mode radial s'étend du centre de la membrane vers le bord externe, il apparaît essentiellement dans les basses fréquences et on le considère comme secondaire. Le mode de résonance concentrique consiste en un ensemble d'ondes (stationnaires) ou de rides distribuées du centre de la membrane vers l'extérieur. Ces modes concentriques, rendus



mode radial



mode concentrique



combinaison du mode radial et du mode concentrique

Figure 1.7 : Différents modes d'ondes stationnaires d'une membrane conique de haut-parleur.

visibles par les techniques holographiques, ressemblent à ce que l'on voit, lorsque l'on fait tomber un caillou dans de l'eau.

La quantité d'ondes varie avec la fréquence, et, quand la fréquence change, certaines de ces perturbations réfléchies du bord vers le centre forment des motifs d'interférence. Ces ondes et ces perturbations mettent l'air en

mouvement d'une manière complexe ; certaines sont en phase avec le signal de la bobine mobile, d'autres ne le sont pas. Dans la figure 1.6 les zones « + » et « - » représentent des surfaces de membranes en opposition de phase. Cet ensemble complexe, fait d'additions et d'annulations, appelé rupture de membrane, crée de nombreuses irrégularités dans la courbe de réponse caractéristique d'un haut-parleur.

Lorsque la fréquence croît, la surface de la membrane réellement rayonnante décroît. Ainsi les fréquences très élevées ont tendance à n'être émises que par la partie centrale de la membrane. À une certaine fréquence, la masse de la membrane effectivement rayonnante diminue et une forte chute de niveau se manifeste ; on parle de « coupure des hautes fréquences ». Pour obtenir une fréquence limite supérieure élevée, le rapport entre la masse de la bobine mobile et celle de la membrane doit être aussi faible que possible. La fréquence limite supérieure dépend également de l'inductance de la bobine mobile.

1.3.2 Directivité de la membrane

Tout haut-parleur devient plus directif à mesure que la fréquence augmente. Les hautes fréquences commencent à se focaliser comme la lumière émise par un projecteur d'automobile. Aux fréquences où la longueur d'onde du son est grande, comparée à la circonférence de la membrane (environ trois fois le diamètre), le rayonnement est sphérique (la longueur d'onde est égale à la vitesse du son divisée par la fréquence ; λ (m) = c (344,4 m/s) / f (Hz) ; par exemple : à une fréquence de 1 kHz correspond une longueur d'onde de 0,344 m). Au fur et à mesure que la fréquence augmente, jusqu'à ce que la longueur d'onde devienne égale ou inférieure à la circonférence du haut-parleur, la directivité du haut-parleur s'accroît. Le graphique de la figure 1.8 donne les points qui correspondent à une chute de 6 dB en dehors de l'axe pour différents diamètres de membranes (d'après Daniels avec modifications, *JBL Pro Soundwaves*, automne 1988).

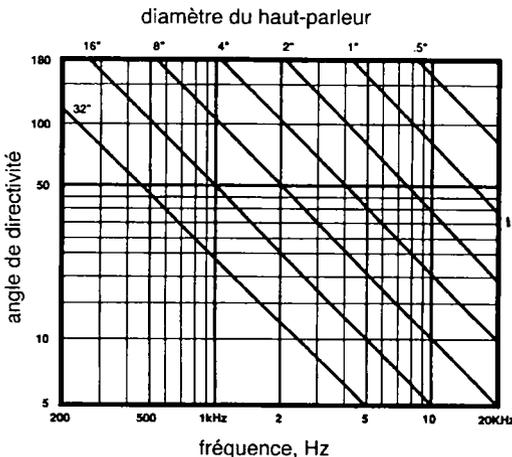


Figure 1.8 : Directivité des membranes en fonction de leur diamètre.

1.3.3 Forme de la membrane

Différentes formes de membranes donneront différentes courbes de réponse. Il y a deux classes de formes utilisées lors de la conception des membranes : d'une part la forme conique et plate, d'autre part la forme convexe. Les membranes coniques sont affligées souvent d'un pic important à l'extrémité supérieure de la bande de fréquence ; la fréquence de cette résonance est en partie déterminée par l'angle d'ouverture du cône. Toutefois, si on les compare à la forme convexe, les membranes coniques ont une bande passante un peu plus grande. Les membranes convexes bénéficient d'une réponse en fréquence plus plate, perturbée seulement par une résonance modérée dans la partie élevée du spectre (rendement plus faible dans les fréquences élevées). Leur bande passante est un peu plus réduite que celle des membranes coniques [7]. En chan-

geant la courbure des membranes convexes, on corrigera ou modifiera la courbe de réponse du haut-parleur.

1.3.4 Cache-noyau

La largeur de l'entrefer d'un haut-parleur peut varier de plusieurs millimètres, pour un haut-parleur de grand diamètre, à l'épaisseur d'une feuille de papier bristol, pour des haut-parleurs d'aigu (*tweeter*) à petite membrane. La largeur de l'entrefer est aussi réduite que possible, afin d'obtenir la densité de flux la plus forte possible, tout en tenant compte d'une part des tolérances du centrage de la bobine et d'autre part de la dilatation thermique. Pour fixer avec précision la bobine mobile à la membrane et pour centrer l'ensemble, on cale la bobine mobile dans l'entrefer. Cette méthode de calage impose de laisser une ouverture au milieu de la membrane pour extraire la bague de calage après le collage. Si l'on n'y faisait rien, la bobine mobile et la pièce polaire centrale resteraient exposées aux particules étrangères, et la poussière pourrait se loger entre la bobine mobile et la pièce polaire centrale. Inutile de nous étendre sur les conséquences ! La solution habituelle est d'obturer cette ouverture avec un cache-noyau ou dôme anti-poussière.

La pose d'un cache-noyau sur la membrane résout certes un problème, mais en crée bien d'autres. Il existe deux types de cache-noyau : les cache-noyau solides et les cache-noyau poreux. Un cache-noyau solide ne laisse pas passer l'air ; par contre, il définit un petit volume d'air qui créera des variations de pression quand la membrane fera ses va-et-vient au-dessus de la pièce polaire centrale. Ces successions de compressions et de dépressions de l'air peuvent avoir des effets préjudiciables au bon fonctionnement du haut-parleur. Comme l'espace entre la bobine mobile et la pièce polaire centrale est trop petit pour réduire efficacement la pression causée par le mouvement du cache-noyau, les

fabricants résolvent ce problème par deux méthodes différentes. La première est de munir la pièce polaire d'un évent ; pour que l'air puisse passer, on perce la pièce polaire d'un petit trou et on pratique une ouverture dans la plaque de champ arrière. L'autre méthode consiste à perforer le support de la bobine mobile près de l'endroit où il est fixé à la membrane. Ceci permettra à l'air de s'écouler hors de la petite cavité et réduira ainsi la pression entre cache-noyau et pièce polaire centrale. Quand ils sont poreux, les cache-noyau réduisent également assez vite la pression d'air créée devant la pièce polaire, mais ils ne sont pas sans défauts pour autant. Premièrement, ils créent une fuite du volume interne de l'enceinte acoustique vers l'extérieur. Mais cet effet n'est pas trop gênant, car le volume d'air qui fuit à travers l'entrefer est faible, surtout si on le compare, par exemple, à la fuite d'une suspension périphérique poreuse. Un autre type de problème apparaît quand la membrane se déplace vers l'intérieur et que, comprimé par la pièce polaire, l'air est expulsé à travers le cache-noyau vers la partie rayonnante de la membrane. Ce jet d'air soudain sera en opposition de phase avec le rayonnement de la membrane et pourra provoquer des perturbations dans la courbe de réponse. Il faut éviter d'étanchéifier un cache-noyau poreux, même s'il provoque des défauts évidents sur la courbe de réponse, car, lors de la conception du haut-parleur, il a certainement été choisi pour sa capacité de ventilation pour refroidir la bobine. Le flux d'air dans l'entrefer évacue la chaleur engendrée par la bobine mobile. L'occlusion du cache-noyau peut aussi changer la compliance et le facteur de qualité Q du haut-parleur, ce qui est parfois souhaitable et d'autres fois, non.

Les cache-noyau modifient également le haut de la courbe de réponse du haut-parleur. Comme la membrane a tendance à rayonner près du centre aux fréquences élevées, le cache-noyau peut jouer un rôle déterminant en modifiant cette zone de fréquences en

fonction de sa forme et du matériau qui le compose. Les cache-noyau étanches ont tendance à provoquer plus de changements dans la courbe de réponse que les cache-noyau poreux. Parfois, on en voit en matière étanche qui ont des perforations périphériques munies de petites grilles anti-poussière pour réduire la pression d'air. Suivant le cas, cette fabrication leur confère l'avantage (ou l'inconvénient) de l'une des deux méthodes.

1.3.5 Formes des dômes

Les haut-parleurs médiums et aigu à dômes ont les mêmes types de problèmes que ceux que l'on observe avec les membranes coniques. Les dômes sont soit concaves soit convexes. Les membranes concaves ont généralement un rendement bien plus élevé dans la partie supérieure du spectre, en contrepartie, leur directivité est plus marquée. Le rendement plus élevé provient, du moins en partie, d'une large bosse de leur courbe de réponse, elle-même causée à la fois par des résonances de cavité (amortissables dans une certaine mesure) et par le fait que les dômes concaves sont habituellement en matériau rigide. Les dômes convexes ont une meilleure réponse polaire (directivité plus faible) pour les fréquences élevées, mais il leur manque le rendement des dômes concaves dans ce domaine [9].

1.4 Suspensions

Dans tout haut-parleur, la suspension est constituée de deux éléments : la suspension périphérique et la suspension centrale de centrage ou *spider*. La suspension périphérique, habituellement faite de caoutchouc, de mousse synthétique ou de toile traitée, remplit plusieurs fonctions. La suspension périphérique assure le centrage de la membrane et produit une partie des forces de rappel qui

maintiennent la bobine mobile dans l'entrefer. La suspension périphérique joue aussi le rôle d'amortisseur pour le bord extrême de la membrane. Le *spider*, habituellement constitué de toile dite corruguée (c'est-à-dire plissée), centre la bobine mobile autour de la pièce polaire et procure la force de rappel pour maintenir la bobine mobile dans l'entrefer.

1.4.1 Suspension périphérique

La rigidité de la suspension périphérique et celle du *spider* sont généralement présentées en termes de facilité de mouvement ou compliance (la compliance étant l'opposé de la rigidité). La compliance totale du haut-parleur est répartie entre 80% environ pour le *spider* et 20% environ pour la suspension périphérique. La suspension périphérique a deux fonctions importantes. La première est de centrer la bobine mobile sur la pièce polaire. La deuxième fonction, non négligeable, est d'amortir les modes de vibrations à l'extrémité de la membrane. Le choix du matériau de la suspension périphérique et de son épaisseur peut modifier fortement la courbe de réponse du haut-parleur. La propriété de la suspension périphérique, qui est d'amortir les modes de résonance de la membrane et de prévenir le retour des réflexions vers son centre, peut altérer à la fois l'amplitude et la phase des combinaisons de modes. De ce fait, il faut, dès sa conception, considérer la suspension périphérique comme faisant intégralement partie de la membrane ; elle est l'un des éléments efficaces qui façonnent la courbe de réponse du haut-parleur.

1.4.2 Suspension de centrage ou *Spider*

Le *spider* a plusieurs fonctions. Ses tâches secondaires sont d'assurer le centrage de la bobine mobile dans l'entrefer et de barrer la route aux particules de poussière. Sa fonction première est toutefois de fournir la principale force de rappel (compliance) pour la mem-

brane du haut-parleur. C'est la raideur du *spider* qui définit la résonance du haut-parleur. La résonance d'un haut-parleur est fonction d'une compliance et d'une masse, elle s'exprime par :

$$f = [6,28 \cdot \sqrt{C_s \cdot M_D}]^{-1}$$

où f est la fréquence de résonance à l'air libre du haut-parleur,

C_s est la compliance du haut-parleur,

M_D est la masse totale de l'équipage mobile, c'est-à-dire de la bobine mobile, de la membrane, du *spider* et de la suspension périphérique ainsi que la masse de la charge d'air (à l'air libre).

1.4.3 Systèmes de suspension linéaire et progressive

Intuitivement, il semble évident que le meilleur type de suspension serait celui qui produirait une force de rappel uniforme pour toutes les elongations de l'équipage mobile. Alors que ceci peut être exact pour des haut-parleurs pour enceintes closes, où la compliance de l'air agit comme une force de rappel sur la membrane, c'est exactement l'inverse qui se produit pour des haut-parleurs montés en enceintes *bass-reflex*. Cette anomalie, surnommée « effet de bidon d'huile » par Don Keele [10], provoque un décalage dynamique de la bobine mobile. Ce problème du décalage du point de repos, un défaut de linéarité, se manifeste quand l'équipage mobile du haut-parleur approche des limites de son excursion X_{max} . Quand, en se déplaçant, la bobine arrive à la position à partir de laquelle elle quitte l'entrefer, le facteur de force BL décroît ainsi que le courant d'auto-induction. De ce fait, la bobine consomme plus de courant, déborde encore plus de l'entrefer et se met à produire de la distorsion. Le problème du décalage non-linéaire peut être compensé par une suspension progressive. Il s'agit alors d'une combinaison particulière de *spider* et de sus-

pension périphérique qui se caractérise par une rigidité accrue au moment même où BL décroît (figure 1.5). Si le point de départ de l'augmentation de la rigidité coïncide avec celui de la décroissance de BL , alors la bobine mobile sera empêchée d'accélérer sa course et ainsi de s'extraire davantage de l'entrefer. Des suspensions de ce type se trouvent fréquemment dans les haut-parleurs de graves (aussi appelés *boomers*) de sonorisation de forte puissance. À en croire le nombre de haut-parleurs de graves à suspension très linéaire que l'on trouve montés à tort dans des enceintes *bass-reflex*, il faut croire que la plupart des amateurs ignorent tout de ce qui précède ou du moins n'en tiennent pas compte.

1.5 Impédance du haut-parleur

Tous les haut-parleurs que j'ai décrits dans cet ouvrage peuvent être représentés mathématiquement par un circuit électrique équivalent, dont le fonctionnement est analogue à celui du haut-parleur. Cette méthode est à la base de toutes les techniques de calcul concernant les enceintes acoustiques décrites dans les chapitres 2 à 5. L'équivalent électrique d'un haut-parleur est représenté par un circuit électrique dont l'impédance reproduit celle du haut-parleur. Les détails de la mesure de l'impédance d'un haut-parleur typique sont illustrés dans la figure 1.9. La figure 1.10 décrit le circuit électrique équivalent d'un haut-parleur. Les éléments de ce circuit sont les suivants :

- RE** résistance en courant continu de la bobine mobile du haut-parleur
- REVC** partie réelle (composante résistive) de l'inductance de la bobine mobile
- LEVC** partie imaginaire de l'inductance de la bobine mobile
- MD** paramètre mécanique dû à la masse

C_s	paramètre mécanique dû à la compli- ance
R_{eS}	paramètre mécanique associé à l'amortissement
Z_B	impédance de rayonnement arrière du haut-parleur
Z_F	impédance de rayonnement avant du haut-parleur

Ce modèle est similaire à celui décrit par Beranek [11], si ce n'est que la réactance de la bobine mobile n'est pas considérée comme constante mais varie avec la fréquence [12] comme illustré en figure 1.9.

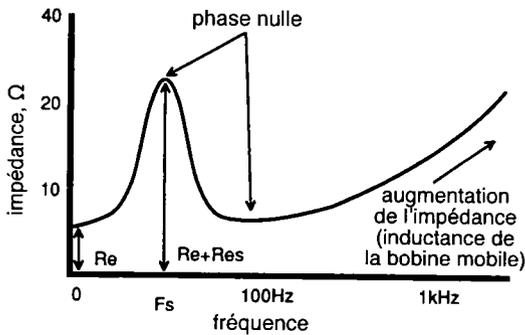


Figure 1.9 : Courbe d'impédance d'un haut-parleur.

1.6 Puissance, rendement et volume de la pièce d'écoute

Le niveau sonore produit par une puissance électrique donnée, provenant d'un amplificateur, est une fonction directe du rendement du haut-parleur ainsi que du volume d'air qu'il excite. Avant de construire vos propres enceintes acoustiques, il est important de connaître le niveau sonore que vous désirez obtenir dans votre pièce, afin de définir la

puissance que devront supporter vos haut-parleurs. Comme le rendement de la plupart des haut-parleurs est médiocre, de l'ordre de 0,5% à 2%, il conviendra de calculer la puissance acoustique appropriée. Si l'on considère un haut-parleur d'un rendement de 0,5% (les calculs de rendement sont exposés dans les chapitres 2 et 3) qui équipe un baffle infini typique, et un amplificateur capable de délivrer 50 W RMS, on obtiendra pour cet ensemble une puissance acoustique de 0,25 W ($0,005 \times 50 \text{ W} = 0,25 \text{ W}$).

Le graphe de la figure 1.11 sert à déterminer le niveau sonore SPL (*Sound Pressure Level*) obtenu lors d'un programme musical pour une puissance acoustique donnée et dans un volume précis. Si nous prenons nos 0,25 W acoustique pour alimenter une salle de séjour d'environ 100 m^3 ($6,4 \text{ m} \times 6,0 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$), on obtiendra un niveau sonore d'environ 97 dB SPL. Pour augmenter ce niveau de 3 dB à 100 dB SPL, il nous faudra doubler la puissance de l'amplificateur à 100 W. Limité par sa puissance nominale, en supposant que cette caractéristique soit un tant soit peu cohérente avec ses capacités thermiques (beaucoup ne le sont pas), notre unique haut-parleur, avec un rendement de 0,5%, risque de faire pâle figure. Plutôt que de doubler la puissance de l'amplificateur, il est préférable d'ajouter un deuxième haut-parleur. L'addition d'un deuxième haut-parleur, branché en parallèle sur le premier, double la surface de la membrane, et augmente d'un facteur de quatre la puissance acoustique émise. Les deux haut-parleurs, combinés et alimentés par le même amplificateur de 50 W, délivrent 1 W acoustique, c'est-à-dire 103 dB dans la même pièce. C'est une puissance de 200 W qu'il faudrait pour obtenir le même niveau sonore SPL avec un seul haut-parleur.

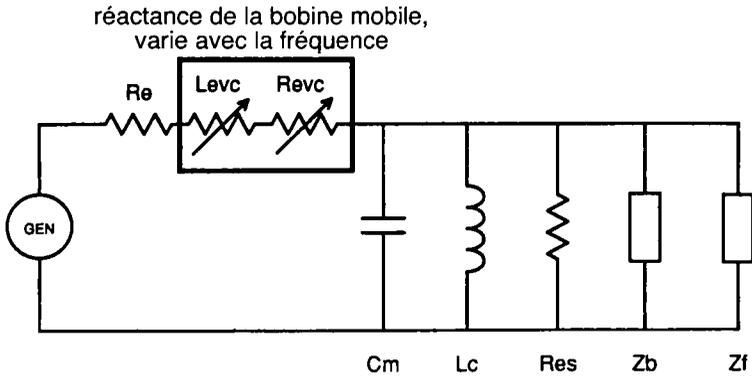


Figure 1.10 : Schéma équivalent d'un haut-parleur dynamique.

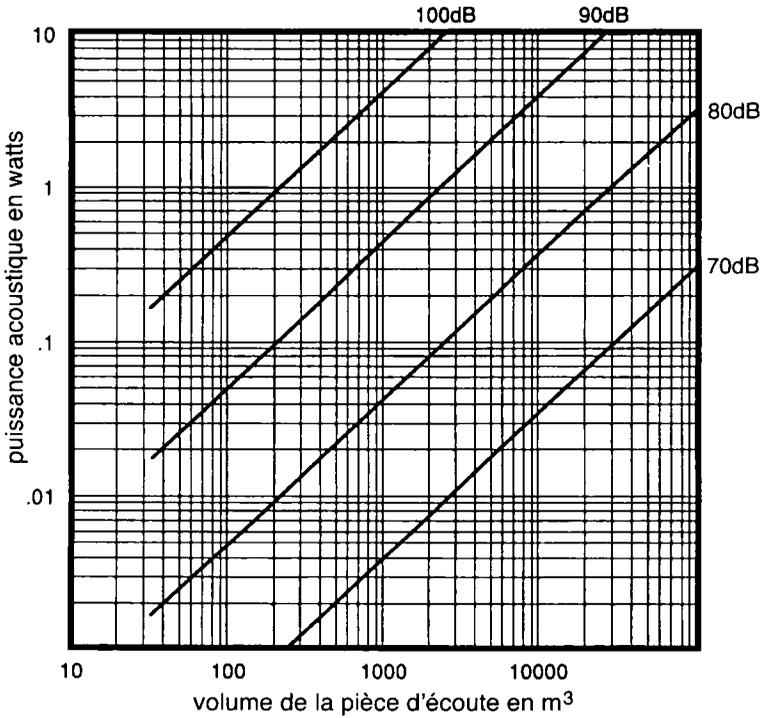


Figure 1.11 : Puissance acoustique en fonction du volume de la pièce d'écoute.

Bibliographie

1. **Mark Gander**, *Moving Coil Loudspeaker Topology as an Indicator of Linear Excursion Capability*, JAES, 1-2/81
2. **R. Lian**, *Distortion Mechanisms in the Electrodynamic Motor System*, 84^e convention de l'AES, 3/88, publication préliminaire 12572
3. **E.J. Jordan**, *Loudspeakers*, Focal Press Ltd., 1963. (extrait de *Encyclopedia of High Fidelity*, John Borwick, ed.)
4. **W.J. Cunningham**, *Nonlinear Distortion in Dynamic Loudspeakers Due to Magnetic Effects*, Journal Acoustical Society of America, Vol. 21, 5/49
5. **David Birt**, *Nonlinearities in Moving Coil Loudspeakers with Overhung Voice Coils*, 88^e convention de l'AES, 3/90, publication préliminaire 2904
6. **F.J.M. Frankort**, *Vibration Patterns and Radiation Behavior of Loudspeaker Cones*, JAES, 9/78
7. **Yashima & Suzuki Shindo**, *Effect of Voice-Coil and Surround on Vibration and Sound Pressure Response of Loudspeaker Cones*, JAES, 7-8/80
8. **Richard Pierce**, *The Dust Cap Solution*, *Speaker Builder*, 1/91
9. **Suzuki & Tichy**, *Radiation and Diffraction Effects by Convex and Concave Domes*, JAES, 12/81
10. **Jr., D.B. Keele**, *Equipment Profile: The Paradigm SE Loudspeaker*, *Audio*, 9/90, p. 90
11. **Leo Beranek**, *Acoustic*, McGraw-Hill, 1954, Acoustical Society of America, 1986
12. **J.R. Wright**, *An Empirical Model for Loudspeaker Motor Impedance*, JAES, 10/90

2 Enceintes closes

2.1 Définition

L'enceinte close représente le plus simple des différents modèles d'enceinte acoustique. Elle est constituée d'une part, de l'enceinte proprement dite avec son volume d'air clos et, d'autre part, du haut-parleur. Elle se présente comme un circuit électrique et pneumatique, comparable à un filtre passe-haut du second ordre, dont la réponse dépend de la résonance et de son amortissement. Il y a deux modèles fondamentaux d'enceintes closes : le baffle infini (IB pour *infinite baffle* en anglais) et la suspension acoustique (AS pour *air suspension*). La taille de l'enceinte IB est plutôt grande afin que la compliance de l'air captif (c'est-à-dire sa caractéristique d'élasticité) soit supérieure à la compliance du haut-parleur. Une enceinte close devient une suspension acoustique, quand la compliance du volume d'air captif est inférieure à la compliance du boomer (haut-parleur de graves) d'un facteur de trois ou davantage [1,2]. C'est Acoustic Research qui, dans les années cinquante, a popularisé cette configuration associant suspension souple du haut-parleur de graves et enceinte close de petit volume, qui reste d'ailleurs en usage chez bien des fabricants.

L'enceinte close est, par excellence, le modèle à choisir pour une réalisation d'amateur, surtout débutant, grâce notamment à la malléabilité de sa courbe de réponse et de son régime impulsionnel, mais aussi parce qu'il est facile de tirer de bonnes performances d'une enceinte close.

2.1.1 Terminologie

f_3	fréquence à -3 dB ou à demi-puissance (marque le début de la pente d'atténuation, nommée aussi fréquence de coupure).
f_s	fréquence de résonance du haut-parleur.
f_c	fréquence de résonance de l'enceinte close.
Q	rapport de la réactance à la résistance (circuit série) ou de la résistance à la réactance (circuit parallèle).
Q_{ts}	Q total du haut-parleur de grave (boomer) à f_s , compte tenu de toutes les résistances du boomer.
Q_{tc}	Q total du haut-parleur de grave (boomer) à f_c , compte tenu de toutes les résistances de l'enceinte.
V_{as}	volume d'air caractérisé par une compliance acoustique identique à celle de la suspension du haut-parleur.
V_{ab}	volume d'air caractérisé par une compliance acoustique identique à celle de l'enceinte.
X_{max}	élongation linéaire maximale de la membrane du haut-parleur.
S_d	surface efficace du haut-parleur (d correspond ici au mot anglais <i>driver</i> pour haut-parleur).
V_d	volume crête déplacé par la membrane du haut-parleur.
V_b	volume interne net de l'enceinte close.
α	rapport de compliance (lettre grecque alpha).
η_0	efficacité de référence (lettre grecque éta).
C_{as}	compliance acoustique de la suspension du haut-parleur.
C_{ab}	compliance acoustique de l'air contenu dans l'enceinte.

2.2 Historique

Depuis le tout début et jusqu'aux années cinquante, le modèle d'enceinte close du type baffle infini a été très répandu. Les choses ont changé pourtant dès 1949, après que Harry Olson et son associé J. Preston eurent déposé leur brevet de la suspension acoustique. Ce changement a été, dans une large mesure, promu par les travaux d'un partisan de la première heure de la suspension acoustique, Edgar Villchur. Dès 1954, paraissait dans le magazine *Audio* sa série d'articles établissant la suspension acoustique comme le *nec plus ultra* de l'enceinte acoustique (*AUDIO*, oct. 1954, juil. 1955, oct. 1957, et *JAES* juil. 1957). C'est à la même époque qu'Acoustic Research a présenté l'AR-3, archétype de l'enceinte à suspension acoustique. Henry Kloss, cofondateur d'Acoustic Research avec Villchur, fonda avec succès deux autres sociétés, à savoir KLH et Advent, qui poursuivirent la popularisation de la suspension acoustique. En 1972, Richard Small publia l'ouvrage le plus complet à ce jour sur les enceintes closes [3,4]. La présentation faite ici de l'enceinte close est largement redevable à la clarté et à la simplicité de ce travail monumental.

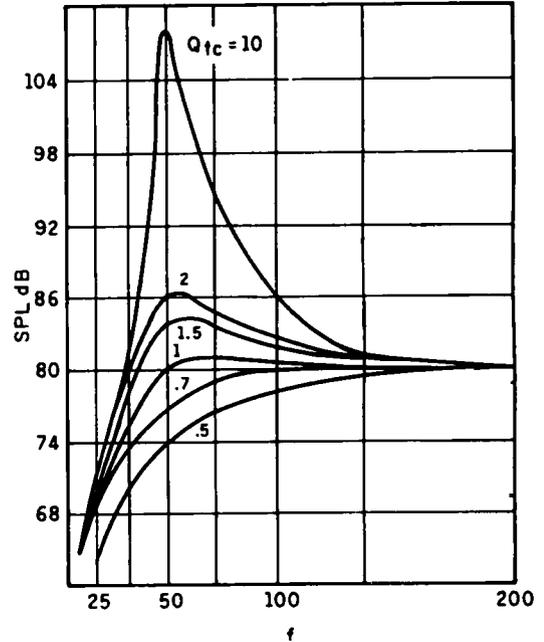


Figure 2.1 : Courbes de réponse d'enceinte close à différents Q .

(le mot « ébénisterie » désigne ici la caisse de l'enceinte). La figure 2.1 montre les relations entre différentes valeurs de Q et la réponse en fréquence [5,6].

2.3 Paramètre Q du haut-parleur et réponse de l'enceinte acoustique

L'enjeu primordial, lorsque l'on associe un haut-parleur de graves à une enceinte ayant un volume défini, est d'arriver à déterminer les caractéristiques de cette combinaison. La méthode objective consiste à effectuer des mesures, puis à ajuster le paramètre Q . Le terme Q est un terme composite qui, dans ce cas, décrit l'amplitude de la résonance de l'enceinte. Il représente le degré d'interaction entre les circuits électriques, mécaniques et pneumatiques, qui définissent la résonance de l'ensemble haut-parleur de grave/ébénisterie

On peut faire plusieurs remarques à propos du réseau de courbes de réponse illustrées en figure 2.1. Premièrement, les enceintes closes ont une pente d'atténuation peu prononcée d'environ 12 dB/octave pour la chute en basses fréquences. Comparée aux enceintes *bass-reflex* ou à celles équipées d'un haut-parleur passif, dont la pente d'atténuation est de 24 dB/octave, une enceinte close ayant la même fréquence de coupure f_3 donnera plus de grave et aura une réponse transitoire plus stable.

Deuxièmement, certaines valeurs de Q_{tc} ont des caractéristiques de réponses spécifiques que l'on peut classer de la manière suivante :

$$Q_{tc} = 0,5$$

amortissement critique - régime transitoire parfait.

$$Q_{tc} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

réponse de Bessel (D_2) - temps de propagation constant.

$$Q_{tc} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

réponse de Butterworth (B_2) - linéarité maximale de l'amplitude associée à une fréquence de coupure minimale.

$$Q_{tc} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$$

réponse de Chebychev (elliptique C_2) à ondu-
lations constantes, capacité de puissance
maximale et rendement maximal, régime
transitoire quelque peu dégradé.

Bien que ces valeurs particulières de Q_{tc} ne
représentent que des points particuliers
parmi un continuum de valeurs possibles,
nous sommes en mesure de décrire les quali-
tés sonores subjectives qui les caractérisent.
Les valeurs de Q élevées (autour de 1) ont des
basses profondes, parfois robustes, que les
commerciaux de la branche audio qualifient
de « vendables ». Les valeurs plus faibles de Q
(vers 0,8) ont un son plus détaillé (en partie
grâce à l'amélioration des transitoires), quoi-
que comparativement un peu plus plat.
 $Q_{tc} = 0,5$ est considéré comme excessivement
tendu et trop amorti. Toutefois certains spé-
cialistes continuent de considérer cette valeur
(0,5 à 0,6) comme optimale [7]. De temps à
autre, une enceinte acoustique de qualité,
comme la Roger LS3/5A, est conçue avec

Tableau 2.0

Q_{tc}	« pic dB »	f_{Gmax}/f_c	f_{Xmax}/f_c
0,5	0	-	0
0,577	0	-	0
0,707	0	-	0
0,8	0,213	2,138	0,468
0,9	0,687	1,616	0,619
1,0	1,249	1,414	0,707
1,1	1,833	1,305	0,766
1,2	2,412	1,238	0,808
1,3	2,974	1,192	0,839
1,4	3,515	1,159	0,863
1,5	4,033	1,134	0,882

où « pic dB » = niveau en dB
du pic de résonance

$$= 20 \log_{10} \sqrt{\frac{Q_{tc}^4}{Q_{tc}^2 - 0,25}}$$

$$f_{Gmax} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 Q_{tc}^2}}}$$

$$f_{Xmax} = \sqrt{1 - \frac{1}{2 Q_{tc}^2}}$$

une très forte valeur de Q (1,2). Dans ce cas,
l'objectif était de donner à cette petite
enceinte de régie, qui faisait son office dans
des camionnettes de prise de son, plus de
grave apparent. Il est préférable d'éviter les
valeurs de Q_{tc} supérieures à environ 1,2. Le
tableau 2.0 montre la relation entre Q_{tc} et la
bosse dans la courbe de réponse qui, par ail-
leurs, est plate. La fréquence de cette bosse
 f_{gmax} est en rapport avec la fréquence de
résonance de l'enceinte f_c , ainsi qu'avec f_{xmax} ,
qui est la fréquence à laquelle se produit
l'élongation maximale du cône. Les résultats
d'une étude effectuée par le professeur

Richard Small, en 1969, sur les enceintes closes américaines, anglaises et européennes, montrèrent que la plupart des enceintes à suspension acoustique se classaient en deux catégories :

1. fréquence de coupure inférieure à 50 Hz ;
 Q_{tc} inférieur à 1,1 ; volume supérieur à 40 l [3].
2. fréquence de coupure supérieure à 50 Hz ;
 Q_{tc} de 1,2 à 2 ; volume inférieur à 57 l [3].

Les enceintes de la première catégorie ont tendance à donner des graves profonds qui conviennent à la musique orchestrale ou à l'orgue, tandis que les enceintes de la deuxième catégorie produisent effectivement des graves plus puissants avec de la musique pop électrique.

2.3.1 Méthodes d'analyse du facteur Q de l'enceinte acoustique

Plusieurs facteurs, parmi lesquels les changements en amplitude des résonances, la variation de f_{xmax} ainsi que celle de f_{gmax} , décrivent le paramètre Q de l'enceinte. Si, en modifiant l'amortissement mécanique du haut-parleur, on dégrade sa réponse impulsionnelle (le grave, de sec devient résonant, traînant), on change en réalité tout un ensemble de paramètres, ce sont : la phase à la fréquence de coupure (-3 dB), la courbe d'élongation du cône, la forme et l'amplitude de la courbe de retard de groupe, la forme de la courbe d'impédance, la vitesse du cône, ainsi que la variation du volume d'air déplacé par la membrane. Les mathématiques nécessaires pour calculer ce type de paramètres ne sont pas des plus simples, mais l'utilisation d'un des nombreux logiciels d'aide à la conception d'enceintes acoustiques (CAE *Computer Aided Engineering*) rend non seulement les calculs plus rapides et plus faciles, mais donne aussi accès à des informations, dont le calcul eût été trop laborieux, voire impossible sans ordinateur.

Le logiciel LEAP 4.0 (*Loudspeaker Enclosure Analysis Program by Audio Technology, Inc*) a été sélectionné pour la simulation sur ordinateur et sera utilisé tout au long de ce livre. A la mise sous presse, LEAP 4.0 était l'outil le plus flexible et le plus puissant pour la conception professionnelle et le seul logiciel qui soit disponible sachant échanger des données provenant d'analyseurs informatisés, tel le DRA Labs MLSSA FFT ou celui de Audio Precision System 1.

Ce logiciel fut utilisé pour modéliser une série d'enceintes closes, dont le Q_{tc} varie de 0,7 à 1,5. Les résultats de ces calculs servirent à illustrer ces différentes versions. Pour la simulation, on utilisa un haut-parleur de 25 cm de diamètre (10") (Audio Concepts AC-10), dont les paramètres conviennent à une utilisation en enceinte close du type baffle infini. On ignore la résistance série, et l'enceinte fut conçue avec un remplissage de 50% de son volume interne par de la laine de verre (ce qui revient habituellement à garnir le panneau arrière ainsi que les quatre côtés de l'enceinte avec de la laine de verre de densité de 16 g/l sur une épaisseur de 8 cm). On calcula le volume des enceintes de telle manière que la résonance corresponde aux différentes valeurs de Q ; les autres données furent déduites des réseaux de courbes produites par le logiciel. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.1.

À partir des informations contenues dans le tableau 2.1 et illustrées dans la figure 2.2 par la courbe de réponse SPL et la courbe de phase acoustique, toutes deux simulées, il est évident que, quand le coefficient Q augmente, l'angle de phase à -3 dB, la pente d'atténuation à la coupure ainsi que la fréquence à -3 dB augmentent également. La "phase", quand il s'agit de haut-parleur, est une fonction de la pente de la courbe de réponse en amplitude. Quand il n'y a pas plus de variation de phase que celle qui est dictée par la courbe de réponse, on appelle ce haut-parleur un haut-parleur à variation de phase mini-

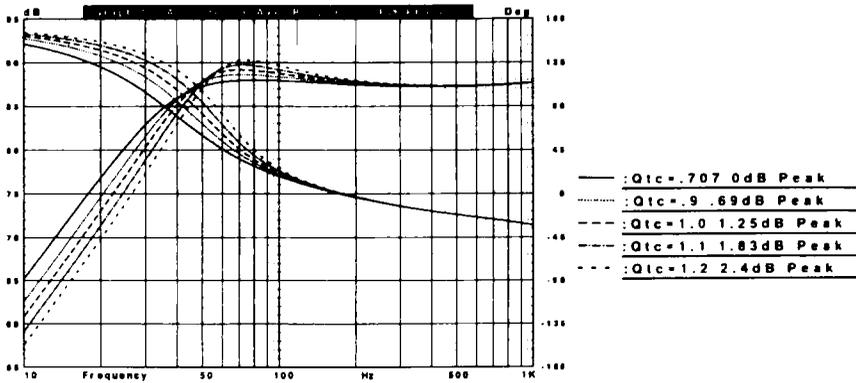


Figure 2.2

male, c'est ce qui devrait être généralement le cas. On mesure la phase en déterminant la différence de temps entre le signal d'entrée (provenant de la source) et le signal de sortie, qui prend naissance à la surface de la membrane. L'angle de phase, à une fréquence donnée, sera d'autant plus grand que le retard à cette même fréquence sera lui-même important. Le réseau de courbes de phase de la figure 2.2 accuse un changement de pente radical, qui correspond à la variation de la pente d'atténuation de la fréquence de coupure.

La figure 2.3 représente les variations des élongations du cône en fonction des différentes valeurs du coefficient Q de l'enceinte. Si, pour un haut-parleur de grave donné, le volume de l'enceinte augmente, cela entraîne une augmentation de l'excursion du cône, tout en diminuant le niveau sonore maximal en deçà duquel le haut-parleur produira un niveau de distortion acceptable. En observant ces courbes, il apparaît comme évident, qu'un meilleur amortissement procure une meilleure tenue en puissance.

Tableau 2.1

Q _{tc}	« pic dB »	angle de phase	pente* dB/oct	f ₃	V _b ft ³
0,7	0	90°	10,60	35 Hz	2,6
0,9	0,69	97°	11,95	39 Hz	1,6
1,0	1,25	100°	12,08	43 Hz	1,18
1,1	1,83	103°	12,82	46 Hz	0,92
1,2	2,41	106°	13,19	50 Hz	0,74
1,5	4	110°	13,96	64 Hz	0,42

* pente de la courbe d'atténuation vers les basses fréquences

Une autre indication d'une modification de l'amortissement (variations de Q) est donnée par la forme et le niveau absolu des courbes de retard de groupe de l'enceinte. Le retard de groupe est calculé à partir de la phase de l'ensemble haut-parleur / enceinte. Par définition, le retard de groupe représente la pente de la courbe de phase (plus précisément, la dérivée négative de la pente de la phase) [8]. Le retard de groupe décrit le délai entre les différentes parties d'une décomposition spectrale d'une onde.

Mathématiquement :

$$\text{Retard de groupe} = -(\text{phase à } f_2 - \text{phase à } f_1) / (f_2 - f_1)$$

Une courbe de retard de groupe plate indique que toutes les fréquences arrivent simultanément, tandis qu'une bosse dans une courbe

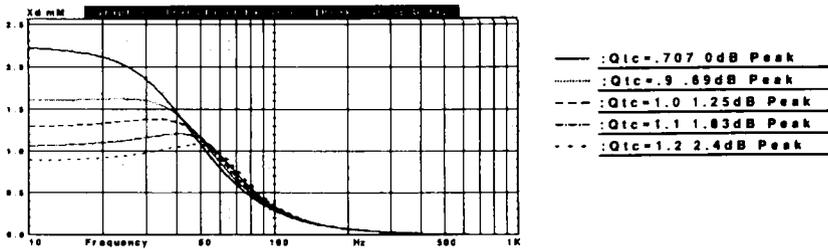


Figure 2.3

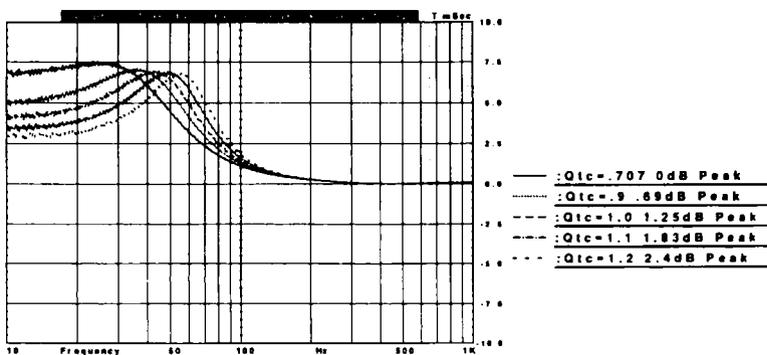


Figure 2.4

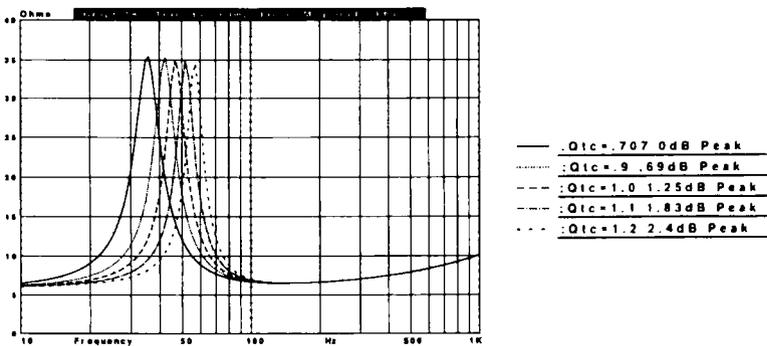


Figure 2.5

de retard de groupe indique que certaines fréquences arrivent en retard. Un amortissement de meilleure qualité est associé à l'arrivée simultanée des différentes fréquences qui constituent le signal. La figure 2.4 présente les courbes de retard de groupe en fonction des différents Q_{tc} . Remarquez que, quand Q croît, la forme de la courbe évolue sensiblement : elle est pratiquement plate pour $Q_{tc} = 0,7$ (un $Q_{tc} = 0,5$ aurait un retard de groupe plat), et elle présente un coude prononcé pour $Q_{tc} = 1,2$. La forme de la bosse de l'impédance à la fréquence de résonance varie également avec le coefficient Q . Quand Q_c croît, la bosse devient plus étroite et plus pointue. La figure 2.5 compare les différentes courbes d'impédance obtenues avec la même série de valeurs du coefficient Q . Remarquez que, quand le coefficient Q croît, la hauteur du pic d'impédance décroît.

La figure 2.6 représente les courbes de vitesse du cône et le courant de variation de volume déplacé par le cône. Les courbes de la vitesse du cône donnent la relation entre la fréquence et l'accélération du haut-parleur, elles sont exprimées en mètre / seconde. Les courbes de courant de volume sont une notion similaire, si ce n'est que la relation se fait entre la fréquence et la quantité d'air déplacé (courant), quand le haut-parleur accélère. Le courant de variation de volume se mesure en

mètre-cube/seconde. Remarquez que la forme de ces courbes, comme pour les courbes d'impédance, devient plus étroite et plus pointue quand le coefficient Q augmente. L'accélération maximale a lieu à environ la même fréquence que celle de la résonance de l'enceinte f_c .

2.4 Choix du haut-parleur de graves et construction de l'enceinte

Les haut-parleurs de graves prévus pour des enceintes closes sont caractérisés par une fréquence de résonance à l'air libre qui est basse (f_s), une membrane de masse relativement élevée et une bobine mobile longue. Cette description correspond en gros à la plupart des haut-parleurs pour enceinte close couramment disponibles dans le commerce.

Les haut-parleurs de graves pour enceintes closes se caractérisent généralement par un Q_{ts} relativement élevé et qui est supérieur à 0,3. Ceci implique l'utilisation de haut-parleurs dont les dimensions de l'aimant sont modérées. Il faut toutefois éviter des aimants trop petits (manque d'amortissement) [9,10]. R. Small suggéra une règle grossière qu'il

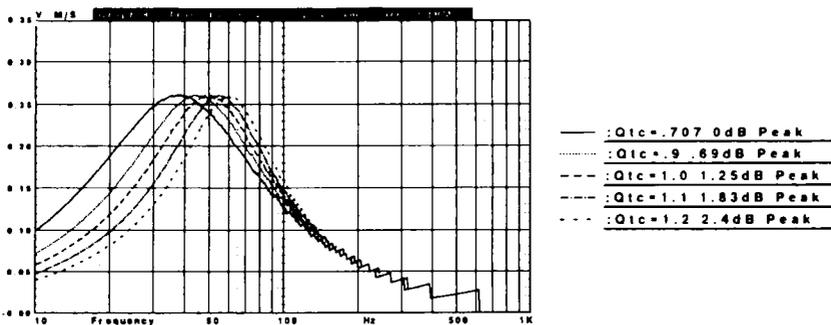


Figure 2.6

appela « produit : rendement \times bande passante » (*Efficiency Bandwith Product EBP*) [11].

L'EBP est défini ainsi :

$$EBP = \frac{\text{fréquence de résonance}}{\text{coeff. Q du HP}} = \frac{f_s}{Q_{es}}$$

Quand EBP est égal ou inférieur à 50, il est préférable d'utiliser une enceinte close, tandis que si EBP est proche de 100, on choisira une enceinte *bass-reflex* (ce critère nécessite l'emploi de paramètres fiables). Une enceinte close peut cependant être construite avec n'importe quelle valeur de Q_{tc} .

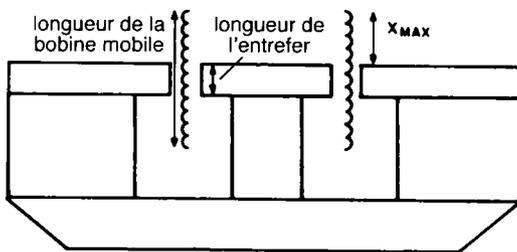


Figure 2.7 : Bobine mobile longue débordant de l'entrefer.

Un autre critère important est la longueur de bobine qui dépasse de l'entrefer. Les haut-parleurs de graves d'enceintes closes doivent supporter des élongations supérieures à celles des haut-parleurs de graves qui équipent les enceintes *bass-reflex*, c'est pourquoi ils nécessitent une bobine mobile plus longue. Pour des haut-parleurs de graves de petit diamètre (15 à 20 cm), il faudra compter 2 à 4 mm de bobinage supplémentaire, tandis que pour les plus grands diamètres (25 à 30 cm), il faudra plutôt un bobinage supplémentaire sur 5 à 8 mm. Si le fabricant ne précise pas la longueur de la partie de la bobine qui dépasse de l'entrefer x_{max} , il sera possible de le déterminer vous-même. Éclairez le haut-parleur avec une lumière puissante et essayez de regarder à travers le *spider*. La plupart des *spiders* sont assez transparents pour que l'on

puisse observer la bobine (Figure 2.7). Les ébénisteries pour enceintes closes doivent être étanches. Une bonne méthode pour s'assurer de l'étanchéité d'une enceinte, indépendamment de la technique de construction utilisée (assemblage champ contre champ), est d'appliquer sur toutes les jointures, à l'intérieur de l'enceinte, de la colle ou du joint aux silicones. Il faudra veiller à ce qu'aucune fuite d'air ne se produise au niveau du bornier de raccordement. Si vous employez un bornier du commerce en forme de cuvette, assurez-vous qu'il est muni d'un joint d'étanchéité. Sinon, utilisez un mastic aux silicones pour boucher toute fuite potentielle. Quant aux fuites d'air éventuellement causées par une suspension périphérique insuffisamment étanche ou un cache-noyau poreux, il est préférable de ne pas chercher à y remédier, car en cette matière le remède est toujours pire que le mal. Quel que soit le cas de figure, évitez les suspensions à bords plissés et non étanches, car elles ne sont pas appropriées aux enceintes closes. Les cache-noyaux poreux provoquent des fuites d'air, mais ils sont habituellement utilisés pour améliorer le refroidissement de la bobine mobile. Si on rend ces cache-noyaux étanches, on risque de détruire prématurément le haut-parleur de graves et de fausser la linéarité du coefficient Q du haut-parleur.

2.5 Détermination du volume de l'enceinte et des paramètres associés

La détermination de la dimension d'une enceinte close est une chose plutôt facile. Il faut connaître les paramètres suivants :

1. f_s : résonance à l'air libre du haut-parleur.
2. Q_{ts} : coefficient Q total du haut-parleur de graves.
3. V_{as} : volume d'air équivalent à la compliance du haut-parleur de graves.

- 4. X_{max} : longueur de la bobine mobile dépassant de l'entrefer en mm.
- 5. S_d : surface efficace de rayonnement du haut-parleur de graves en mètre carré.
- 6. V_d : volume d'air déplacé = $S_d(X_{max})$ en mètre cube.

Les paramètres 4, 5 et 6 sont parfois fournis par le fabricant. Il est préférable de recalculer les paramètres 1, 2 et 3 en utilisant la procédure décrite au chapitre 9. Il faudra non seulement tenir compte des tolérances dues à la fabrication en série, tolérances dont vous n'avez pas forcément connaissance, mais il vous faudra tenir compte également des nombreuses résistances séries, qui peuvent avoir un effet déterminant sur le résultat final. Il s'agit de la résistance de source de l'amplificateur, du câble de liaison (entre l'amplificateur et l'enceinte), et des résistances séries du filtre. La meilleure façon de choisir, parmi les nombreuses possibilités, la dimension d'une enceinte et la réponse qui en découle, est d'établir une table qui donne les différentes valeurs pour des coefficients Q_s allant de 0,5 à 1,1. Utilisez les tables 2.3 à 1.12 ou les équations qui suivent pour déterminer les valeurs de α et de f_c , fréquence de résonance du haut-parleur dans l'enceinte. La fréquence de coupure à -3 dB est précisée dans la table 2.12.

Tableau 2.2		
Enceinte close $Q_{tc} = 1,0$		
	HP1	HP2
f_s	31, Hz	38 Hz
Q_{ts}	0,45	0,54
V_{as}	2,97 ft ³	1,92 ft ³
V_b	0,75 ft ³	0,79 ft ³
f_c	69,9 Hz	70,4 Hz
V_b à 10% près, ce qui est le cas ici.		

Équations pour le calcul d'une enceinte close

$$f_c = \frac{Q_{tc} \cdot f_s}{Q_{ts}}$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2 \right)^2 + 4}}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot f_c$$

Puis en utilisant les tables de calcul :

volume de l'enceinte $V_b = \frac{V_{as}}{\alpha}$

fréquence de coupure à -3 dB $f_3 = \left(\frac{f_3}{f_c} \right) \cdot f_c$

fréq. de résonance de l'enceinte $f_c = \left(\frac{f_c}{f_s} \right) \cdot f_s$

Souvenez-vous que des systèmes à suspension acoustique peuvent fonctionner entre des valeurs de α comprises entre 3 et 10. Des valeurs de α inférieures nous entraînent dans le domaine des baffles infinis [4]. De même, pour des enceintes compactes destinées à être posées sur des rayonnages (bibliothèque), une fréquence de résonance f_c de 50 Hz ou moins est une bonne valeur pour une enceinte close de ce type [12].

2.5.1 Variations des paramètres

Q_{ts} , f_s et V_{CS}

Au sein d'une même série de haut-parleurs (fabriqués avec les mêmes membranes, bobines mobiles, suspensions, cache-noyaux, aimants, entrefers etc.), les valeurs de Q_{ts} , f_s et de V_{as} peuvent beaucoup varier. En conséquence, si sur un petit échantillonnage (en général que deux haut-parleurs pour la plupart d'entre nous), les valeurs mesurées sont assez différentes, ne soyez pas trop surpris. Bien que les paramètres individuels de cha-

Tableau 2.3

$Q_{tc} = 0,500$		
ordre 2 - amortissement critique		
Q_{ts}	α	f_c/f_s
0,1000	24,0000	5,0000
0,1200	16,3611	4,1667
0,1300	13,7929	3,8462
0,1400	11,7551	3,5714
0,1500	10,1111	3,3333
0,1600	8,7656	3,1250
0,1700	7,6505	2,9412
0,1800	6,7161	2,7778
0,1900	5,9252	2,6316
0,2000	5,2500	2,5000
0,2100	4,6689	2,3810
0,2200	4,1653	2,2727
0,2300	3,7259	2,1739
0,2400	3,3403	2,0833
0,2500	3,0000	2,0000
0,2600	2,6982	1,9231
0,2700	2,4294	1,8519
0,2800	2,1888	1,7857
0,2900	1,9727	1,7241
0,3000	1,7778	1,6667
0,3100	1,6015	1,6129
0,3200	1,4414	1,5625
0,3300	1,2957	1,5152
0,3400	1,1626	1,4706
0,3500	1,0408	1,4286
0,3600	0,9290	1,3889
0,3700	0,8262	1,3514
0,3800	0,7313	1,3158
0,3900	0,6437	1,2821
0,4000	0,5625	1,2500
0,4100	0,4872	1,2195
0,4200	0,4172	1,1905
0,4300	0,3521	1,1628
0,4400	0,2913	1,1364
0,4500	0,2346	1,1111
0,4600	0,1815	1,0870
0,4700	0,1317	1,0638
0,4800	0,0851	1,0417
0,4900	0,0412	1,0204

 suspension acoustique
 baffle infini

Tableau 2.4

$Q_{tc} = 0,577$		
Bessel d'ordre 2 (D2)		
temps de propagation constant		
Q_{ts}	α	f_c/f_s
0,1000	32,2929	5,7700
0,1100	26,5148	5,2455
0,1200	22,1201	4,8083
0,1300	18,6700	4,4385
0,1400	15,9862	4,1214
0,1500	13,3797	3,8467
0,1600	12,0050	3,6063
0,1700	10,5200	3,3941
0,1800	9,2756	3,2056
0,1900	8,2224	3,0368
0,2000	7,3232	2,8850
0,2100	6,5494	2,7476
0,2200	5,8787	2,6227
0,2300	5,2936	2,5087
0,2400	4,7800	2,4042
0,2500	4,3269	2,3080
0,2600	3,9250	2,2192
0,2700	3,5669	2,1370
0,2800	3,2465	2,0607
0,2900	2,9587	1,9897
0,3000	2,6992	1,9233
0,3100	2,4644	1,8613
0,3200	2,2513	1,8031
0,3300	2,0572	1,7485
0,3400	1,8800	1,6971
0,3500	1,7178	1,6486
0,3600	1,5689	1,6028
0,3700	1,4319	1,5595
0,3800	1,3056	1,5184
0,3900	1,1889	1,4795
0,4000	1,0808	1,4425
0,4100	0,9805	1,4073
0,4200	0,8874	1,3738
0,4300	0,8006	1,3419
0,4400	0,7197	1,3114
0,4500	0,6441	1,2822
0,4600	0,5734	1,2543
0,4700	0,5071	1,2277
0,4800	0,4450	1,2021
0,4900	0,3866	1,1776
0,5000	0,3317	1,1540
0,5100	0,2800	1,1314
0,5200	0,2312	1,1096
0,5300	0,1852	1,0887
0,5400	0,1417	1,0685
0,5500	0,1006	1,0491
0,5600	0,0616	1,0304
0,5700	0,0247	1,0123

Tableau 2.5		
$Q_{tc} = 0,707$		
Butterworth d'ordre 2 (B2)		
linéarité maximale de l'amplitude		
Q_{ts}	α	f_c/f_s
0,1500	21,2155	4,7133
0,1600	18,5254	4,4188
0,1700	16,2958	4,1588
0,1800	14,4274	3,9278
0,1900	12,8462	3,7210
0,2000	11,4962	3,5350
0,2100	10,3344	3,3667
0,2300	8,4489	3,0739
0,2400	7,6779	2,9458
0,2500	6,9976	2,8280
0,2600	6,3942	2,1792
0,2700	5,8566	2,6185
0,2800	5,3756	2,5250
0,2900	4,9435	2,4379
0,3000	4,5539	2,3567
0,3100	4,2013	2,2806
0,3200	3,8813	2,2094
0,3300	3,5900	2,1424
0,3400	3,3240	2,0794
0,3500	3,0804	2,0200
0,3600	2,8569	1,9639
0,3700	2,6512	1,9108
0,3800	2,4616	1,8605
0,3900	2,2863	1,8128
0,4000	2,1241	1,7675
0,4100	1,9735	1,7244
0,4200	1,8336	1,6833
0,4300	1,7033	1,6442
0,4400	1,5819	1,6068
0,4500	1,4684	1,5711
0,4600	1,3622	1,5370
0,4700	1,2628	1,5043
0,4800	1,1695	1,4729
0,4900	1,0818	1,4429
0,5000	0,9994	1,4140
0,5100	0,9218	1,3863
0,5200	0,8486	1,3596
0,5300	0,7795	1,3340
0,5400	0,7143	1,3093
0,5500	0,6524	1,2855
0,5600	0,5939	1,2625
0,5700	0,5385	1,2404
0,5800	0,4859	1,2190
0,5900	0,4359	1,1983
0,6000	0,3885	1,1783

Tableau 2.6		
$Q_{tc} = 0,800$		
Chebyshev d'ordre 2 (C2)		
réponse (en amplitude)		
à ondulations constantes		
Q_{ts}	α	f_c/f_s
0,2000	15,0000	4,0000
0,2100	13,5125	3,8095
0,2200	12,2231	3,6364
0,2300	11,0983	3,4783
0,2400	10,1111	3,3333
0,2500	9,2400	3,2000
0,2600	8,4675	3,0769
0,2700	7,7791	2,9630
0,2800	7,1633	2,8571
0,2900	6,6100	2,7586
0,3000	6,1111	2,6667
0,3100	5,6597	2,5806
0,3200	5,2500	2,5000
0,3300	4,8770	2,4242
0,3400	4,5363	2,3629
0,3500	4,2245	2,2857
0,3600	3,9383	2,2222
0,3700	3,6749	2,1622
0,3800	3,4321	2,1053
0,3900	3,2078	2,0513
0,4000	3,0000	2,0000
0,4100	2,8073	1,9512
0,4200	2,6281	1,9048
0,4300	2,4613	1,8605
0,4400	2,3058	1,8182
0,4500	2,1605	1,7778
0,4600	2,0246	1,7391
0,4700	1,8972	1,7021
0,4800	1,7778	1,6667
0,4900	1,6656	1,6327
0,5000	1,5600	1,6000
0,5100	1,4606	1,5686
0,5200	1,3669	1,8385
0,5300	1,2784	1,5094
0,5400	1,1948	1,4815
0,5500	1,1157	1,4545
0,5600	1,0408	1,4286
0,5700	0,9698	1,4035
0,5800	0,9025	1,3793
0,5900	0,8386	1,3559
0,6000	0,7778	1,3333

Tableau 2.7

 $Q_{tc} = 0,900$

Chebyshev d'ordre 2 (C2)
réponse (en amplitude)
à ondulations constantes

Q_{ts}	α	f_0/f_s
0,2000	19,2500	4,5000
0,2100	17,3673	4,2857
0,2200	15,7355	4,0909
0,2300	14,3119	3,9130
0,2400	13,0625	3,7500
0,2500	11,9600	3,6000
0,2600	10,9822	3,4615
0,2700	10,1111	3,3333
0,2800	9,3316	3,2143
0,2900	8,6314	3,1034
0,3000	8,0000	3,0000
0,3100	7,4287	2,9032
0,3200	6,9102	2,8125
0,3300	6,4380	2,7273
0,3400	6,0909	2,6471
0,3500	5,6122	2,5714
0,3600	5,2500	2,5000
0,3700	4,9167	2,4324
0,3800	4,6094	2,3684
0,3900	4,3254	2,3077
0,4000	4,0625	2,2500
0,4100	3,8186	2,1951
0,4200	3,5918	2,1429
0,4300	3,3807	2,0930
0,4400	3,1839	2,0455
0,4500	3,0000	2,0000
0,4600	2,8280	1,9565
0,4700	2,6668	1,9149
0,4800	2,5150	1,8750
0,4900	2,3736	1,8367
0,5000	2,2400	1,8000
0,5100	2,1142	1,7647
0,5200	1,9956	1,7308
0,5300	1,8839	1,6981
0,5400	1,7778	1,6667
0,5500	1,6777	1,6364
0,5600	1,5829	1,6071
0,5700	1,4931	1,5789
0,5800	1,4079	1,5517
0,5900	1,3269	1,5254
0,6000	1,2509	1,5000

Tableau 2.8

 $Q_{tc} = 1,000$

Chebyshev d'ordre 2 (C2)
réponse (en amplitude)
à ondulations constantes

Q_{ts}	α	f_0/f_s
0,2500	15,0000	4,0000
0,2600	13,7929	3,8462
0,2700	12,7174	3,7037
0,2800	11,7551	3,5714
0,2900	10,8906	3,4483
0,3000	10,1111	3,3333
0,3100	9,4058	3,2258
0,3200	8,7656	3,1250
0,3300	8,1827	3,0303
0,3400	7,6505	2,9412
0,3500	7,1633	2,8571
0,3600	6,7160	2,7778
0,3700	6,3046	2,7027
0,3800	5,9252	2,6316
0,3900	5,5746	2,5641
0,4000	5,2500	2,5000
0,4100	4,9488	2,4390
0,4200	4,6689	2,3810
0,4300	4,4083	2,3256
0,4400	4,1653	2,2727
0,4500	3,9383	2,2222
0,4600	3,7259	2,1739
0,4700	3,5269	2,1277
0,4800	3,3403	2,0833
0,4900	3,1649	2,0408
0,5000	3,0000	2,0000
0,5100	2,8447	1,9608
0,5200	2,6982	1,9231
0,5300	2,5600	1,8868
0,5400	2,4294	1,8519
0,5500	2,3058	1,8182
0,5600	2,1888	1,7857
0,5700	2,0779	1,7544
0,5800	1,9727	1,7241
0,5900	1,8727	1,6949
0,6000	1,7778	1,6667

 suspension acoustique
 baffle infini

Tableau 2.9

$Q_{tc} = 1,100$ Chebychev d'ordre 2 (C2) réponse (en amplitude) à ondulations constantes capacité de puissance maximale/efficacité maximale		
Q_{ts}	α	f_0/f_s
0,2500	18,3600	4,4000
0,2600	16,8994	4,2308
0,2700	15,5981	4,0741
0,2800	14,4337	3,9286
0,2900	13,3876	3,7931
0,3000	12,4444	3,6667
0,3100	11,5911	3,5484
0,3200	10,8164	3,4375
0,3300	10,1111	3,3333
0,3400	9,4671	3,2353
0,3500	8,8776	3,1429
0,3600	8,3364	3,0556
0,3700	7,8386	2,9730
0,3800	7,3795	2,8947
0,3900	6,9556	2,8205
0,4000	6,5625	2,7500
0,4100	6,1981	2,6829
0,4200	5,8594	2,6190
0,4300	5,5441	2,5581
0,4400	5,2500	2,5000
0,4500	4,9753	2,4444
0,4600	4,7183	2,3913
0,4700	4,4776	2,3404
0,4800	4,2517	2,2917
0,4900	4,0396	2,2449
0,5000	3,8400	2,2000
0,5100	3,6521	2,1569
0,5200	3,4749	2,1154
0,5300	3,3078	2,0755
0,5400	3,1495	2,0370
0,5500	3,0000	2,0000
0,5600	2,8584	1,9643
0,5700	2,7242	1,9298
0,5800	2,5969	1,8966
0,5900	2,4760	1,8644
0,6000	2,3611	1,8333

Tableau 2.10

$Q_{tc} = 1,200$ Chebychev d'ordre 2 (C2) réponse (en amplitude) à ondulations constantes		
Q_{ts}	α	f_0/f_s
0,2500	22,0400	4,8000
0,2600	20,3018	4,6154
0,2700	18,7531	4,4444
0,2800	17,3673	4,2857
0,2900	16,1225	4,1379
0,3000	15,0000	4,0000
0,3100	13,9844	3,8410
0,3200	13,0625	3,7500
0,3300	12,2231	3,6364
0,3400	11,4567	3,5294
0,3500	10,7551	3,4286
0,3600	10,1111	3,3333
0,3700	9,5186	3,2432
0,3800	8,9723	3,1579
0,3900	8,4675	3,0769
0,4000	8,0000	3,0000
0,4100	7,5663	2,9268
0,4200	7,1693	2,8571
0,4300	6,7880	2,7907
0,4400	6,4380	2,7273
0,4500	6,1111	2,6667
0,4600	5,8053	2,6087
0,4700	5,5188	2,5532
0,4800	5,2500	2,5000
0,4900	4,9975	2,4490
0,5000	4,7600	2,4000
0,5100	4,5363	2,3529
0,5200	4,3254	2,3077
0,5300	4,1264	2,2642
0,5400	3,9383	2,2222
0,5500	3,7603	2,1818
0,5600	3,5918	2,1429
0,5700	3,4321	2,1053
0,5800	3,2806	2,0690
0,5900	3,1367	2,0339
0,6000	3,0000	2,0000
0,6100	2,8699	1,9672
0,6200	2,7461	1,9355
0,6300	2,6281	1,9048
0,6400	2,5156	1,8750
0,6500	2,4083	1,8462

$Q_{tc} = 1,500$ Chebychev d'ordre 2 (C2) réponse (en amplitude) à ondulations constantes		
Q_{ts}	α	f_c/f_s
0,3000	24,0000	5,0000
0,3100	22,4131	4,8387
0,3200	20,9727	4,6875
0,3300	19,6612	4,5455
0,3400	18,4637	4,4118
0,3500	17,3673	4,2857
0,3600	16,3611	4,1667
0,3700	15,4354	4,0541
0,3800	14,5817	3,9474
0,3900	13,7929	3,8462
0,4000	13,0625	3,7500
0,4100	12,3849	3,6849
0,4200	11,7551	3,5714
0,4300	11,1687	3,4884
0,4400	10,6219	3,4091
0,4500	10,1111	3,3333
0,4600	9,6333	3,2609
0,4700	9,1856	3,1915
0,4800	8,7656	3,1250
0,4900	8,3711	3,0612
0,5000	8,0000	3,0000
0,5100	7,6505	2,9412
0,5200	7,3210	2,8846
0,5300	7,0100	2,8302
0,5400	6,7160	2,7778
0,5500	6,4380	2,7273
0,5600	6,1747	2,6786
0,5700	5,9252	2,6316
0,5800	5,6885	2,5862
0,5900	5,4637	2,5424
0,6000	5,2500	2,5000
0,6100	5,0468	2,4590
0,6200	4,8533	2,4194
0,6300	4,6689	2,3810
0,6400	4,4932	2,3438
0,6500	4,3254	2,3077
0,6600	4,1653	2,2727
0,6700	4,0123	2,2388
0,6800	3,8650	2,2059
0,6900	3,7259	2,1739
0,7000	3,5918	2,1429

fréquence de coupure à -3 dB f_3	
Q_{ts}	f_c/f_s
0,500	1,5538
0,577	1,2725
0,707	1,0000
0,800	0,8972
0,900	0,8295
1,000	0,7862
1,100	0,7567
1,200	0,7358
1,500	0,6993

que haut-parleur puissent varier d'une manière assez importante, le rapport f_s/Q_{ts} et le produit $V_{as} \cdot f_s$ sont relativement constants. De ce fait, le résultat final, qui est essentiel, tendra à être également constant. Ce qui s'observe en étudiant les données de deux haut-parleurs identiques (table 2.2, voir page 23).

2.6 Paramètres complémentaires

Trois autres paramètres sont utiles pour l'évaluation des performances futures d'une enceinte de type clos : l'efficacité caractéristique, la puissance acoustique limitée par l'élongation maximale de la bobine mobile ainsi que la puissance électrique absorbée correspondante.

2.6.1 Efficacité caractéristique (η_0)

L'efficacité caractéristique dépend en premier lieu des paramètres du haut-parleur et non de l'enceinte. Elle est exprimée fréquemment en % ou plus communément en niveau de pression sonore, *Sound Pressure Level* (SPL). Le

rendement η_0 sert surtout à comparer le niveau sonore des différents haut-parleurs qui équipent une enceinte à plusieurs voies. Il servira à calculer l'atténuation nécessaire pour les haut-parleurs du registre médium et ceux du registre aigu (l'expérience montre qu'il n'arrive que rarement, voire jamais, que dans une enceinte à plusieurs voies, il faille atténuer les haut-parleurs de graves pour aligner leur niveau sonore sur celui des autres haut-parleurs). Le rendement nominal à l'air libre se calcule par :

$$\eta_0 = \frac{K \cdot (f_s^3 \cdot V_{as})}{Q_{es}}$$

où

$$K = 9,64 \times 10^{-10} \text{ pour } V_{as} \text{ en litres}$$

$$K = 9,64 \times 10^7 \text{ pour } V_{as} \text{ en m}^3$$

$$K = 2,70 \times 10^{-8} \text{ pour } V_{as} \text{ en pied-cube}$$

Pour ces calculs, il serait souhaitable de mesurer V_{as} avec un baffle ou une enceinte de mêmes dimensions que l'enceinte acoustique étudiée. Cette formule donne, comme résultat, une valeur numérique sans unité. Pour convertir η_0 en :

$$\text{Pourcentage \%} = \eta_0 \times 100$$

$$\text{SPL, 1 W / 1 M dB} = 112 + 10 \log_{10} \eta_0$$

L'efficacité η_0 démarre avec des petites valeurs d'environ 0,35 % et atteint des valeurs plus conséquentes de l'ordre de 1,5 %. Le tableau 2.13 réunit une série de valeurs d'efficacité de modèles de haut-parleurs très connus, ce qui donne une idée de l'ordre de grandeur de ce paramètre.

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons, le calcul de η_0 pour une enceinte close sans matériau absorbant est donné par la formule :

$$\eta_0 f_c = \frac{K \cdot f_c^3 \cdot V_{as} \cdot V_b}{Q_{ec} \cdot (V_{as} + V_b)}$$

Tableau 2.13

marque	efficacité mesurée* %	η_0 SPL
Altec 411-8A	1,44	94 dB
KEF B-139	0,62	90 dB
Polydax HD-20 B 25	0,42	88 dB
Focal 8N401	0,48	89 dB
Focal 10C02	0,62	90 dB

* haut-parleur monté sur baffle plan

2.6.2 Puissance acoustique limitée par les excursions maximales de la bobine mobile (P_{ar})

La puissance maximale émise par un haut-parleur, en régime linéaire et qui ne produit pas de distorsion notable, est nommée P_{ar} . Le domaine de fonctionnement linéaire d'un haut-parleur se détermine en mesurant l'excédent de bobine mobile qui dépasse de l'entrefer (figure 2.7). Pour mesurer cette longueur nommée X_{max} , on soustrait la largeur de l'entrefer de la longueur totale de la bobine mobile, puis on divise par deux. Sans prendre de risque, on peut choisir, comme excursion maximale de la bobine mobile $X_{max} + 15\%$, une valeur un peu plus élevée et donc accompagnée d'un niveau de sortie plus conséquent, ce qui est tolérable surtout si l'on considère la médiocre sensibilité de l'oreille humaine à la distorsion dans le registre grave [13].

La détermination de la puissance P_{ar} , sous forme de puissance efficace, s'obtient par la formule :

$$P_{ar(cw)} = K_p f_3^4 V_d^2$$

où K_p liée à la puissance nominale, est une constante qui varie avec le coefficient Q_c de l'enceinte.

Q_{tc}	K_p
0,500	0,06
0,577	0,15
0,707	0,39
0,800	0,57
0,900	0,75
1,000	0,84
1,100	0,85
1,200	0,84
1,500	0,71

Le tableau 2.14 donne différents couples de valeurs pour K_p et Q_{tc} . Le volume V_d en mètre cube est défini par le volume d'air déplacé par la membrane lors de son excursion maximale. Par conséquent :

$$V_d = S_d \cdot X_{max}$$

Dans le tableau 2.15, figure la surface effective de rayonnement d'une membrane de haut-parleur en fonction de son diamètre. La surface S_d se calcule par la formule :

$$S_d = \frac{3,1416 \cdot D^2}{4}$$

où D représente le diamètre du cône, auquel on ajoute (lors de sa mesure) un tiers de la largeur de la suspension périphérique et ce, pour chaque extrémité du cône.

diamètre de châssis (pouces)	S_d (m ²)
5	0,0089
7	0,0158
8	0,0215
10	0,0330
12	0,0450
15	0,0855

Le paramètre $P_{ar(cw)}$ sera défini dans cet exposé, car il permet de comparer la puissance de sortie en fonction de différentes valeurs de Q_{tc} . Ceci provient du fait que la puissance maximale (absorbée), que supporte l'enceinte, coïncide avec $Q_{tc} = 1,1$, puis décroît en même temps que Q_{tc} . La fréquence à laquelle l'excursion de la membrane est maximale (X_{max}) est cependant inférieure à f_3 quand Q_{tc} est inférieur à 1,1. Comme la plupart des sons reproduits habituellement ont des fréquences supérieures à f_3 , il est d'usage de prendre P_{ar} à la valeur maximale. De ce fait, pour la reproduction sonore, $P_{ar(p)}$ exprimé en watts est obtenue par :

$$P_{ar} = 0,85 f_3^4 V_d^2$$

et

$$SPL \ 1 \ W \ 1 \ M = 112 + 10 \log_{10} P_{ar(p)}$$

2.6.3 Puissance électrique maximale d'entrée (P_{er})

La puissance électrique nécessaire pour produire P_{ar} est appelée P_{er} . Ce paramètre P_{er} est déterminé par :

$$P_{er} = \frac{P_{ar(cw)}}{\eta_0}$$

où :

P_{er} en watts

P_{ar} en watts

η_0 sans dimension

La puissance P_{er} peut être comparée à la puissance maximale donnée par les fabricants, cette dernière étant définie par la limite thermique. Il faut être prudent quand la puissance du haut-parleur définie par la limite thermique est inférieure à P_{er} .

2.7 Exemples de calculs

Les tableaux 2.16 et 2.17 donnent les résultats de deux haut-parleurs qui conviennent à la construction d'enceintes closes. N'oubliez pas que, lorsque vous calculez le volume total de votre enceinte, il faut le surpondérer, afin de tenir compte de tous les éléments appelés à réduire ce volume. À savoir :

- ♦ le volume pour le haut-parleur médium
- ♦ le châssis et le circuit magnétique du haut-parleur de graves
- ♦ le matériau fibreux pour l'amortissement (environ 10% du volume mesuré)

- ♦ le filtre
- ♦ les matériaux d'amortissement non fibreux, les entretoises, les feutres, etc...

Et enfin, n'oubliez pas de tenir compte de toutes les résistances séries dans le calcul de Q_{ts} (chapitre 9). Des exemples de construction d'enceintes closes ont été publiés dans *Speaker Builder : A Ceramic Speaker Enclosure* par David Weems, 6 / 88, p. 37 ; *A Small Two-Way System* par Fred Thompson, 2 / 90, p. 24 et *A Modular Three-Way Active Loudspeaker* par Fernando Ricart, 4 / 90, p. 36.

Tableau 2.16 : Haut-parleur de 20 cm (8")

Q_{ts}	Q_{es}	Q_{ms}	f_s	X_{max}	S_d (m^2)		V_d (m^3)		V_{as}	
0,45	0,53	3,0	31,5	3,5mm	$2,15 \cdot 10^{-2}$		$7,525 \cdot 10^{-5}$		2,97 ft ³	
Q_{tc}	V_b	f_3	f_c	$P_{ar(cw)}$	SPL	$P_{ar(p)}$	SPL	η_0	SPL	P_{er}
	ft ³	Hz	Hz	watts	(dB)	watts	(dB)	%	(dB)	watts
0,5	12,70	54	35	0,0033	87	0,041	98	0,47	89	0,70
0,7	2,02	50	50	0,014	94	0,028	97	0,47	89	2,98
0,8	1,38	50	56	0,020	95	0,03	97	0,47	89	4,26
0,9	0,99	52	63	0,032	97	0,035	98	0,47	89	6,81
1,0	0,75	55	70	0,044	98	0,044	98	0,47	89	9,76

Tableau 2.17 : Haut-parleur de 25 cm (10")

Q_{ts}	Q_{es}	Q_{ms}	f_s	X_{max}	S_d (m^2)		V_d (m^3)		V_{as}	
0,446	0,51	3,63	27,2	5,25mm	$3,40 \cdot 10^{-2}$		$1,79 \cdot 10^{-4}$		5,79 ft ³	
Q_{tc}	V_b	f_3	f_c	$P_{ar(cw)}$	SPL	$P_{ar(p)}$	SPL	η_0	SPL	P_{er}
	ft ³	Hz	Hz	watts	(dB)	watts	(dB)	%	(dB)	watts
0,5	24,80	54	35	0,016	94	0,23	106	0,62	90	2,58
0,7	4,10	43	43	0,038	98	0,09	102	0,62	90	6,13
0,8	2,60	44	49	0,067	100	0,10	102	0,62	90	10,81
0,9	1,88	46	55	0,103	102	0,12	103	0,62	90	16,61
1,0	1,47	48	60	0,139	103	0,13	104	0,62	90	22,42

2.7.1 Fréquence de coupure de l'enceinte à -3 dB

La plupart des amateurs pensent que, quand le volume d'une enceinte close augmente, cela entraîne une diminution de la fréquence de coupure à -3 dB. Mais cela n'est vrai que pour des Q_{tc} égaux ou supérieurs à 0,707. Pour des valeurs de Q_{tc} inférieures à 0,707, l'augmentation du volume de l'enceinte entraîne une augmentation de la fréquence de coupure [14]. Il est évident que les compromis, amenant à utiliser l'une des configurations appelée sur-amortie, auront comme conséquence une fréquence f_3 moins optimale. Le tableau 2.18 décrit la variation du rapport f_3/f_s en fonction de différents Q_{tc} d'enceintes et de différents Q_{ts} de haut-parleurs. Dans tous les cas, f_3/f_s augmente pour des valeurs de Q_{tc} inférieures à 0,707. Comme prévu, quand le volume de l'enceinte croît, les deux haut-parleurs relevant des tableaux 2.16 et 2.17 affichent, à partir d'un $Q_{tc} = 0,707$, une augmentation de la fréquence de coupure f_3 .

Tableau 2.18 : f_3/f_s en fonction de Q_{tc} et Q_{ts}

		Q_{ts}			
		0,20	0,30	0,40	0,50
Q_{tc}	1,5	5,2	3,5	2,6	2,1
	1,2	4,4	2,9	2,2	1,8
	1,1	4,2	2,8	2,1	1,7
	1,0	3,9	2,6	2,0	1,6
	0,9	3,7	2,5	1,9	1,5
	0,8	3,6	2,4	1,8	1,4
	0,71	3,5	2,4	1,8	1,4
	0,58	3,7	2,5	1,9	2,0
	0,50	3,9	2,6	2,0	-

2.7.2 Variation de la courbe de réponse avec la puissance

Bien que des paramètres comme P_{ar} et P_{er} , qui sont calculés pour des signaux puissants, donnent une certaine idée des possibilités d'excursion du cône d'un haut-parleur, ils ne décrivent pas correctement les variations de dynamique qui ont lieu, lorsque la puissance absorbée par le haut-parleur et donc la température de sa bobine mobile augmentent. L'application des méthodes de calcul de Thiele/Small à l'élaboration d'une enceinte acoustique close ou bass-reflex ne donnera des résultats en corrélation avec la réalité que pour des signaux de faible amplitude. On estime que l'enceinte sera en accord avec les formules et les tableaux de calculs pour une puissance d'entrée de 1 W, mais au-delà de cette valeur, la température de la bobine mobile augmentera avec la puissance absorbée, et les caractéristiques de l'ensemble haut-parleur/enceinte seront soumises à des changements constants dus à la dynamique.

Les haut-parleurs fonctionnent dans une gamme de température allant des 25 °C d'une salle de séjour jusqu'à environ 250 °C, température propice aux pannes et au ramollissement des colles. La puissance nominale d'un haut-parleur devrait correspondre, dans une certaine mesure, à la puissance à laquelle le haut-parleur frôle ses limites thermiques. Si un haut-parleur est donné pour 200 W, il devrait être capable de supporter une température légèrement inférieure à 250 °C pendant une certaine durée. La température varie avec la puissance d'entrée. En divisant la température maximale de 250 °C par la puissance nominale du haut-parleur, on obtient une estimation grossière de l'augmentation de la température par watt de puissance reçue (en estimant que le constructeur aura tenu compte des limites thermiques du haut-parleur lors de la détermination de sa puissance nominale, ce qui n'est pas toujours le cas). Par exemple, un haut-parleur d'une puissance nominale de 150 W verra sa tempé-

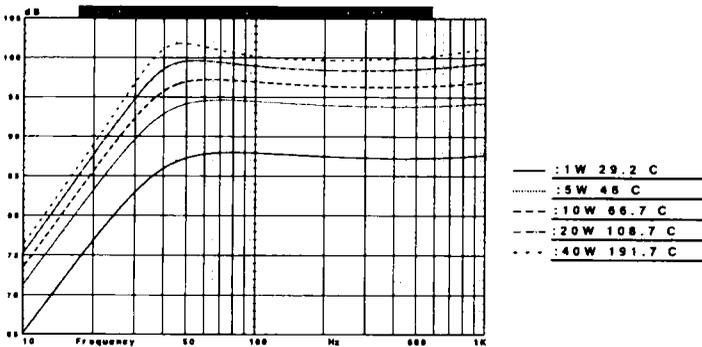


Figure 2.8

rature s'accroît de environ 1,667 °C pour chaque watt supplémentaire, qui servira à actionner le haut-parleur. Si la température de la bobine mobile augmente, sa résistance en fait autant, et, de ce fait, l'amortissement général du haut-parleur diminue. Ce phénomène est illustré dans la figure 2.8. Cette simulation par ordinateur montre les courbes de réponse SPL obtenues d'un ensemble haut-parleur/enceinte ayant un Q_{tc} calculé de 0,7 et soumis à une suite de cinq puissances croissantes à partir de 1 W (1,5, 10, 20 et 40 W). Les résultats sont résumés dans le tableau 2.19.

Une chute générale de l'amortissement, notée par Q_{tc} , est également exprimée par l'augmentation de l'angle de phase (à -3 dB) ainsi que par une pente plus forte. Des variations de l'amortissement ont des répercussions sur l'excursion des cônes (figure 2.9), sur le retard de groupe (figure 2.10), sur l'impédance (figure 2.11), et sur la vitesse du cône du transducteur (figure 2.12). Les courbes de déplacement du cône et de retard de groupe ressemblent à celles des figures 2.3 et 2.4 pour différents Q_s et différents volumes d'enceintes. Remarquez toutefois que le pic d'impédance à f_c reste à peu près stable en fréquence et en largeur, bien que le niveau global de l'impédance croisse constamment avec la température. La valeur maximale de

la vitesse de cône reste à la même fréquence, celle-ci ne varie pas quand la puissance d'entrée augmente. Il est impossible de calculer, à l'aide seulement d'une calculatrice, ces variations dues au changement de dynamique. Le plus sage est de se rapprocher des faibles valeurs du coefficient Q , quand les autres paramètres le permettent. N'oubliez pas que plusieurs réalisations commerciales couronnées de succès ont un Q_{tc} pour petits signaux aussi faible que 0,5.

2.8 Amortissement du volume interne de l'enceinte

Tous les calculs de volumes d'enceintes effectués précédemment étaient basés sur des enceintes vides ou tout au plus munies d'une couche de laine de verre de 2,5 cm d'épaisseur pour amortir les ondes stationnaires. C'est très bien ainsi, car une enceinte calculée correctement ne nécessitera pas de corrections supplémentaires pour atteindre ses objectifs. En réalité, utilisés à bon escient, les matériaux amortissants sont un moyen très efficace pour modifier la réponse de l'enceinte et pour atteindre ainsi certaines valeurs de Q ou de volume impossibles à approcher autrement.

- : 1W 29.2 C
- ⋯ : 5W 46 C
- - - : 10W 66.7 C
- · - · : 20W 108.7 C
- - - - : 40W 191.7 C

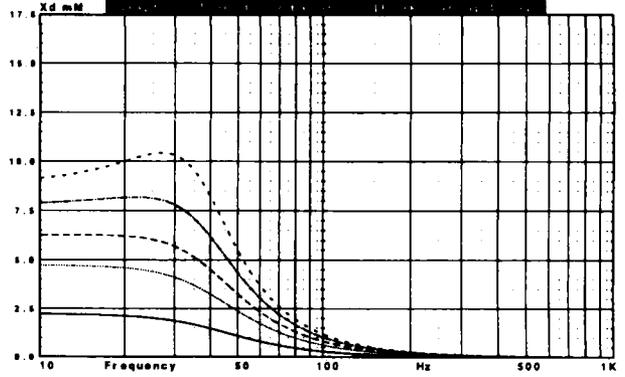


Figure 2.9

- : 1W 29.2 C
- ⋯ : 5W 46 C
- - - : 10W 66.7 C
- · - · : 20W 108.7 C
- - - - : 40W 191.7 C

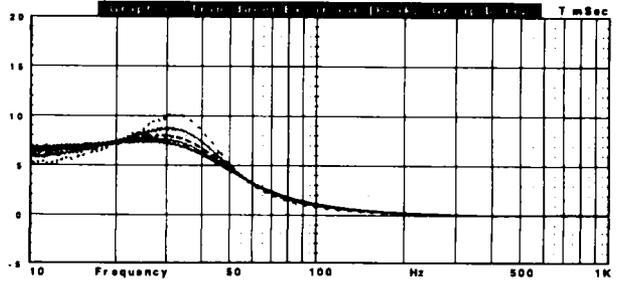


Figure 2.10

- : 1W 29.2 C
- ⋯ : 5W 46 C
- - - : 10W 66.7 C
- · - · : 20W 108.7 C
- - - - : 40W 191.7 C

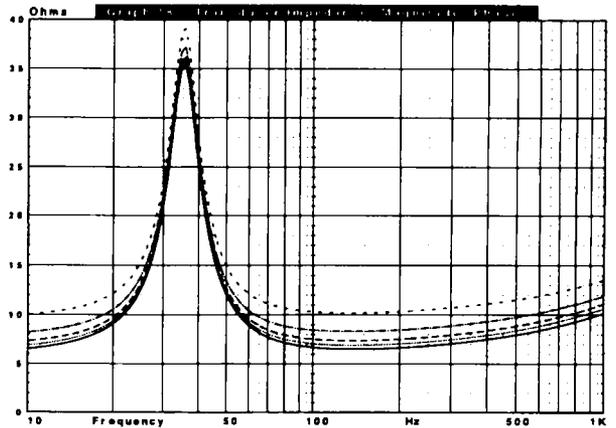


Figure 2.11

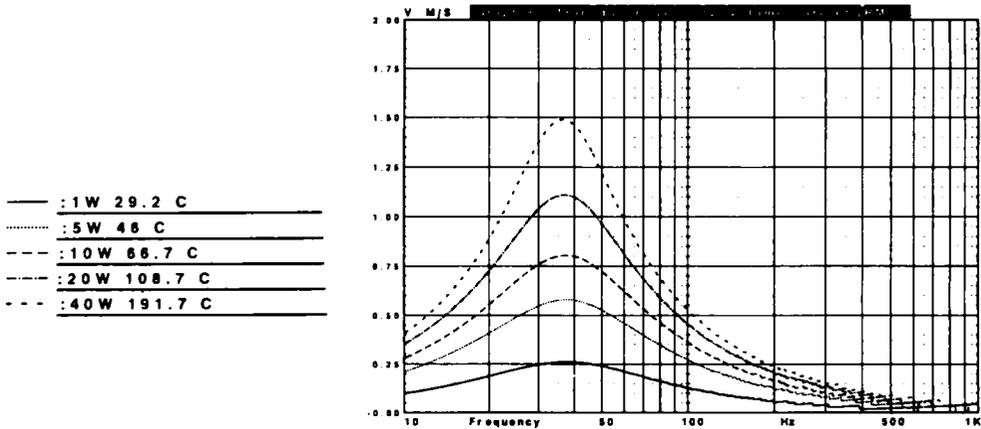


Figure 2.12

L'amortissement du volume interne de l'enceinte procure non seulement une réduction sensible des réflexions internes, qui peuvent produire de fortes colorations du son [15], mais agit également sur les paramètres suivants :

A. Augmentation de la compliance.

L'utilisation de matériaux de basse densité et de forte isolation thermique (laine de verre, Dacron, longues fibres de laine naturelle) augmentera la compliance acoustique (C_{ab}) de l'enceinte. Ceci revient à accroître le volume de l'enceinte jusqu'à un montant théorique de 40%. En pratique, on obtient facilement des augmentations de volume équivalent allant de 15% à 25%.

B. Augmentation de l'efficacité.

L'efficacité peut être augmentée jusqu'à 15% par le choix judicieux de l'amortissement interne en sélectionnant le type de matériau, la quantité, et sa disposition à l'intérieur de l'enceinte.

C. Variation de la masse.

Le matériau amortissant a la propriété de faire changer la masse totale en mouvement dans le système. Ce phénomène est généralement mis en relation avec la restriction du flux d'air en circulation immédiatement derrière le haut-parleur. L'accroissement de la

masse effective provoquera une chute du rendement, mais cette variation ne sera pas aussi forte que si elle était provoquée par un changement de la compliance. On dispose de deux techniques pour contrecarrer en partie cette indésirable chute de rendement. La première, utilisée dans les enceintes Advent, consiste à placer une entretoise directement à l'arrière du haut-parleur de graves pour empêcher que du matériau amortissant ne s'y accumule (dans ce cas, il s'agissait de mousse synthétique). La deuxième consiste à placer, sans le comprimer, un absorbant de faible densité juste derrière le châssis du haut-parleur de graves, pour créer une sorte de tampon entre le haut-parleur et l'autre matériau amortissant, qui est de plus forte densité [16].

D. Perte de rendement due à l'amortissement interne (par des matériaux absorbants).

Les pertes par friction peuvent être conséquentes, si le remplissage avec du matériau absorbant est assez dense et si celui-ci est proche de l'arrière du châssis du haut-parleur de graves.

Plusieurs auteurs ont précisé la quantité de matériau absorbant nécessaire pour modifier l'action (le régime) pneumatique de l'enceinte et pour passer ainsi d'un mode adiabatique à un mode isothermique (ce que décrivent les paramètres mentionnés ci-dessus) [17,18,19].

Tableau 2.19 : Modifications de la réponse dynamique du couple haut-parleur/enceinte ($Q_{tc} = 0,7$) pour différents niveaux de puissance d'entrée (en fonction de la puissance)

tension	puissance	temp.	angle de phase -3dB	pen­te dB / oct.	Q_{tc}	f_3 Hz
2,83	1	29,2°	90°	10,60	0,7	35
6,35	5	46°	93°	10,87	0,8	34
8,95	10	66,7°	95°	11,18	0,85	34
12,68	20	108,7°	100°	11,74	1,0	32
17,89	40	191,7°	106°	12,71	1,2	31

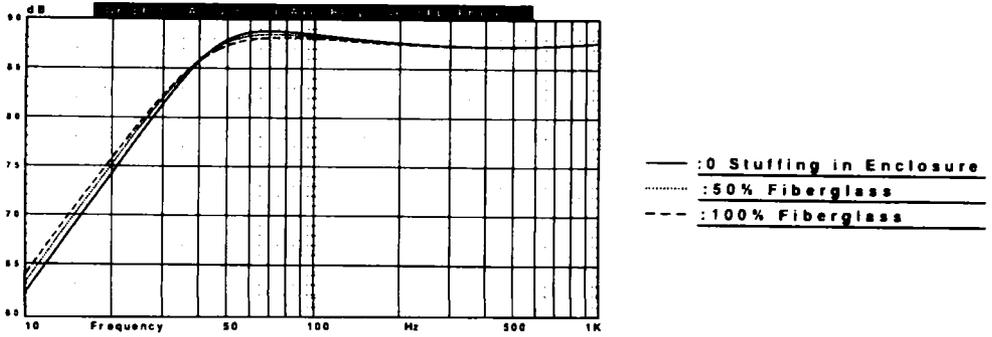


Figure 2.13

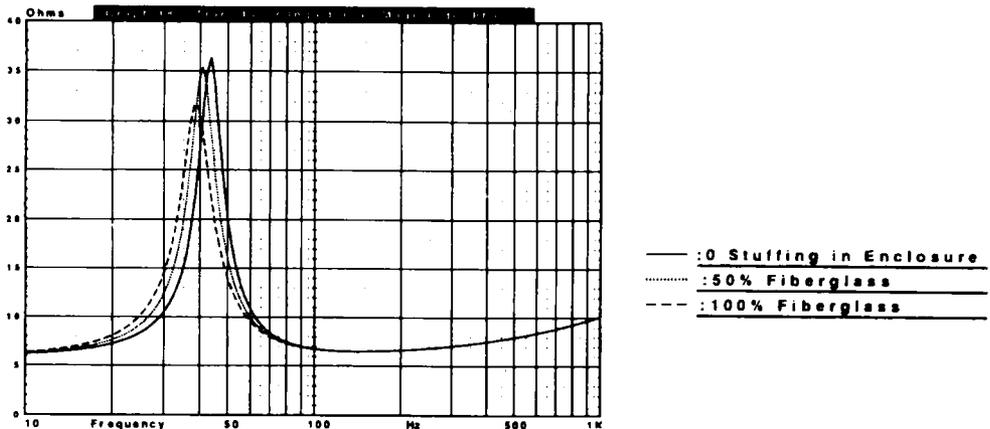


Figure 2.14

%	f_3	phase	Q_{tc}
0	39,94	98,92°	1,19
50	38,31	96,42°	0,89
100	37,37	93,38°	0,73

Ces données ne sont pas suffisamment bien définies pour l'utilisation spécifique du matériau absorbant le plus commun qui est la laine de verre. Toutefois, la simulation par ordinateur peut facilement montrer les effets absorbants de la laine de verre. On utilisa pour cette simulation les paramètres du même haut-parleur de 25 cm que dans la simulation précédente. Un petit volume d'enceinte, 50 l, fut choisi, car il donne un Q_{tc} assez élevé qui met bien en évidence l'effet du matériau absorbant. La simulation fut programmée pour effectuer les calculs de la réponse de l'enceinte de 50 l en fonction de différentes quantités de laine de verre. Les quantités de laine de verre du tableau 2.20 concernent une laine domestique de type R19 ayant une densité standard de 16 kg/m^3 . La densité de ce type de matériau est difficile à calculer, car il se comprime ou se dilate facilement lors des manipulations. La densité de 16 kg/m^3 fut mesurée, la laine de verre étant déroulée et séparée de son support papier, ce qui lui donnait une épaisseur d'environ 7,6 cm. Le tableau montre les variations de f_3 et de l'angle de phase pour différents remplissages. La figure 2.13 illustre le changement de l'amplitude de la courbe de réponse et la figure 2.14 décrit les variations de l'impédance de l'enceinte. On constate qu'une chute de la fréquence de coupure f_3 est accompagnée par une diminution de Q_{tc} . Le degré de variation ne sera pas exactement le même pour chaque enceinte et dépendra, dans une certaine mesure, du rapport de compliance entre l'enceinte et le haut-parleur.

2.8.1 Détermination de l'amortissement du volume interne de l'enceinte

La meilleure manière de déterminer les effets de l'amortissement par des matériaux absorbants sur un prototype est d'en garnir l'intérieur de l'enceinte, puis de mesurer la variation du coefficient Q_c à ses bornes. Utilisez la même procédure que pour la mesure du coefficient Q à l'air libre, décrite dans le chapitre 9. Une méthode présentée par Small et Margolis utilise le calcul manuel et évalue, avant la construction de l'enceinte, les effets induits par le remplissage à 100% avec une laine de verre de densité faible à moyenne [20]. La méthode 1 détermine les variations de Q_{tc} en gardant le volume constant, tandis que la méthode 2 donne la variation de volume tout en conservant Q_{tc} constant.

Méthode 1

Nouveau Q_{tc} , si le volume de l'enceinte est le même :

Équations

Exemple

(HP du tableau 2.17)

$$V_{ab} = 1,2 \cdot V_b \quad V_{ab} = 4,92$$

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_{ab}} \quad \alpha = 1,177$$

$$L = \sqrt{\alpha + 1} \quad L = 1,475$$

$$Q_{tc}' = L \cdot Q_{ts} \quad Q_{tc}' = 0,658$$

$$Q_{tc} = \left(\frac{1}{Q_{tc}'} + 0,2 \right)^{-1} \quad Q_{tc} = 0,58$$

Méthode 2

Nouveau volume de l'enceinte, V_b , si Q_{tc} reste le même :

Équations**Exemple**

(HP 25 cm (10") du tableau 2.17)

$$Q_{tc} = \left(\frac{1}{Q_{tc}'} - 0,2 \right)^{-1} \quad Q_{tc}' = 1,098$$

$$L = \frac{Q_{tc}'}{Q_{ts}} \quad L = 2,461$$

$$\alpha = L^2 - 1 \quad \alpha = 5,056$$

$$V_{ab} = \frac{V_{as}}{\alpha} \quad V_{ab} = 1,145$$

$$V_b = \frac{V_{ab}}{1,2} \quad V_b = 0,95 \text{ ft}^3$$

2.8.2 Comparaison empirique de matériaux amortissants pour enceintes acoustiques

La méthode de calcul exposée ci-dessus donne une idée grossière du compromis à faire entre la valeur du coefficient Q et le volume de l'enceinte. Le résultat final peut toutefois varier considérablement. Non seulement les mesures de f_3 et de Q_{tc} changent en fonction de la densité et de la distribution dans l'enceinte, mais d'autres matériaux que la laine de verre, tels le Dacron ou la mousse acoustique, ou la combinaison de ces derniers, peuvent être utilisés pour modifier la réponse des enceintes.

Depuis des années, amateurs et professionnels utilisent une grande variété de matériaux de remplissage pour façonner la réponse de l'enceinte. Et chacun de revendiquer le meilleur choix à partir des performances subjectives. Comme les simulations par ordinateur et les méthodes avec calculette sont limitées à

des modèles standards de laine de verre, les informations qui suivent serviront de guide pour déterminer les effets de différentes combinaisons de matériaux absorbants.

Les méthodes de mesure furent relativement simples, même si les résultats demandent à être commentés. Six matériaux furent utilisés : le Dacron, l'Acousta-Stuff (matériau à fibres bouclées, analogue au Dacron, qui est réputé posséder les mêmes qualités sonores que celles de longues fibres de laine naturelle, et qui est disponible chez Mahogany Sound), la laine de verre d'une densité de 16 kg/m^3 et la mousse acoustique (fournie par Audio Concepts, elle est similaire à plusieurs autres mousses alvéolées disponibles sur le marché). Ces matériaux furent testés avec un taux de remplissage de 50% (tapissant les parois internes de l'enceinte) et de 100% dans l'enceinte acoustique servant aux mesures. Six autres combinaisons à 50% - 50% furent mesurées (le premier matériau cité servant à couvrir les parois internes, le deuxième à compléter le volume interne pour atteindre les 100%) :

- 1 - laine de verre 32 kg/m^3 et 16 kg/m^3
- 2 - laine de verre 32 kg/m^3 et Acousta Stuff
- 3 - laine de verre 64 kg/m^3 et 16 kg/m^3
- 4 - laine de verre 64 kg/m^3 et Acousta Stuff
- 5 - mousse acoustique et 16 kg/m^3
- 6 - mousse acoustique et Acousta Stuff

Les matériaux furent placés dans une enceinte parallélépipédique standard d'un volume de 27 l et constituée de panneaux de particules de 19 mm. L'enceinte était étanche et le haut-parleur de 21 cm (8") fut monté avec un joint en mousse à alvéoles fermées. Chaque matériau, quantité ou combinaison, fut placé, l'un après l'autre dans l'enceinte et deux mesures furent effectuées pour chaque catégorie.

La première mesure, effectuée par un analyseur *Audio Precision System 1*, donna une courbe d'impédance à partir d'un balayage sinus. Le *System 1* fut utilisé pour la mesure

Tableau 2.21 : Comparaison de divers matériaux amortisseurs pour enceintes closes

	Z_0	f_c	Q_{mc}	Q_c	Q_{tc}	f_3
enceinte vide	38,96	84,54	7,74	1,45	1,22	61,91
50%						
Dacron	34,46	83,21	6,51	1,41	1,16	61,86
Acousta-Stuf	33,53	82,08	6,23	1,40	1,14	61,36
1 lb/ft ³ laine de verre	27,77	79,51	4,93	1,40	1,09	60,37
2 lb/ft ³ laine de verre	30,27	78,75	5,42	1,39	1,10	59,59
4 lb/ft ³ laine de verre	31,52	82,06	5,78	1,40	1,13	61,52
mousse acoustique	33,44	80,23	6,19	1,40	1,14	59,98
100%						
Dacron	29,77	81,77	5,39	1,40	1,11	61,68
Acousta-Stuf	23,82	80,09	3,97	1,38	1,02	62,42
1 lb/ft ³ laine de verre	19,87	76,79	3,20	1,44	0,99	60,64
2 lb/ft ³ laine de verre	15,80	79,37	2,27	1,44	0,88	66,71
4 lb/ft ³ laine de verre	16,71	78,66	2,37	1,42	0,89	65,67
mousse acoustique	17,35	75,91	2,44	1,35	0,87	64,26
mélange 50%/50%						
2 lb/1 lb laine de verre	14,78	78,12	1,80	1,28	0,75	73,91
2 lb FG/Acousta-Stuf	20,97	77,17	3,22	1,35	0,95	62,17
4 lb/1 lb laine de verre	14,67	75,86	1,79	1,29	0,75	71,76
4 lb FG/Acousta-Stuf	21,96	79,11	3,49	1,33	0,96	63,40
mousse/1 lb laine de verre	18,11	73,55	2,58	1,33	0,88	61,83

de l'impédance via le rapport de deux tensions, méthode qui met en œuvre la résistance de source du générateur de l'appareil, qui a été réglée à 600 Ω . Les fichiers des données sous forme ASCII furent transférés dans le logiciel LEAP 4.0, qui les convertit en valeurs d'impédance réelles (l'impédance calculée avec une grande résistance série est proche, mais pas exactement identique à la fonction d'impédance du haut-parleur). Puis les données furent chargées dans le module de mesure automatique des paramètres de haut-parleur LEAP pour calculer les para-

mètres Q_{tc} de l'enceinte. La deuxième mesure utilisa l'analyseur DRA Labs MLSSA FFT avec un microphone de mesure de précision ACO Pacific 7012, pour établir une courbe de réponse en champ proche. L'analyseur MLSSA fut réglé pour une acquisition de 2048 points avec une bande passante de 20 kHz. Une analyse de Fourier (FFT) de 2048 points fut effectuée à partir d'une réponse impulsionnelle et les résultats édités sur imprimante. Les données furent transférées du MLSSA vers le logiciel LEAP, afin de les imprimer sous *PostScript*. Pour faciliter la

comparaison, chaque courbe de mesure d'enceinte, qui correspond à chaque catégorie de remplissage, fut accompagnée de la mesure de la même enceinte vide de tout matériau. Les résultats de ces mesures sont résumés dans le tableau 2.21. Ce tableau se divise en trois sections : remplissage à 50%, remplissage à 100% et remplissage à 100% avec des combinaisons à 50%–50%. La hauteur du pic de l'impédance Z_0 chute de $38,96 \Omega$ pour une enceinte vide à $14,67 \Omega$, pour la combinaison de laine de verre de $64/16 \text{ kg/m}^3$. La fréquence de résonance de l'enceinte f_0 descend de $84,54 \text{ Hz}$ dans l'enceinte vide à $75,16 \text{ Hz}$, dans la combinaison $64/16 \text{ kg/m}^3$. Le coefficient de surtension mécanique Q , nommé Q_{mc} , varie beaucoup, de $7,74$, pour une enceinte vide, à $1,79$ avec la combinaison $64/16 \text{ kg/m}^3$. Le coefficient de surtension électrique Q , nommé Q_{ec} , varie très peu pour les chargements homogènes à 50% et 100%, mais montre quelques variations dans les combinaisons de différents matériaux de remplissage. Le coefficient Q_{tc} varie de $1,22$, sans remplissage, à une valeur peu élevée de $0,75$, pour les deux combinaisons de laine de verre à 50%–50%. La fréquence de coupure à -3 dB , f_3 dépend à la fois du coefficient Q_c et de la fréquence de résonance f_0 de l'enceinte, mais semble indépendante des autres facteurs.

Il semble que l'ancien usage de remplir l'enceinte à 100% avec de la laine de verre standard du type R19 reste toujours un choix valable, si on désire un amortissement modéré et une fréquence f_3 faible. La combinaison mousse/laine de verre, qui est également intéressante, est caractérisée par un amortissement modéré et une fréquence de coupure à -3 dB moins élevée.

Les couples de graphes des figures 2.15 à 2.33 montrent, pour les différentes combinaisons exposées au tableau 2.21, à la fois la courbe d'impédance et la courbe de réponse en fréquence associées, mesurées en champ proche (à environ 15 cm du cache-noyau). Pour faciliter leur lecture, les courbes d'impédance des figures 2.24 à 2.28, 2.30 et 2.32 ont une échelle de 20Ω . Toutes les autres courbes d'impédance ont une échelle de 40Ω . Le tracé de la courbe de réponse en fréquence effectué par le MLSSA est en trait plein pour l'enceinte remplie de matériau d'amortissement, et en pointillé pour l'enceinte vide.

Les modifications des réponses observées pour différents taux de remplissage sont intéressantes. Dans le groupe des 50%, on constate que le Dacron ne semble pas très efficace pour supprimer les ondes stationnaires. Pour avoir plus d'efficacité, il faudrait bourrer l'enceinte avec ce matériau pour en augmen-

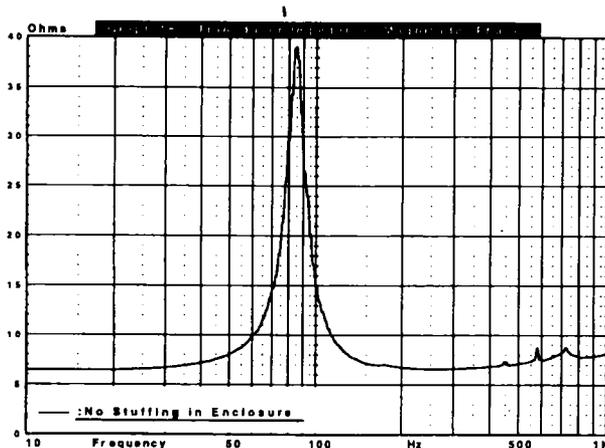


Figure 2.15A

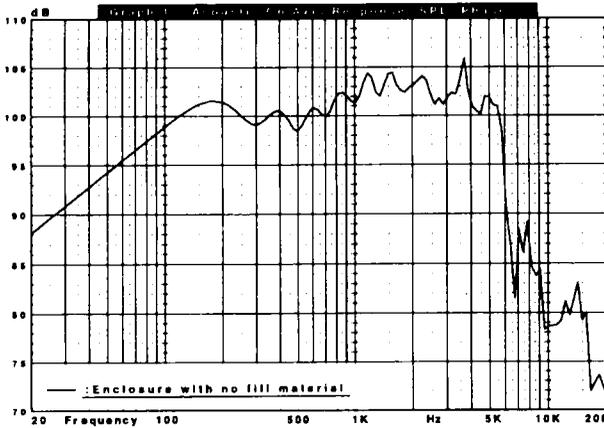


Figure 2.15B

ter la densité. La comparaison entre le groupe des 50% de remplissage et le groupe des 100 % montre clairement que l'accroissement des matériaux améliore la suppression des ondes stationnaires. Le groupe des combinaisons de remplissage de 50%–50% fonctionne d'une manière similaire à celui des 100%. Remplir une enceinte à 100% pour supprimer les ondes stationnaires internes est tout aussi important que de faire varier les deux paramètres f_3 et Q_{tc} .

2.9 Enceintes closes à plusieurs haut-parleurs de graves

Comparée aux modèles à haut-parleur de graves unique, la mise en œuvre de deux ou de plusieurs haut-parleurs de graves dans une enceinte spécialisée dans les fréquences basses procure certains avantages.

Les trois configurations fondamentales sont : standard, *push-pull* (c'est-à-dire *pousse-tire*), et jumelés.

2.9.1 Configuration standard

Elle est définie par le montage de deux haut-parleurs de graves identiques ou plus, aussi près que possible l'un de l'autre dans la même enceinte. Pour une combinaison de deux haut-parleurs de graves, on obtient :

- A. La fréquence de résonance F_s pour deux haut-parleurs sera la même que pour un seul haut-parleur.
- B. Le coefficient de surtension Q_{ts} sera le même que pour un seul haut-parleur.
- C. Le volume V_{as} (et le volume associé de l'enceinte V_b) sera le double de celui d'un haut-parleur unique.
- D. L'impédance résultante sera la moitié de celle d'un haut-parleur unique pour un montage en parallèle et le double pour un montage en série.
- E. La sensibilité augmentera de 3 dB pour un montage en parallèle comparé à un haut-parleur unique, mais elle diminuera de 3 dB pour un montage série.
- F. L'excursion de la membrane sera la moitié de celle d'un seul haut-parleur.

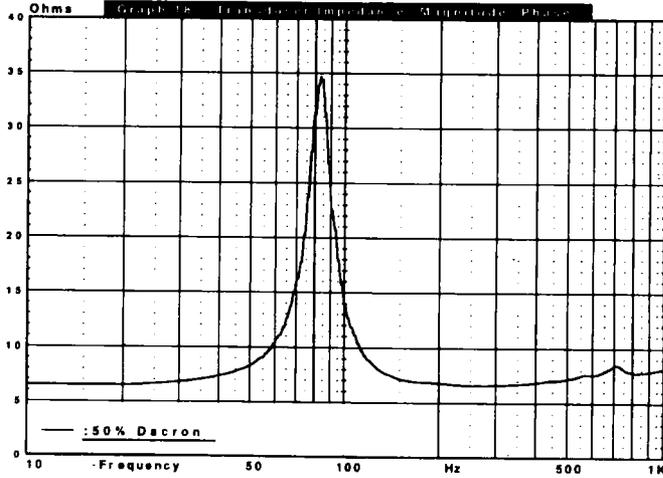


Figure 16A

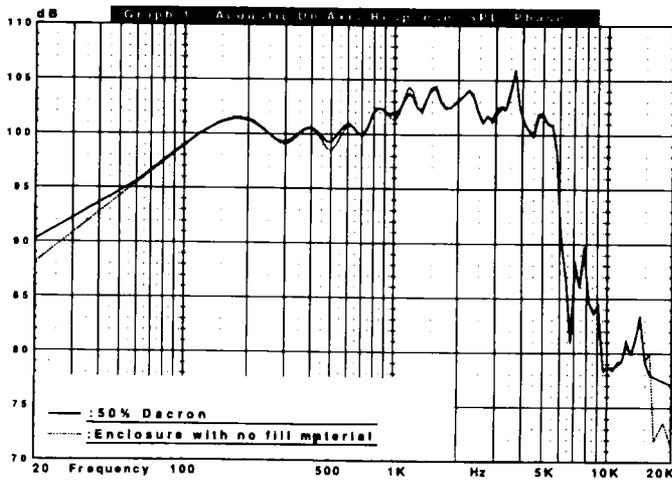


Figure 2.16B

Le montage de quatre haut-parleurs de graves identiques dans une configuration série-parallèle procure un gain en efficacité de 6 dB par rapport à un seul haut-parleur de graves, le même gain que dans une combinaison de deux haut-parleurs de graves. L'efficacité acoustique augmente de 3 dB, quand la surface des membranes est le double de celle de la combinaison de deux haut-parleurs de graves, mais le fait de mettre en série deux paires de haut-parleurs de

graves (montés eux-mêmes en parallèle) fait chuter le gain de 3 dB, d'où résulte un gain nul, si on se réfère au niveau de sortie d'une configuration à deux haut-parleurs.

La comparaison des simulations sur ordinateur pour un niveau de 1 W SPL entre des enceintes équipées d'un seul haut-parleur de graves, de deux haut-parleurs de graves et de quatre haut-parleurs de graves est montrée en figure 2.34. Remarquez la modification de

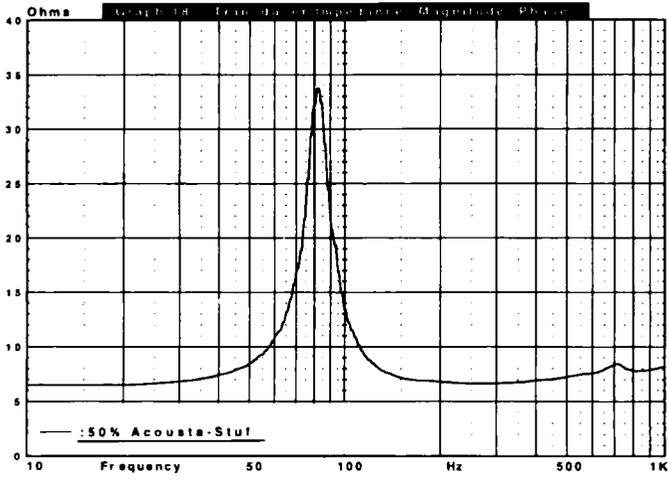


Figure 2.17A

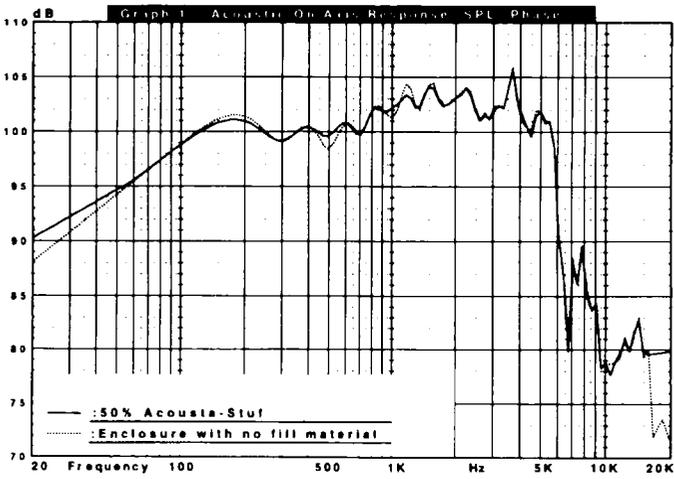


Figure 2.17B

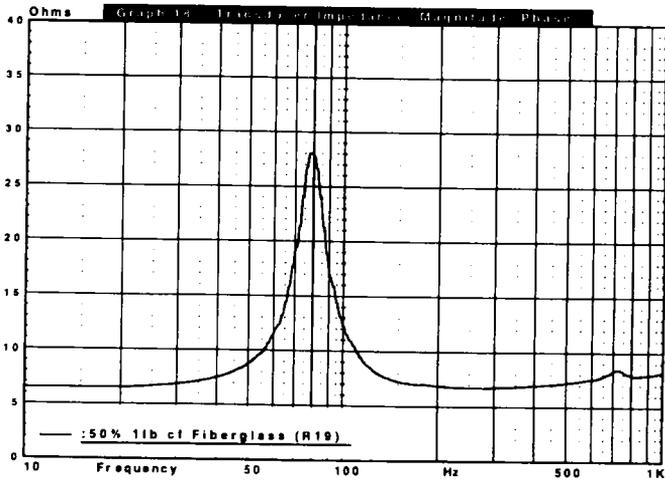


Figure 2.18A

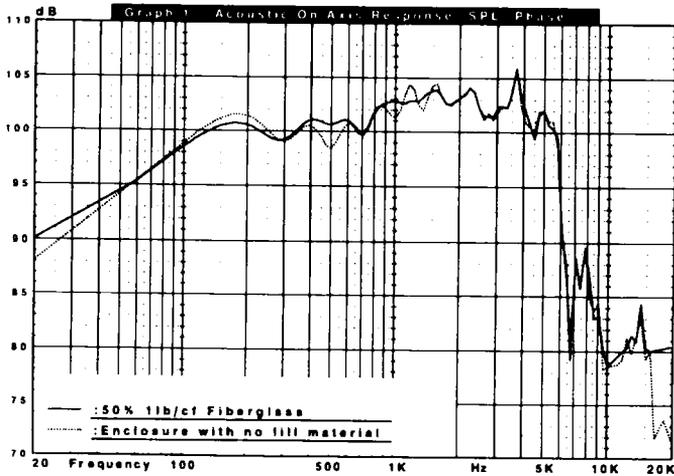


Figure 2.18B

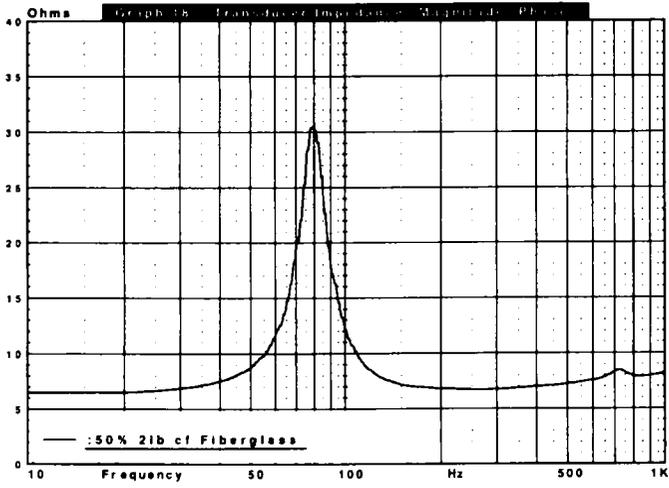


Figure 2.19A

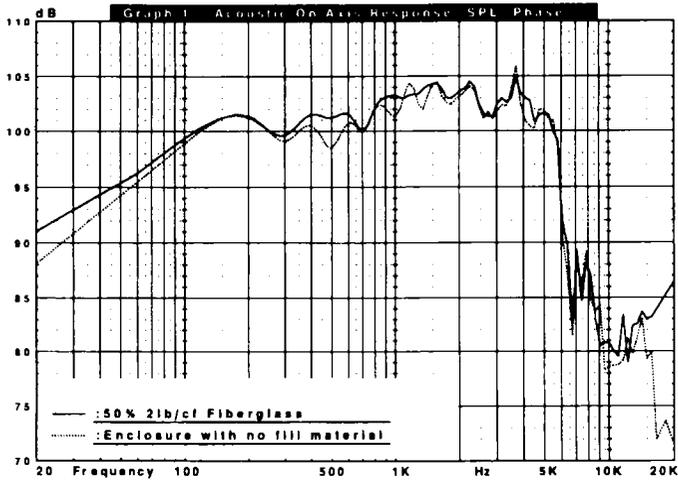


Figure 2.19B

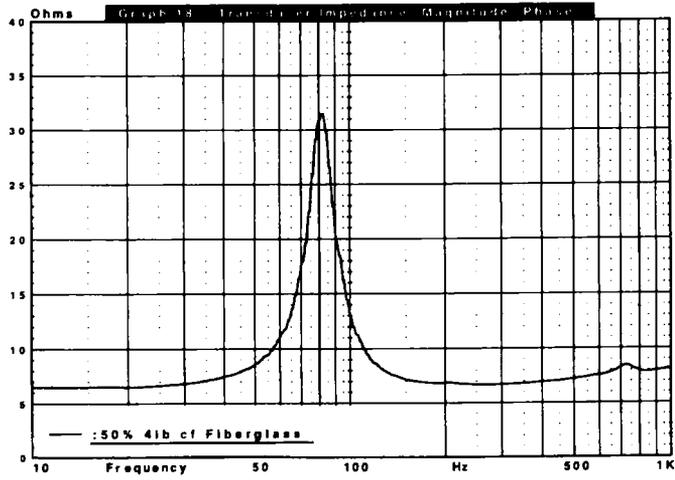


Figure 2.20A

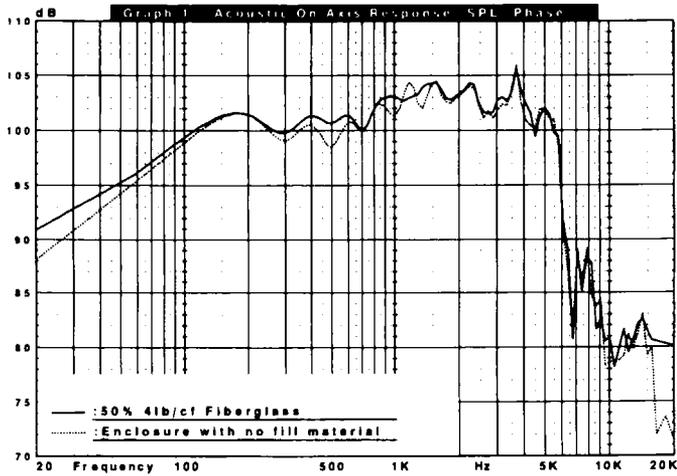


Figure 2.20B

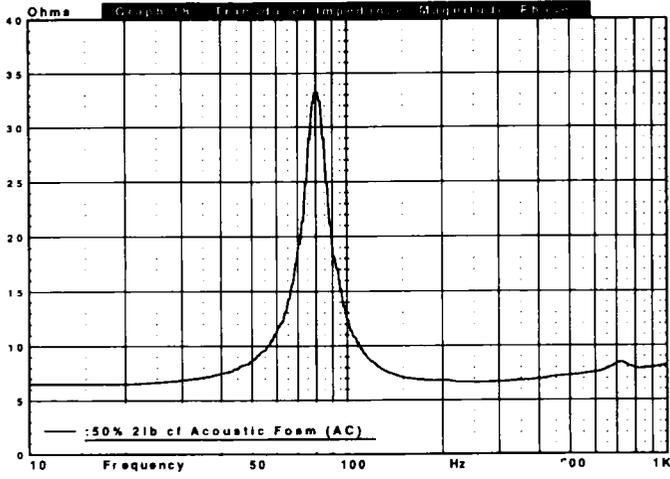


Figure 2.21A

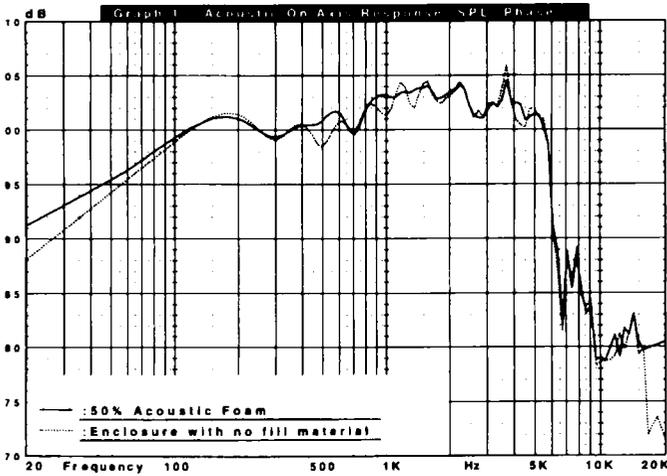


Figure 2.21B

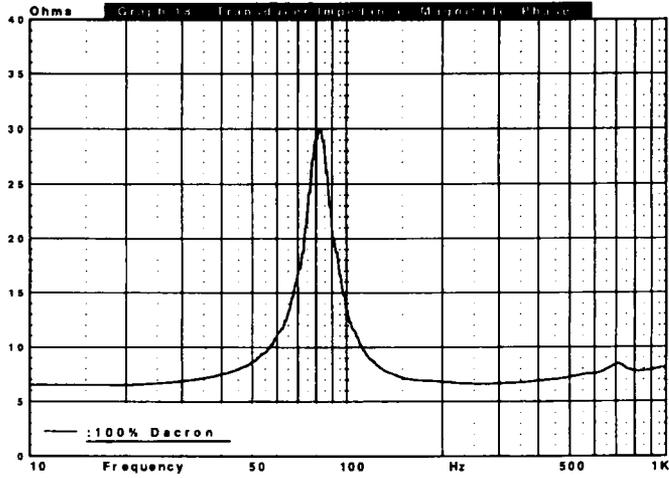


Figure 2.22A

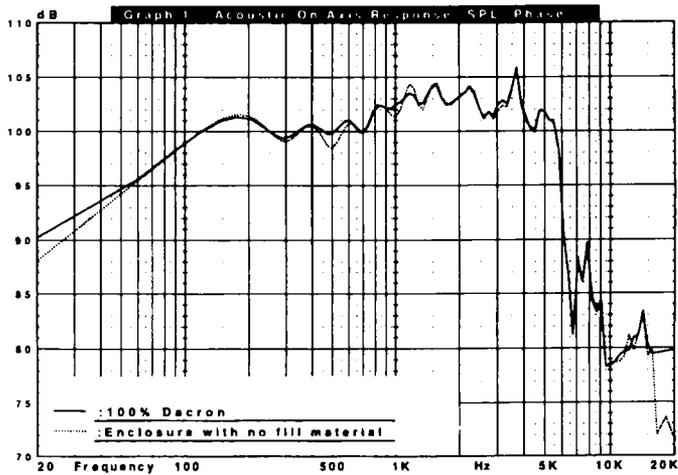


Figure 2.22B

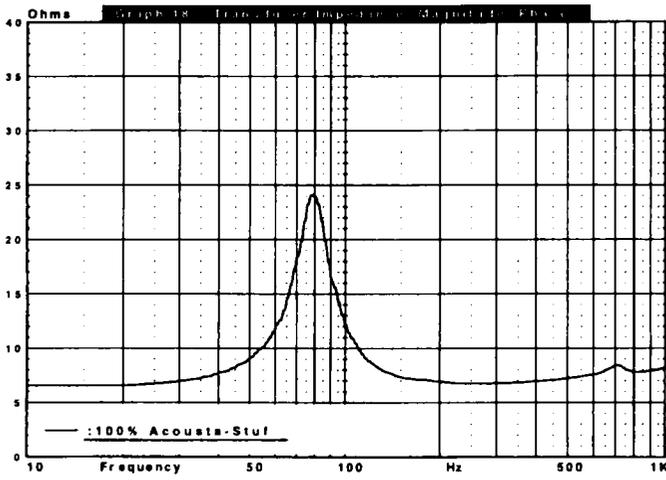


Figure 2.23A

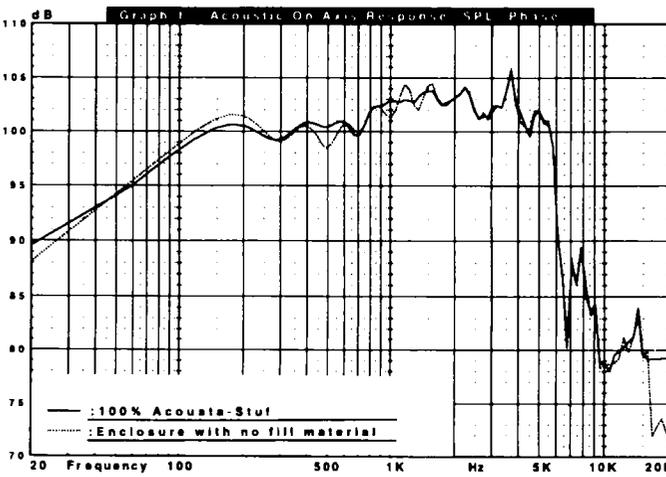


Figure 2.23B

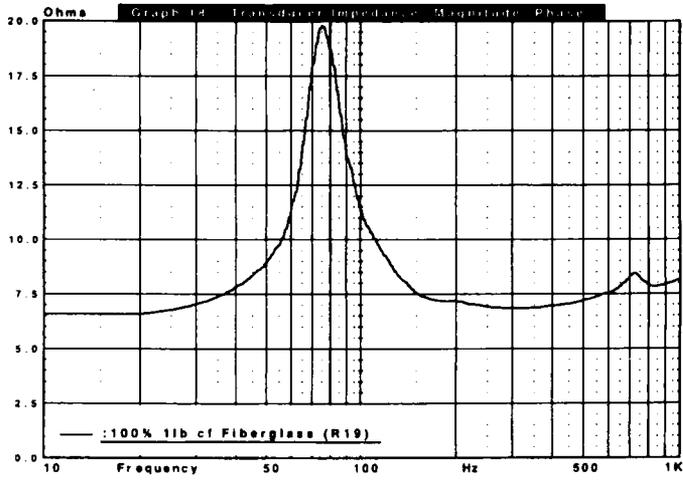


Figure 2.24A

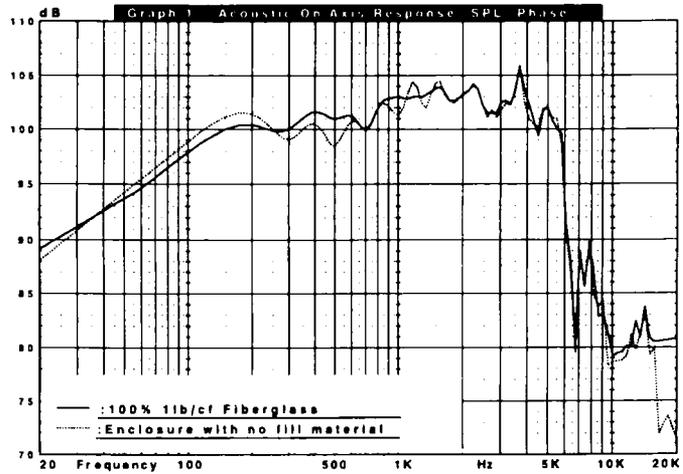


Figure 2.24B

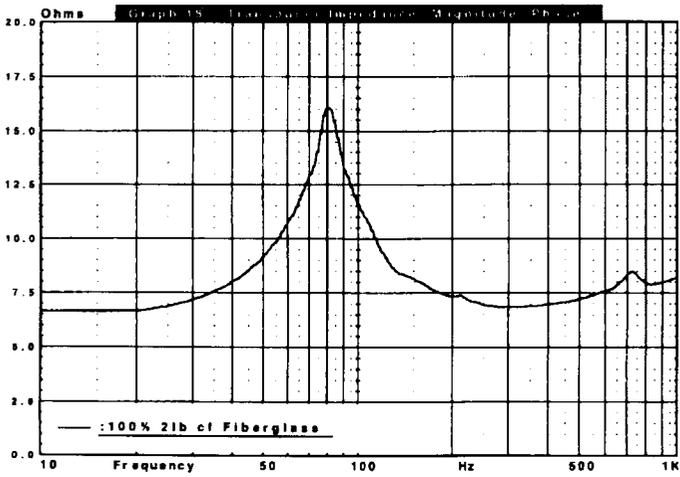


Figure 2.25A

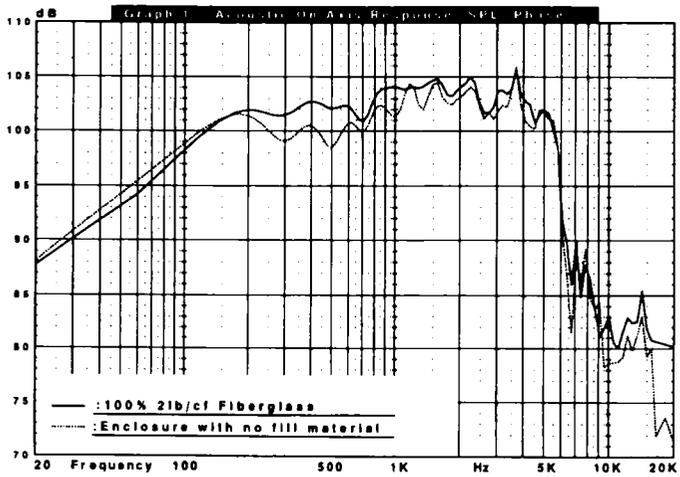


Figure 2.25B

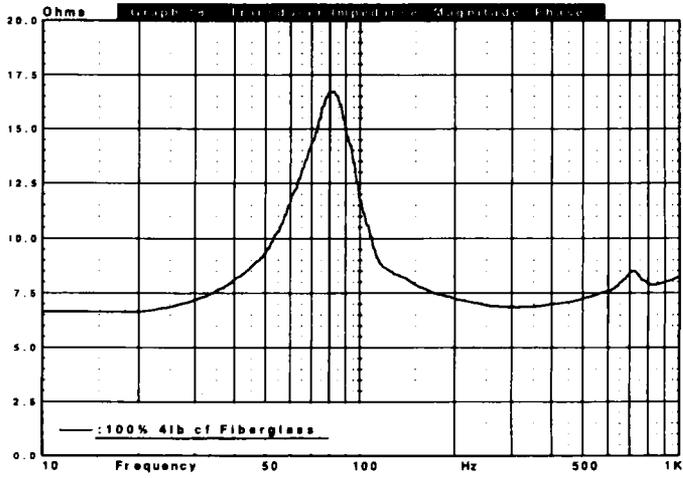


Figure 2.26A

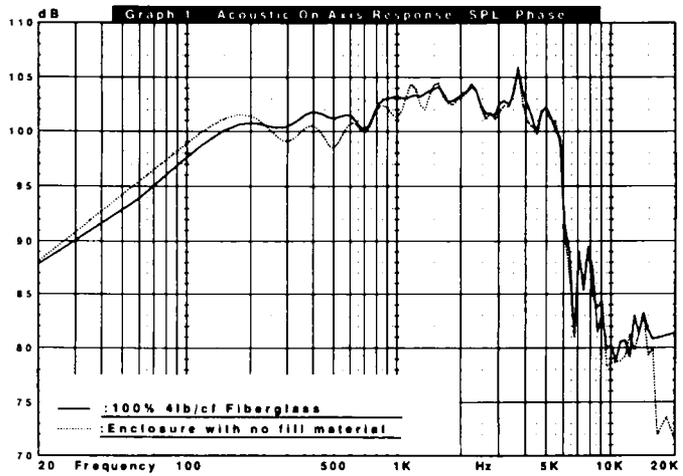


Figure 2.26B

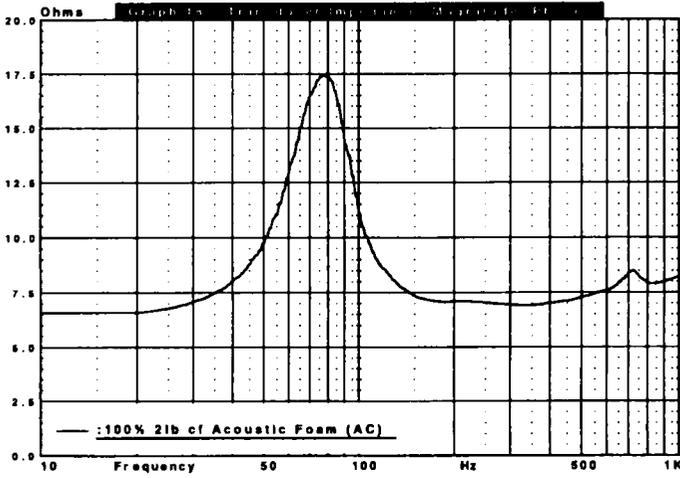


Figure 2.27A

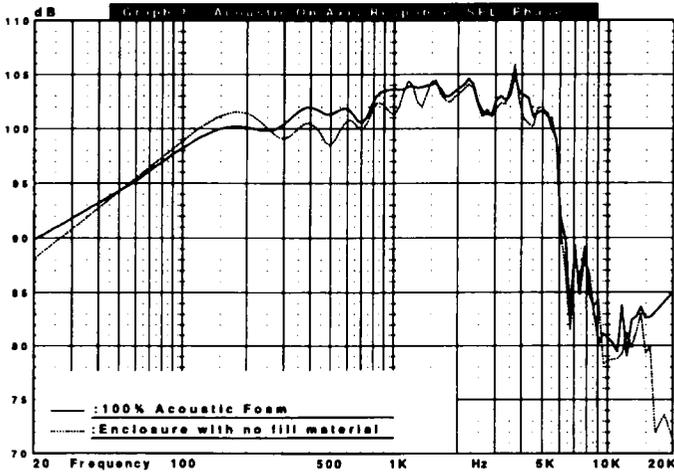


Figure 2.27B

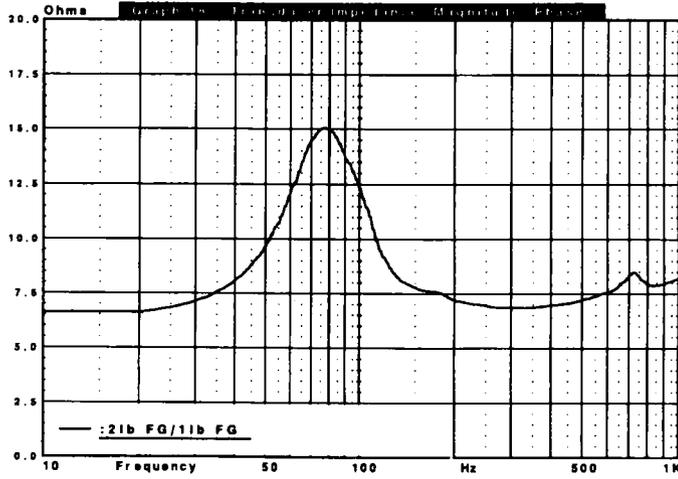


Figure 2.28A

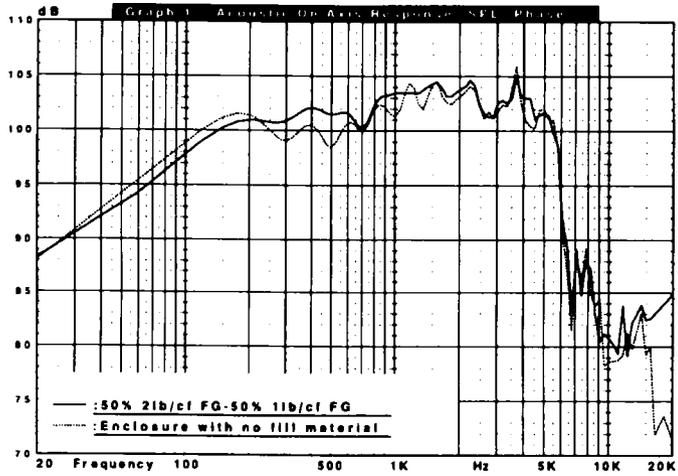


Figure 2.28B

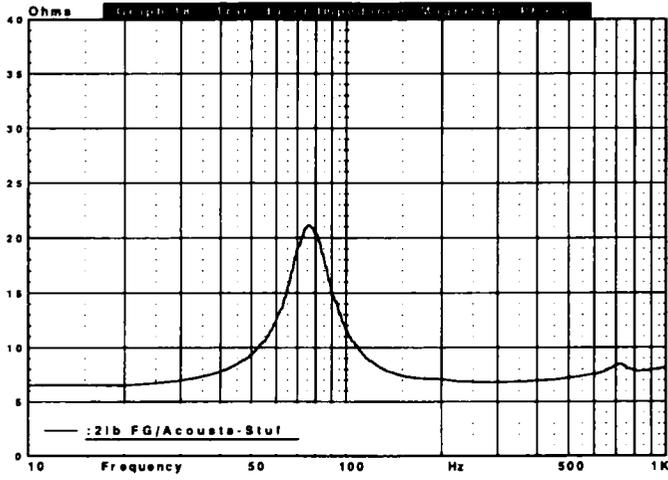


Figure 2.29A

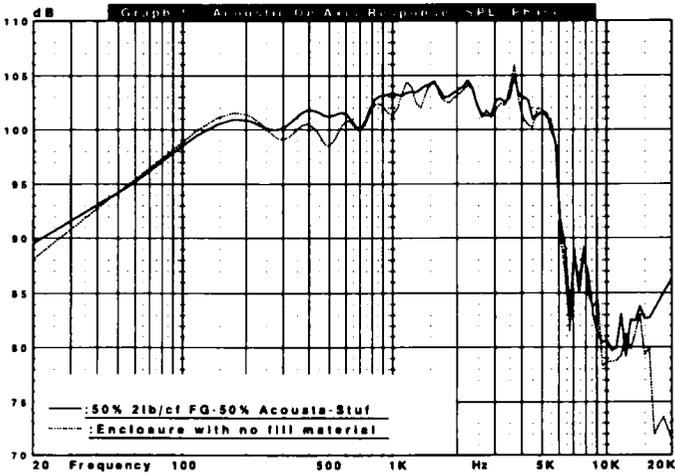


Figure 2.29B

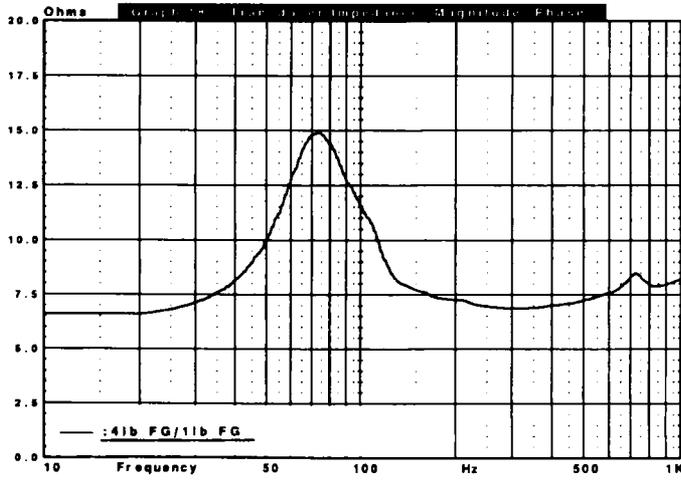


Figure 2.30A

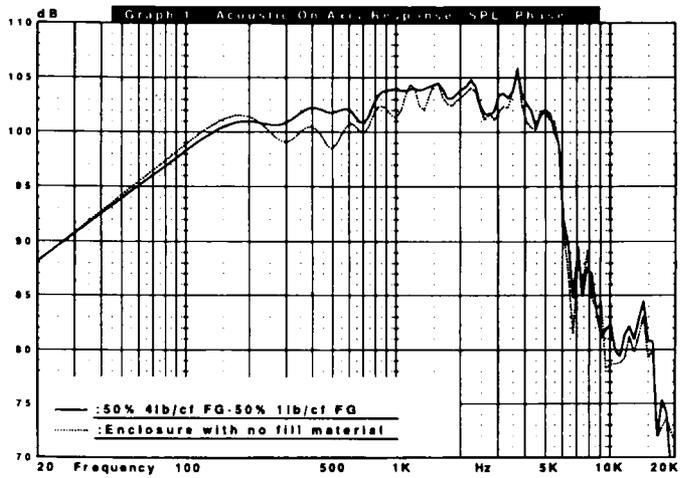


Figure 2.30B

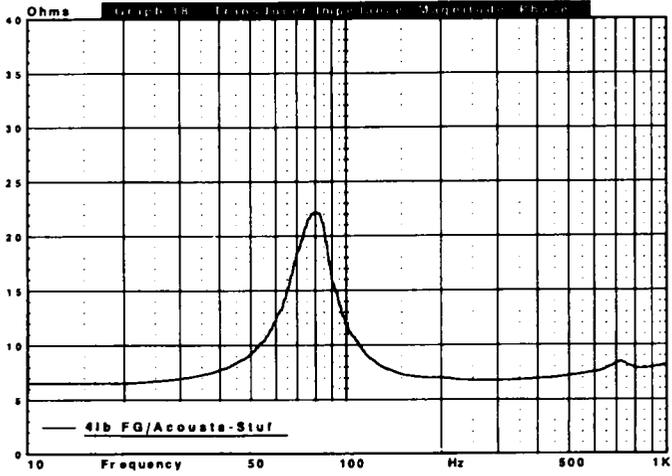


Figure 2.31A

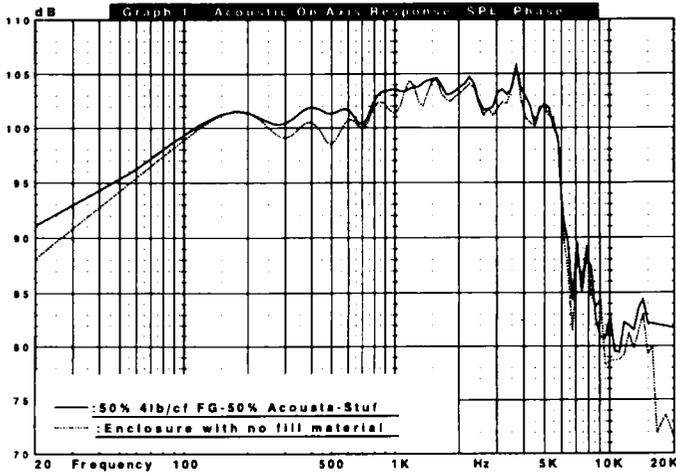


Figure 2.31B

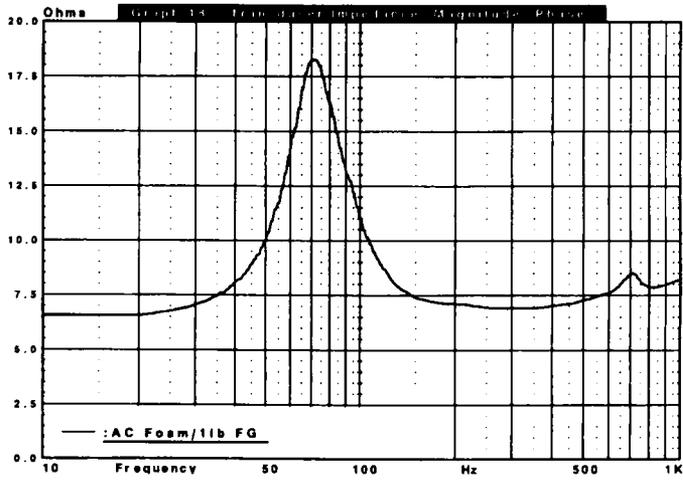


Figure 2.32A

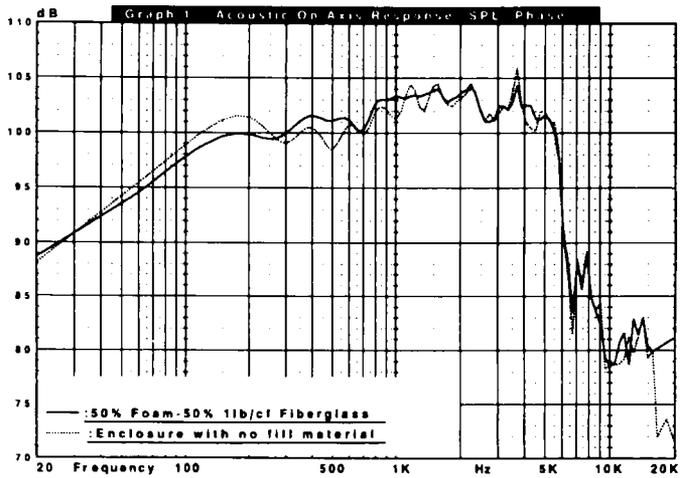


Figure 2.32B

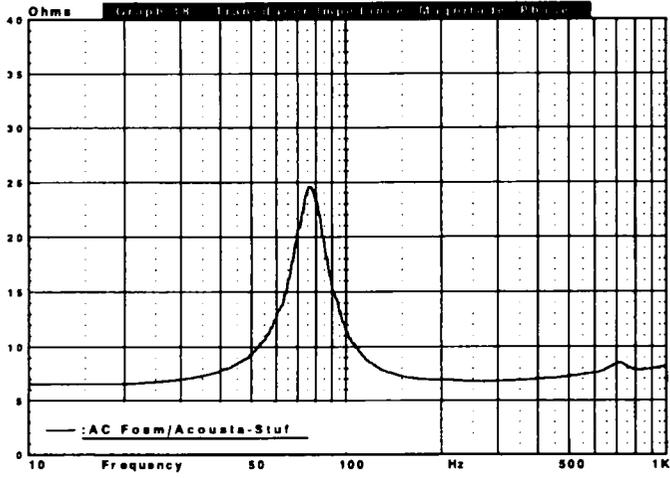


Figure 2.33A

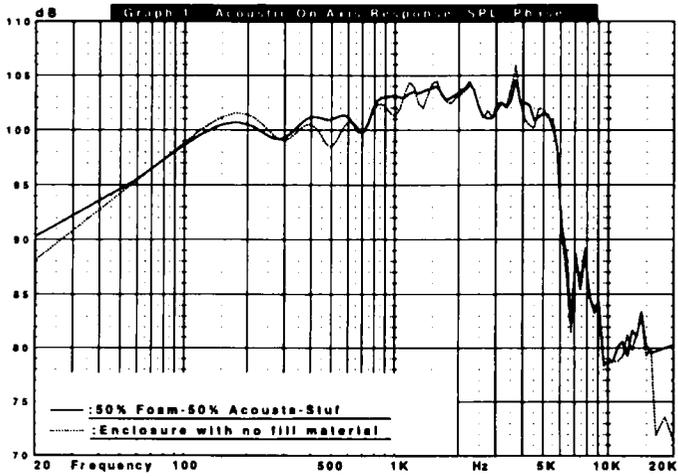


Figure 2.33B

la courbe de réponse dans la région des fréquences du registre médium pour la configuration à quatre haut-parleurs de graves, par rapport à celle à deux haut-parleurs de graves. Quand plusieurs haut-parleurs sont étroitement groupés, des changements de l'impédance de rayonnement résultante peuvent provoquer de sérieuses modifications de la courbe de réponse vers les fréquences médianes. Comme prévu, le gain pour les montages à deux ou quatre haut-parleurs de graves est de 6 dB par rapport au haut-parleur unique. En observant, dans la figure 2.35, les courbes d'excursion de cône et de retard de groupe, on constate que, pour l'application de la même tension, l'excursion des configurations à un et à deux haut-parleurs est approximativement le double de celle à quatre haut-parleurs, alors que le retard de propagation de groupe est identique pour les trois configurations. La courbe d'impédance illustrée dans la figure 2.36 montre que l'impédance de

l'enceinte équipée de deux haut-parleurs de graves est de moitié inférieure à celle de l'enceinte à un seul haut-parleur. L'enceinte équipée d'un seul haut-parleur de graves et celle équipée de quatre haut-parleurs de graves ont des courbes d'impédance similaires, si ce n'est que le modèle à quatre haut-parleurs de graves a un pic plus faible dû à l'interaction entre les quatre haut-parleurs, qui provoque une différence dans l'impédance de rayonnement. L'avantage d'une configuration à haut-parleurs multiples est surtout perceptible à de fortes puissances. La figure 2.37 compare, pour un même niveau de 100 dB SPL, les courbes de réponse obtenues pour les trois configurations précédentes, à savoir avec un, deux et quatre haut-parleurs. La tension appliquée à l'entrée de l'enceinte pour obtenir ce niveau de pression sonore SPL est de 12,68 V pour le montage à un haut-parleur et de 6,35 V pour les montages à deux et quatre haut-parleurs. Une chute générale de niveau d'environ 1,5 dB sur

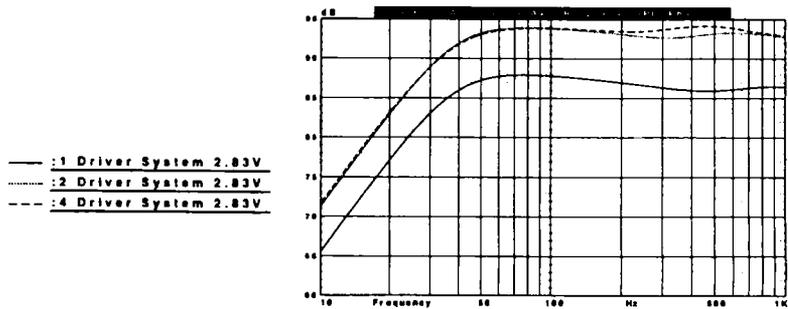


Figure 2.34

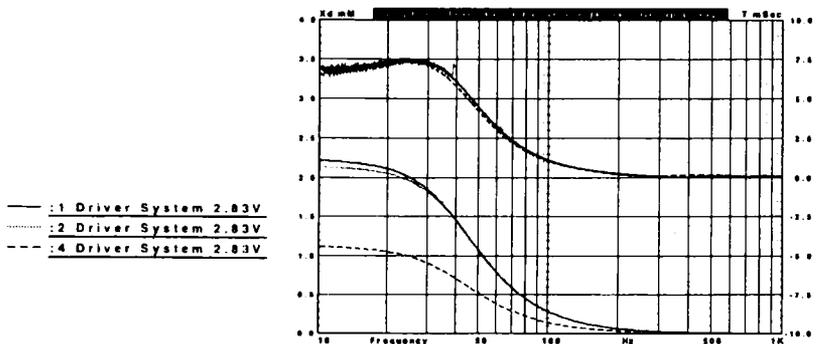


Figure 2.35

toute la bande de fréquences médianes, ainsi qu'une pente d'atténuation à la fréquence de coupure plus forte sont constatées sur le montage à un seul haut-parleur de graves. Cela provient d'une augmentation de la résistance de la bobine mobile due à l'élévation de sa température. Pour toutes les trois configurations et pour un niveau de 2,83 V 1 W, l'angle de phase à -3 dB était de 90°, mais, à 100 dB SPL, le montage à un seul haut-parleur affiche 100° (ce qui correspond à un coefficient Q de 1,0), l'enceinte à deux haut-parleurs 93°,

et pas de changement d'angle de phase pour le montage à quatre haut-parleurs (toujours 90°). L'étude des courbes de retard de groupe présentées dans la figure 2.38 fait apparaître que celles concernant les montages à deux et à quatre haut-parleurs ont la même forme, alors que celles qui correspondent au haut-parleur unique ont un coude nettement plus accentué. Les courbes d'excursion de membranes n'apportent pas de surprise. Le déplacement de membrane du modèle à deux haut-parleurs de graves est la moitié de celui

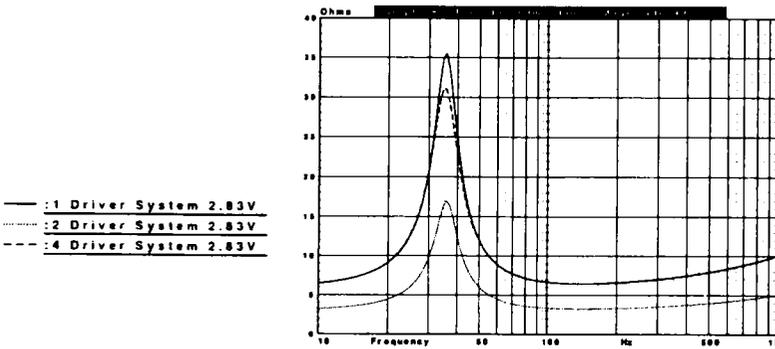


Figure 2.36

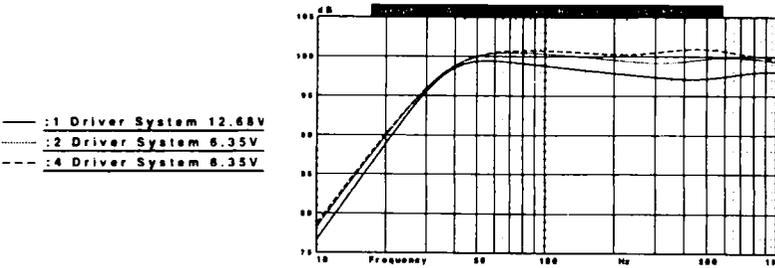


Figure 2.37

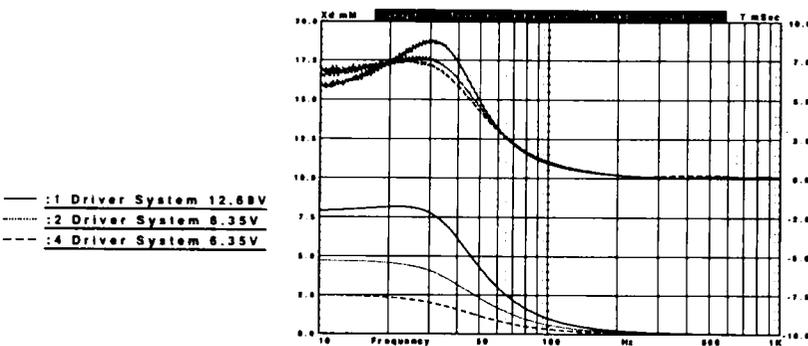


Figure 2.38

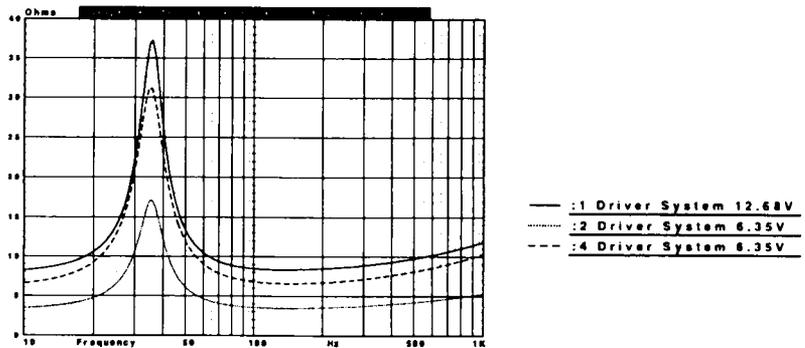
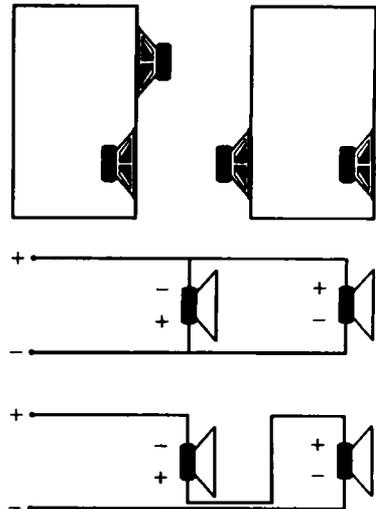


Figure 2.39

à un haut-parleur de graves, et le déplacement du modèle à quatre haut-parleurs de graves est la moitié de celui à deux haut-parleurs de graves. La courbe d'impédance de la figure 2.39 montre que l'élévation de la température de la bobine mobile dans l'enceinte à un seul haut-parleur a provoqué une augmentation de la résistance sur toute la bande de fréquences d'environ $1,7 \Omega$.

2.9.2 Configuration en *push-pull*

Cette configuration correspond au montage dos à dos ou face à face de deux haut-parleurs alimentés en opposition de phase (figure 2.40). Ce type de configuration élimine les distorsions d'harmoniques impaires et réduit fortement les défauts de linéarité des haut-parleurs. Toutes les caractéristiques, citées ci-dessus (de A à E), s'appliquent aux montages *push-pull*. La configuration *push-pull* des haut-parleurs de graves s'applique aussi bien aux montages *bass-reflex*, aux montages avec haut-parleur passif, avec haut-parleurs passifs couplés et aux montages en enceinte close. Deux articles, qui traitent de la construction d'enceintes appliquant ce principe, ont été publiés dans *Speaker Builder : Tenth Row Center* par H. Hirsch, 2/84, p. 11 et dans *The Curvilinear Vertical Array* par S. Ellis, 2/85, p. 7.

Figure 2.40 : Haut-parleurs de graves montés en *push-pull*.

2.9.3 Configuration à haut-parleurs de graves jumelés

Ce système fut d'abord décrit par Olson au début des années cinquante. Comparé aux autres configurations à deux haut-parleurs, le système à haut-parleurs de graves jumelés ou *isobaric* (isobare, à pression constante) possède plusieurs avantages de taille. Pour les configurations décrites dans la figure 2.41 et définies par un montage mécanique et un branchement électrique particuliers, nous avons comme caractéristiques :

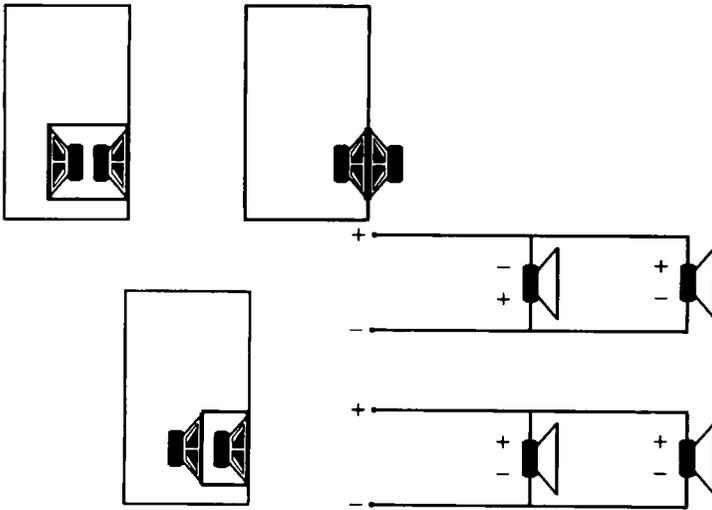


Figure 2.41 : Montage avec haut-parleurs de graves jumelés.

- A. Q_{ts} sera le même que pour un seul haut-parleur.
- B. F_s sera le même que pour un seul haut-parleur.
- C. V_{as} (et le volume associé de l'enceinte V_b) sera la moitié de celui d'un haut-parleur unique.
- D. L'impédance résultante du montage, s'il est effectué en parallèle, sera la moitié de celle d'un haut-parleur unique.
- E. Si la configuration est en plus montée en *push-pull*, elle bénéficiera de tous les avantages décrits ci-dessus.
- F. La sensibilité d'une paire de haut-parleurs de graves jumelés sera la même que pour un seul haut-parleur (elle augmentera de 3 dB à cause de l'impédance de 4Ω , mais diminuera de 3 dB à cause du doublement de la masse des membranes).

Le montage des deux haut-parleurs de graves face à face est une configuration valable essentiellement pour des enceintes limitées aux très basses fréquences du type *subwoofer* et dont la fréquence de coupure haute est égale ou inférieure à 100 Hz.

Le principal avantage du modèle à pression constante, comparé au modèle à un seul haut-parleur, est de réduire le volume de l'enceinte

de moitié. Ceci en fait un choix idéal pour les applications en *subwoofer*.

Lors de la construction, il est souhaitable de tenir compte des détails suivants :

- A. Le calcul du volume de l'enceinte est le même que pour celui d'une enceinte close, utilisant le coefficient Q_s d'un seul haut-parleur ainsi que $V_{as} / 2$.
- B. Construisez le petit tunnel dessiné dans la figure 2.41. Il peut être de section carrée, et fait à partir de chutes de panneaux, ou de section cylindrique, en utilisant du *Sonotube* (tube en carton utilisé pour le coffrage des piliers). Sa longueur n'est pas critique, mais prenez garde à ce que la membrane du haut-parleur de graves du fond ne touche jamais le moteur du haut-parleur de graves monté en façade. Le tunnel doit être étanche et ne pas contenir de matériaux amortissants, si ce n'est un absorbant acoustique (tel du feutre) que l'on fixera sur ses parois.

Vous trouverez également deux constructions intéressantes dans des articles parus dans *Speaker Builder : Constructing a Sontek Subwoofer* par P. Todd, 2/85, p. 20 ; et *An Isobaric System* par J. Cockcroft, 3/85, p. 7 et *The Wonder of a Symmetrical Isobaric* par B. Schwefel, 5/90.

Tableau 2.2 : Filtres actifs pour enceintes closes

	Q_{tc}	nouv. Q_{tc}	gain	résultat
A.	B ₂ -0,707	B ₄ -0,707	8 dB	1 octave
B.	C ₂ -1,1	D ₃ -0,577	5 dB	imp. transf.
C.	B ₂ -0,707	B ₂ -0,707	10 dB	1 octave

2.10 Enceintes closes à compensation électronique

Pour modifier la courbe de réponse des enceintes closes aux très basses fréquences, on suggérait parfois de relever le niveau par un filtre actif. Trois publications, de Leach [21,22], de Staggs [23] et de Greiner et Schøessow [24], décrivent différentes approches qui soit diminuent la fréquence de coupure, soit améliorent la réponse transitoire du haut-parleur. Le tableau 2.2 résume les paramètres de ces trois filtres. La simulation par ordinateur permet d'illustrer les problèmes créés par l'augmentation du niveau de sortie des basses fréquences d'une enceinte close. La simulation par ordinateur utilisée ici correspond à la méthode décrite par Marshall Leach dans son article "Active Equalization of Closed Box Loudspeaker Systems" JAES 6/81. La combinaison enceinte/haut-parleur avait un coefficient Q_{tc} de 0,7 avec une fréquence f_3 de 35 Hz. Le filtre d'amplification des graves est composé d'une section d'ordre quatre, ayant un gain d'environ 8 dB à 24 Hz. La figure 2.42 montre la fonction de transfert. La figure 2.43 compare, pour une puissance de 1 W, les courbes de réponse SPL de l'enceinte avec et sans amplification du grave. L'enceinte close équipée du filtre à amplification du grave voit sa fréquence f_3 chuter à 24 Hz, 11 Hz de moins que la version non modifiée, par contre la pente d'atténuation s'incline davantage, avec maintenant 38,5 dB/octave. La bonne impression initiale laissée par ces paramètres

ne résiste pas à l'examen des courbes d'excursion de la membrane et de retard de groupe de la figure 2.44. L'excursion de la membrane a plus que doublé (courbes de faible amplitude), tandis que l'évolution de l'amortissement semble plutôt radicale, avec un coude très accentué dans la courbe de retard de groupe. C'est lorsque l'enceinte sera soumise à une puissance de 20 W que les choses se clarifieront. Alors que la comparaison des courbes SPL dans la figure 2.45 ne révèle que des variations auxquelles on s'attendait pour une puissance plus élevée, les courbes d'excursion de membrane et de retard de groupe de la figure 2.46, qui concernent le modèle équipé de filtre à amplification des graves, sont absolument inacceptables. L'excursion de la membrane s'est allongée à presque 19 mm, ce qui est beaucoup demander à un haut-parleur qui a un X_{max} de seulement 7 mm. Même en argumentant que ce pic, dont la largeur de bande est étroite, n'est sollicité que par une faible partie du signal musical, attendez-vous à ce que le coup de canon de l'Ouverture 1812, ou quelque très basse fréquence provenant d'un synthétiseur, propulse la bobine mobile complètement hors de l'entrefer, ce qui provoquera une panne fatale, lorsqu'elle retournera s'écraser sur la plaque de champ.

Je n'ai pas essayé de refaire la méthodologie décrite pour ces filtres à graves amplifiés. Néanmoins, ils sont cités comme alternative aux configurations exposées précédemment. L'inconvénient majeur des filtres à graves amplifiés, décrits ci-dessus, est de demander beaucoup plus de puissance à l'amplificateur dans les basses fréquences. La modification de la courbe de réponse par de telles techniques est encore moins recommandable avec des sources de signal de grande dynamique, comme les lecteurs de CD. Si vous désirez une fréquence de coupure plus basse ou une réponse transitoire améliorée, la meilleure solution sera probablement de sélectionner, en premier lieu, une configuration sans compensation électronique.

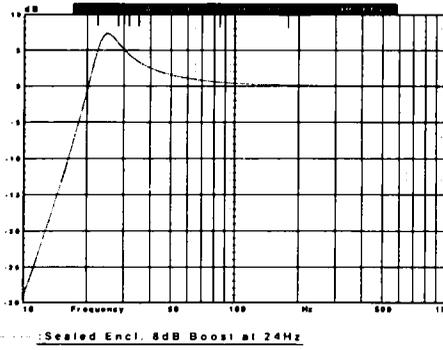


Figure 2.42

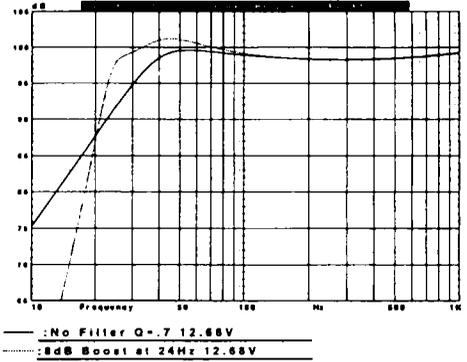


Figure 2.45

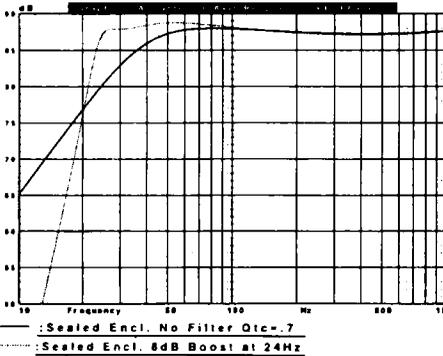


Figure 2.43

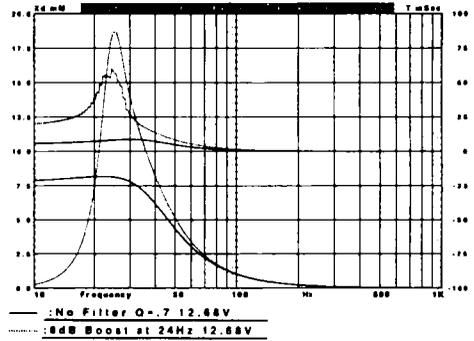


Figure 2.46

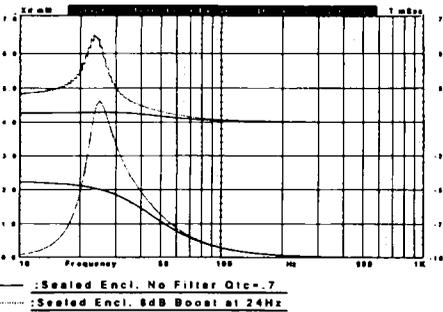


Figure 2.44

2.11 Techniques d'augmentation de masse de l'équipage mobile

Modifier les haut-parleurs en augmentant leur masse mobile est une technique en usage depuis longtemps chez les constructeurs d'enceintes acoustiques. Deux configurations modifiant la masse sont décrites ci-dessous : premièrement, le cas simple d'accroissement de la masse par alourdissement de l'équipage mobile, et, deuxièmement, le recours à un accroissement de la masse combiné avec l'utilisation d'un filtre passe-haut série.

Tableau 2.23 :
Effet de l'augmentation de la masse
sur Q_{ts} et Q_{tc}

enceinte									
lest	Q_{ms}	Q_{es}	Q_{ts}	f_s Hz	SPL dB	Q_{tc}	f_3 Hz	SPL dB	
47 g	2,86	0,5	0,43	22,5	87	0,7	35	87,9	
80 g	3,67	0,65	0,55	17,5	82,7	1,0	25	84,9	

2.11.1 Modification par augmentation de la masse mobile

En augmentant la masse de la membrane d'un haut-parleur, on change la valeur de plusieurs de ses paramètres opérationnels. Le tableau 2.23 montre la variation des paramètres d'un haut-parleur de 25 cm (10"), provoquée par une augmentation de la masse de sa membrane de 75%. Les paramètres du tableau sont, d'une part, ceux du haut-parleur lui-même et, d'autre part, ceux de l'enceinte acoustique dans laquelle il est monté. Il est évident, d'après les données du tableau 2.23, que, quand la masse augmente, le coefficient Q_{ts} croît, la fréquence f_s décroît, et l'efficacité du haut-parleur de graves diminue. De même, quand on ajoute de la masse, le coefficient Q de l'enceinte augmente ainsi que l'angle de phase à -3 dB ; par contre, la fréquence f_3 et le niveau de pression sonore (SPL) baissent. La comparaison des courbes de réponse SPL simulées du haut-parleur de graves monté dans l'enceinte avec et sans masse additive est illustrée dans la figure 2.47. Les courbes d'excursion du cône et de retard de groupe de la figure 2.48 confirment une baisse de l'amortissement. Les courbes de la figure 2.49 montrent une fréquence f_c plus faible et un coefficient Q plus élevé pour la version alourdie. Cet ensemble de compromis semble assez raisonnable, y compris les effets observés lors d'une montée de puissance à 20 W. La figure 2.50 indique les variations attendues pour les courbes SPL. L'allongement de l'excursion du cône, illustré dans la figure 2.51, pourrait être trop important, le haut-parleur de graves utilisé ici ayant une élévation X_{max} de 7 mm. En esti-

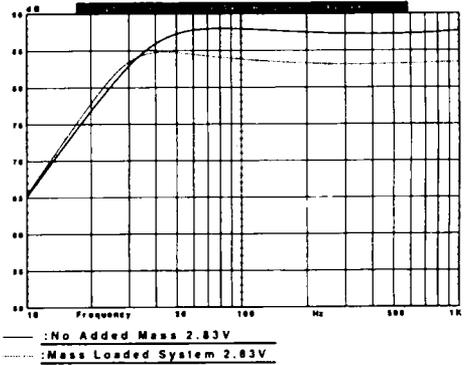


Figure 2.47

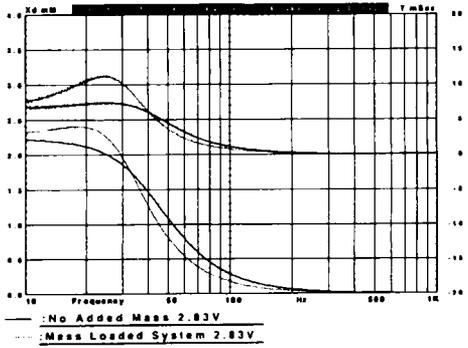


Figure 2.48

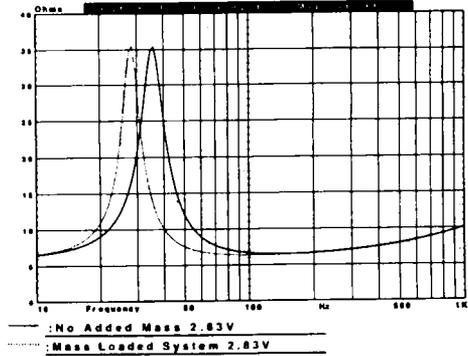


Figure 2.49

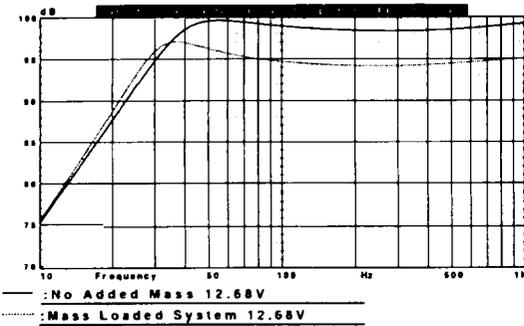


Figure 2.50

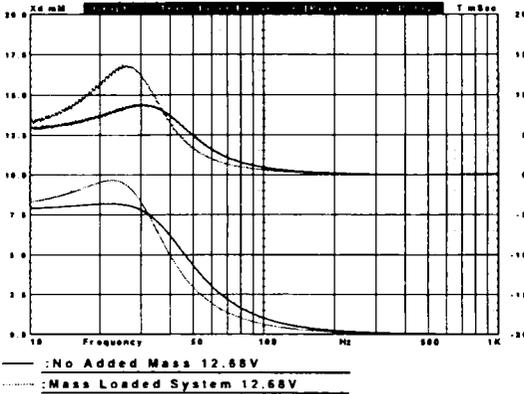


Figure 2.51

mant que la distorsion d'harmonique trois monte à 3%, quand X_{\max} s'accroît de 15%, ce qui fait 8 mm, on constate que la combinaison non modifiée haut-parleur/enceinte fonctionne toujours correctement. La version alourdie porte l'élongation à environ 9,5 mm, ce qui, sans être vraiment excessif, commence néanmoins à solliciter le haut-parleur. Une bonne solution serait d'utiliser deux haut-parleurs de graves alourdis au lieu d'un ; ceci abaisserait le coefficient Q ainsi que l'excursion de la bobine aux niveaux plus élevés, tout en portant l'efficacité à un niveau plus acceptable. La prudence reste toutefois de mise : la membrane risque de s'affaisser avec le temps à cause de son alourdissement.

Si l'affaissement devient trop important, il provoquera le décentrage de la bobine mobile et finira par causer la panne prématurée du haut-parleur.

2.12 Haut-parleur à équipement mobile alourdi et filtre passe-haut série

Les haut-parleurs associés à un filtre passe-haut série ne nécessitent pas forcément un alourdissement de leur équipement mobile, mais comme c'est l'une des configurations qui utilise les paramètres décrits pour la méthodologie exposée ici, on inclura cette technique dans le groupe des haut-parleurs à membrane alourdie. Les enceintes équipées d'un filtre passe-haut série sont une émanation de l'étude originale de Thiele sur les enceintes *bass-reflex* avec alignement de cinquième ordre, munies de filtre passe-haut. Les premiers à introduire l'idée d'étendre le registre des basses fréquences d'une enceinte close, en combinant la fonction de transfert de l'ensemble haut-parleur/enceinte avec un filtre passif passe-haut, furent Benson [25] et Recklinghausen [26]. Puis, en 1985, au 79^e congrès de l'AES, vint l'exposé de Geddes et Clark [27]. Ils suggérèrent l'application de ce type de réalisation à des configurations, où l'égalisation active ne serait pas viable, comme, par exemple, dans le cas de satellites associés à des caissons de graves (*subwoofer*). On suggéra également des applications opportunes dans le domaine de l'audio automobile, où la faiblesse de la tension électrique disponible pour alimenter l'amplificateur ne serait pas propice à l'égalisation active (cette crainte a été largement balayée entre temps par l'énorme succès de l'égalisation active dans l'audio automobile).

Concrétisant la théorie, Tom Noursaine décrit une application intéressante dans *Speaker Builder* en 1989 [28].

Le critère de base de ce type de configuration est un coefficient Q_n du haut-parleur de graves compris entre 0,7 et 10. L'exemple décrit dans la publication de Gedde et Clark met en œuvre un haut-parleur de graves JBL 128H de 30 cm (12"), dont le coefficient Q_n est élevé, car le support de bobine mobile utilisé n'est pas conducteur. L'alourdissement sert à porter le coefficient Q_{ms} à un niveau acceptable, car la plupart des haut-parleurs de graves domestiques employés en haute fidélité utilisent un support de bobine mobile en matériau conducteur et ont, de ce fait, un coefficient Q_{ms} compris entre 3 et 5.

Pour appliquer cette méthode, sélectionnez d'abord un haut-parleur de graves qui a un coefficient Q_{ms} relativement élevé d'environ 4,5, puis ajoutez assez de masse pour porter le coefficient de surtension mécanique à 7 ou 8. Le haut-parleur de graves de 30 cm (12"), utilisé dans l'article de Nousaine, nécessita un accroissement de masse de 80% (environ autant que dans l'exemple précédent). Le coefficient Q_c de l'enceinte non modifiée doit être ajusté à environ 1,1. Comme dans l'exemple précédent, l'emploi de deux haut-parleurs de graves améliorera l'efficacité et diminuera la course de la membrane. Le filtre passe-haut est constitué d'un seul condensateur série dont la valeur est donnée par :

$$C = \frac{0,234}{R_E \times f_c}$$

Le tableau 2.24 donne les paramètres de l'enceinte et du haut-parleur sans modifications, avec alourdissement et avec condensateur, du même haut-parleur que celui cité

dans l'article de *Speaker Builder* de Tom Nousaine (haut-parleur de graves de 30 cm (12") TA305F de Precision).

Dans cet exemple, le calcul du condensateur donne une valeur d'environ 1,750 μF , ce qui peut être obtenu par un seul grand condensateur de démarrage de moteur ou par la mise en parallèle de plusieurs condensateurs électrochimiques non polarisés.

La figure 2.52 montre les courbes simulées pour 1 W SPL, le haut-parleur étant monté dans l'enceinte sans masse ajoutée, avec masse ajoutée, et avec masse ajoutée et filtre. Comparée à la version avec masse additive, celle équipée d'un filtre série abaisse la fréquence f_3 de 10 Hz. La réponse en fréquence ressemble maintenant à un coude très prononcé d'un alignement *bass-reflex* du 4^e ordre. Ceci est confirmé par l'examen des courbes de retard de groupe et d'excursion de cône de la figure 2.53. La forme de la courbe de retard de groupe ressemble plutôt à celle d'une enceinte *bass-reflex* mal amortie ; c'est le tribut à payer pour une extension significative en basses fréquences. L'excursion de la membrane s'est également accrue avec l'adjonction du filtre. La figure 2.54 montre que le filtre passe-haut série n'a pas perturbé la courbe d'impédance de l'ensemble haut-parleur / enceinte.

En soumettant l'ensemble à une puissance de 20 W, on obtient les courbes de réponse SPL de la figure 2.55. Grâce au montage de plusieurs haut-parleurs en parallèle, les variations observées par la montée en tension sont

Tableau 2.24 : Exemples d'enceintes closes à filtre passe-haut série et munies d'un haut-parleur de graves à masse ajoutée

	masse	Q_{ms}	Q_{es}	Q_{ts}	SPL	f_s	Q_c	pen- te dB/oct	SPL	f_3
sans masse ajoutée	72 g	5,8	0,32	0,31	91 dB	24 Hz	0,7	11,03	95 dB	54 Hz
avec masse ajoutée	129 g	7,6	0,42	0,40	87 dB	19 Hz	1,1	12,34	90 dB	38 Hz
avec condensateur	-	-	-	-	-	-	4 ^e	21,6	90 dB	28 Hz

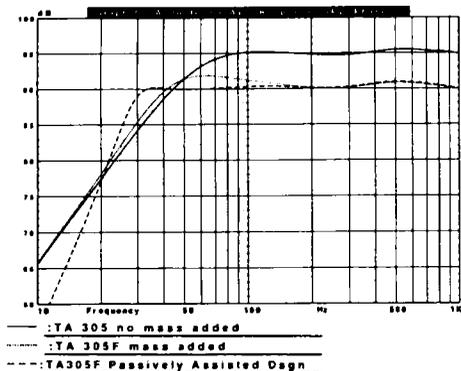


Figure 2.52

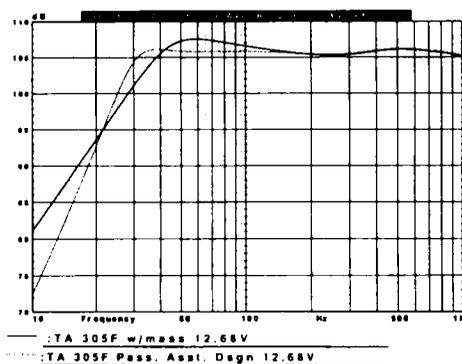


Figure 2.55

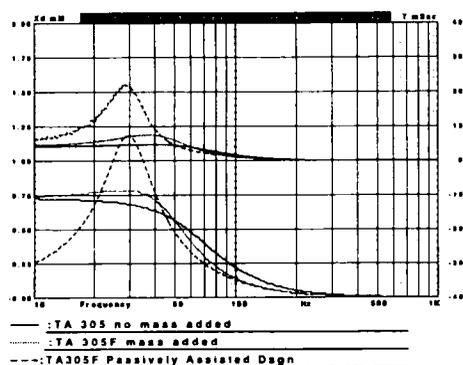


Figure 2.53

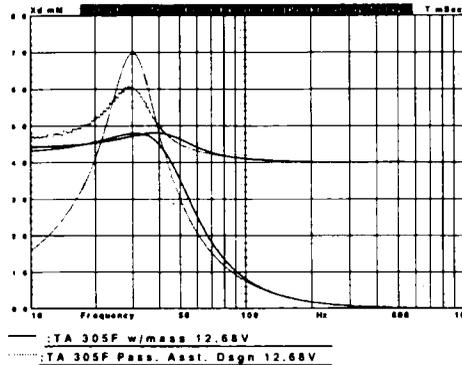


Figure 2.56

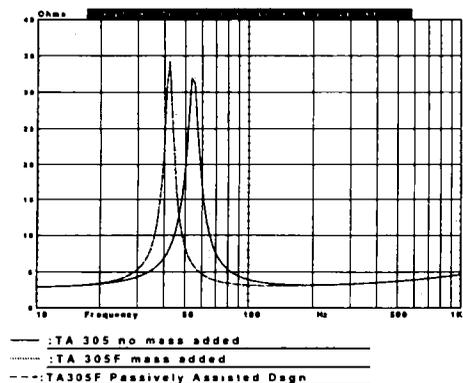


Figure 2.54

dans les limites prévues. Les courbes de retard de groupe et les courbes d'excursion de cône de la figure 2.56 témoignent également de la modification de l'amortissement intervenue avec l'augmentation de puissance. L'excursion de la version équipée d'un filtre passe-haut est, avec 7 mm, dans les normes, sachant que $X_{max} +15\%$ est égal à 6,9 mm pour ce haut-parleur de graves. Les seuls inconvénients de cette version sont un retard de groupe médiocre et la forme de la courbe de réponse, qui reflètent un alignement d'ordre quatre, ainsi que la possibilité d'un décentrage éventuel de la bobine mobile provoqué par la masse ajoutée. Pour résoudre

facilement le problème causé par l'affaissement des suspensions, il suffira, de temps en temps, de tourner le haut-parleur de 180° dans l'enceinte.

2.13 Enceintes closes à charges symétriques

2.13.1 Définition

Une enceinte close à charge symétrique est constituée d'une enceinte close, à laquelle on a ajouté un filtre acoustique placé en série avec la surface d'émission du haut-parleur de graves. Grâce à l'adjonction d'un filtre supplémentaire, le nombre de compromis possibles entre l'efficacité et la bande passante est plus élevé que pour une enceinte close.

2.13.2 Paramètres complémentaires

f_b	fréquence d'accord du résonateur série (placé à l'avant)
f_L	f_3 de la coupure en basses fréquences
f_H	f_3 de la coupure en hautes fréquences
L_v	longueur de l'évent en centimètres
Q_{bp}	coefficient Q de la chambre arrière qui est close
R	rayon de l'évent en centimètres
S	taux d'ondulation dans la bande passante (variations de la réponse en amplitude)
V_f	volume du résonateur série (filtre acoustique)
V_r	volume de la chambre arrière (enceinte close)
V_t	volume total des deux chambres

2.14 Historique

En dépit de sa popularité actuelle, l'enceinte à charge symétrique n'est pas de conception récente. Le premier brevet fut déposé en 1934 par Andre d'Alton (brevet n° 1.969.704) [29], suivi par un autre dépôt effectué en 1952 par un étudiant diplômé du MIT, Henry Lang. Un regain d'intérêt se manifesta après la publication, au 63^e congrès de l'AES par Laurie Fincham, d'un article intitulé *A Bandpass Loudspeaker Enclosure*, (AES preprint n° 1512). Deux concepteurs français, Augris et Santens, publièrent en 1982, dans la revue française *L'Audiophile*, une méthode pour déterminer à l'aide d'une calculatrice de poche les paramètres d'une enceinte close à charge symétrique [30]. Peu de temps après, Bose obtint, en octobre 1985, un brevet (n° 4.549.631) concernant une enceinte à charge symétrique, qui se transforma plus tard en un système de trois enceintes nommé Acoustimass. Earl Geddes continua à entretenir l'intérêt du public avec une publication au 81^e congrès de l'AES, en novembre 1986, intitulé "*Bandpass Loudspeaker Enclosure*" (preprint n°2383). L'article fut mis à jour et publié dans la revue JAES en mai 1989. La véritable explosion de popularité, parmi les amateurs et les fabricants, date probablement de la republication par Jean Margerand de la méthode de Augris et Santens dans *Speaker Builder* en juin 1986.

2.15 Choix du haut-parleur de graves

Pour une enceinte close à charge symétrique, la sélection du haut-parleur de grave est en gros la même que pour une enceinte close non filtrée. Les compromis étant plus faciles, le rapport f_s/Q_{ts} est plus important pour le calcul des enceintes à charge symétrique. De faibles rapports, qui correspondent à des coefficients Q plus élevés, en usage dans les

Tableau 2.25 :
S = 0,7 ; taux d'ondulations = 0 dB

Q_{bp}	facteur de f_L	facteur de f_H	variation de l'efficacité
0,4507	0,2167	0,9373	-8 dB
0,4774	0,2378	0,9584	-7 dB
0,5057	0,2606	0,9812	-6 dB
0,5356	0,2852	1,0058	-5 dB
0,5674	0,3118	1,0324	-4 dB
0,6010	0,3404	1,0610	-3 dB
0,6366	0,3712	1,0918	-2 dB
0,6743	0,4043	1,1248	-1 dB
0,7143	0,4397	1,1603	0 dB
0,7566	0,4777	1,1983	1 dB
0,8014	0,5184	1,2390	2 dB
0,8489	0,5619	1,2825	3 dB
0,8772	0,6084	1,3290	4 dB
0,9525	0,6581	1,3787	5 dB
1,0090	0,7111	1,4317	6 dB
1,0687	0,7675	1,4881	7 dB
1,1321	0,8277	1,5483	8 dB

enceintes closes, offrent généralement des fréquences de coupure f_3 plus basses.

2.16 Détermination du volume de l'enceinte

Pour calculer le volume de l'enceinte, la méthode est une version simplifiée de celle décrite dans l'article publié en juin 88 dans *Speaker Builder*. Les calculs sont effectués à partir de trois tableaux. Chaque tableau indique un niveau d'amortissement différent « S », qui exprime l'ondulation au sein de la bande passante. Le facteur d'ondulation S décrit la variation de niveau SPL de la courbe

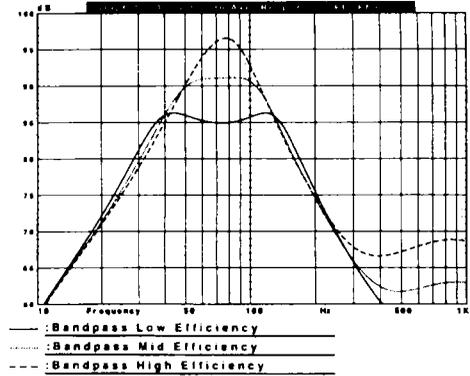


Figure 2.57

de réponse entre les deux fréquences de coupure à -3 dB, f_L pour la coupure basse et f_H pour la coupure haute. Le tableau 2.25 a un facteur S = 0,7 qui indique l'absence d'ondulations et la meilleure réponse transitoire. Le tableau 2.26 avec un facteur S = 0,6 tolère des ondulations de 0,35 dB (insignifiantes), avec une réponse transitoire un peu moins bonne. Le facteur S informe également sur la largeur de la bande passante ; elle est la plus large pour S = 0,5 et la plus étroite pour S = 0,7. Il est recommandé de démarrer les calculs par le tableau 2.25 donc S = 0,7, et d'essayer de déterminer par essais successifs, si le haut-parleur de graves choisi procurera les fréquences de coupure f_L et f_H au niveau d'efficacité désiré. Le calcul des fréquences de coupure f_3 haute et basse est obtenu en multipliant le rapport du haut-parleur f_s/Q_{ts} par les facteurs f_L et f_H qui figurent dans les tableaux. On répétera ce calcul pour différents niveaux de sensibilité, jusqu'à ce que l'on ait trouvé un compromis satisfaisant entre les fréquences f_L/f_H et la sensibilité. Le calcul de V_f , volume du résonateur série (cavité qui émet le son à l'extérieur), pourra être fait une fois le tableau choisi, car il est indépendant de tous les facteurs autres que S. Le volume V_f se calcule par :

$$V_f = (2 S \times Q_{ts})^2 \times V_{as}$$

Tableau 2.26 :
S = 0,6 ; taux d'ondulations = 0,35 dB

Q _{bp}	facteur de f _L	facteur de f _H	variation de l'efficacité
0,5258	0,2326	1,1886	-8 dB
0,5570	0,2560	1,2119	-7 dB
0,5900	0,2813	1,2373	-6 dB
0,6249	0,3088	1,2648	-5 dB
0,6619	0,3385	1,2945	-4 dB
0,7012	0,3706	1,3266	-3 dB
0,7427	0,4052	1,3612	-2 dB
0,7867	0,4425	1,3986	-1 dB
0,8333	0,4827	1,4387	0 dB
0,8827	0,5258	1,4818	1 dB
0,9350	0,5721	1,5281	2 dB
0,9904	0,6217	1,5778	3 dB
1,0491	0,6749	1,6309	4 dB
1,1113	0,7317	1,6877	5 dB
1,1771	0,7925	1,7485	6 dB
1,2469	0,8573	1,8134	7 dB
1,3207	0,9266	1,8826	8 dB

Tableau 2.27 :
S = 0,5 ; taux d'ondulations = 1,25 dB

Q _{bp}	facteur de f _L	facteur de f _H	variation de l'efficacité
0,6310	0,2600	1,5312	-8 dB
0,6683	0,2867	1,5579	-7 dB
0,7079	0,3158	1,5870	-6 dB
0,7499	0,3474	1,6186	-5 dB
0,7943	0,3817	1,6528	-4 dB
0,8414	0,4189	1,6900	-3 dB
0,8913	0,4591	1,7302	-2 dB
0,9441	0,5025	1,7736	-1 dB
1,0000	0,5493	1,8204	0 dB
1,0593	0,5997	1,8709	1 dB
1,1220	0,6540	1,9254	2 dB
1,1885	0,7122	1,9833	3 dB
1,2580	0,7747	2,0458	4 dB
1,3335	0,8417	2,1128	5 dB
1,4125	0,9134	2,1845	6 dB
1,4962	0,9901	2,2612	7 dB
1,5849	1,0720	2,3431	8 dB

Lorsque vous passez les tableaux en revue, soyez attentif aux interactions : car plus Q_{bp} est grand, plus grande sera la sensibilité et plus étroite sera la largeur de bande. À l'inverse, comme on le voit dans la figure 2.57, plus la valeur de Q_{bp} est faible, plus la sensibilité sera faible, et plus grande sera la largeur de bande. Le volume V_r se calcule par :

$$V_r = \frac{V_{as}}{(Q_{bp} / Q_{ts})^2 - 1}$$

La fréquence d'accord pour le résonateur série est déterminée par :

$$f_b = Q_{bp} \times (f_s / Q_{ts})$$

Une fois la fréquence d'accord déterminée, le volume V_f, en litres, et le rayon de l'évent, en centimètres, donneront par calcul la longueur L_v de l'évent en centimètres par la formule :

$$L_v = \frac{9,425 \times 10^4 R^2}{f_b^2 V_f} - 1,595 R$$

Le diamètre de l'évent sera aussi grand que le permettra la profondeur du résonateur, afin de diminuer les défauts de linéarité dus à la friction de l'air dans l'évent. S'il est construit en utilisant les parois du résonateur, cet événement ne demande l'adjonction que d'un ou de deux panneaux supplémentaires ; il aura la plus grande section possible en fonction de la profondeur de l'enceinte. Des événements cylindriques plus longs nécessiteront un raccord coudé.

2.17 Simulation par ordinateur et exemples de calculs

Le tableau 2.28 donne l'exemple de calculs d'une enceinte close à charge symétrique munie d'un haut-parleur de graves de 20 cm (8"). Les données du tableau sont soumises au logiciel LEAP 4.0, qui effectue une simulation sur ordinateur. Les résultats fournis par le logiciel LEAP sont beaucoup plus complexes que ceux obtenus par les tables de données numériques traitées à la calculette. Le logiciel LEAP tient compte des défauts de linéarité du produit BL, de la compliance, des pertes occasionnées par l'évent ainsi que de nombreux autres paramètres, fonction de la fréquence. Le modèle général de Thiele / Small (dont les tables numériques ont été établies, dans ce livre, pour être utilisées avec une calculette) fait appel à des constantes généralisées et ne tient pas compte des pertes, qui sont fonction de la fréquence, ou des défauts de linéarité du haut-parleur. Néanmoins, pour des petits niveaux (1 W), la méthode avec une calculette est suffisamment précise et fiable pour le calcul d'un projet. L'examen des résultats du tableau 2.28 confirme ces propos ; en effet, pour les fréquences f_L et f_H , les prédictions du logiciel LEAP diffèrent de moins de 2 Hz de celles qui figurent dans la table de calcul. La figure 2.58 présente la courbe SPL à 1 W, dont la forme est typiquement celle d'un filtre passe-bande. Avec ses 42 Hz, la fréquence

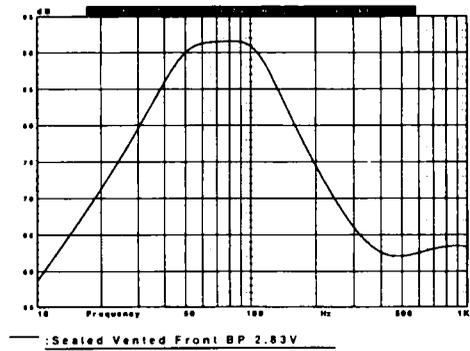


Figure 2.58

-3 dB est une bonne performance, surtout comparée aux 55 Hz environ pour la fréquence -3 dB que ce haut-parleur de graves produirait dans une enceinte close de 20 l. La pente d'atténuation est d'environ 15 dB/octave pour la partie inférieure, ce qui est un peu raide pour une pente du second degré, et 17,8 dB/octave pour l'atténuation des fréquences élevées. La plus grande partie de la littérature semble, par omission, suggérer que les enceintes à charge symétrique sont de bons filtres passe bas. C'est faux. La figure 2.59 montre la même enceinte de 20 Hz à 20 kHz, simulée avec le logiciel LEAP, le module de simulation des ondes stationnaires à l'intérieur d'un événement étant en fonction. Cette simulation fut faite sans aucun amortis-

Tableau 2.28 :
Enceinte acoustique à charge symétrique équipée d'un haut-parleur de 20 cm (8"), S = 0,7

haut-parleur		f_s	Q_{ts}	V_{as}	f_s/Q_{ts}				
		32	0,328	2,49 ft ³	0,99				
enceinte		V_f	V_r	f_b	Q_{bp}	f_L	f_H	L_v	D
calcul		0,53	0,66	71 Hz	0,7142	43,5 Hz	115 Hz	9,75"	4"
simulation		0,53	0,66	71 Hz		42,0 Hz	114 Hz	9,25"	4"

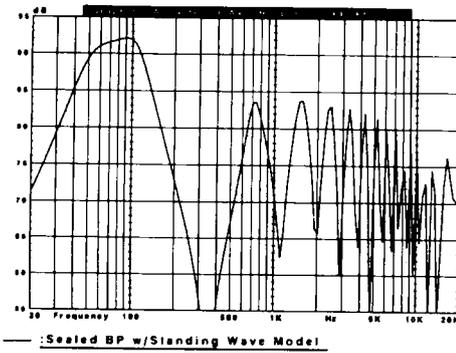


Figure 2.59

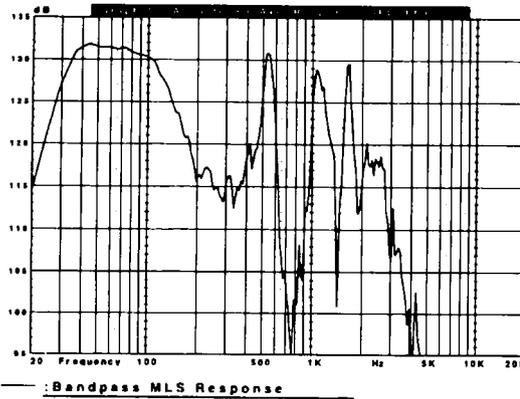


Figure 2.60

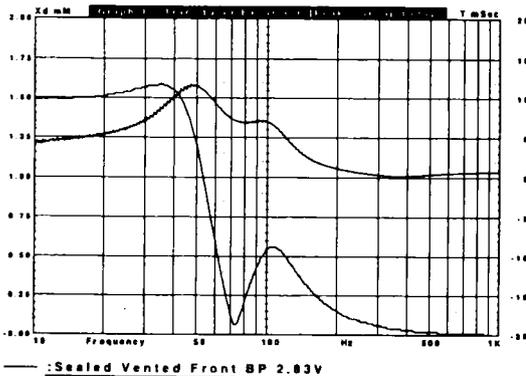


Figure 2.61

sement du résonateur série, afin de bien mettre le phénomène en évidence. C'est une bonne approximation des perturbations de la courbe de réponse, provoquées par les résonances de l'évent et par les ondes stationnaires qui se propagent à travers celui-ci vers l'extérieur de l'enceinte (les ondes stationnaires des événements sont exposées en détail dans le chapitre suivant). Par contre, la figure 2.60 montre la réalité : un relevé de la courbe de réponse en fréquence d'une enceinte close à charge symétrique équipée d'un haut-parleur de graves de 25 cm (12"). Les parois du résonateur série de ce modèle étaient tapissées avec une laine de verre de 2,5 cm d'épaisseur. La mesure a été faite en champ proche avec un microphone de mesure ACO Pacific 7012 et l'analyseur FFT DRA MLSSA, puis les données ont été transmises au logiciel LEAP 4.0. Ce problème n'est pas négligeable, car il est difficile d'utiliser une enceinte à charge symétrique sans ajouter un filtre passe-bas, à moins d'accepter l'émission de ces fréquences parasites.

On dispose de plusieurs techniques pour atténuer la transmission des modes de résonance de l'enceinte vers l'extérieur via l'évent. La première, c'est de tapisser toute la surface interne du résonateur avec de la laine de verre ou quelque autre matériau amortissant. Une autre possibilité est de tendre à travers la cavité, entre l'évent et le haut-parleur, un tissu comprimé, analogue à celui qui est employé en automobile pour amortir les vibrations. Fixer un panneau incliné à l'intérieur du résonateur, entre le haut-parleur de graves et l'évent, contribuera également à perturber les ondes stationnaires. Placer un évent cylindrique directement au-dessus du haut-parleur de graves, comme on le rencontre dans beaucoup d'exemples, est beaucoup plus néfaste que d'utiliser la variante de section rectangulaire, qui utilise les parois du résonateur. Beaucoup de constructeurs n'essayent même pas d'utiliser l'enceinte sans filtre ; généralement, ils ont recours à un filtre électronique ou à un filtre

passif du premier ordre (associé à une cellule de correction d'impédance), ce qui nécessitera une correction de la longueur de l'évent pour réajuster la fréquence du résonateur. Au 91^e congrès de l'AES, Joe D'Appolito présenta une méthode qui ajoute des filtres passe-haut et passe-bas du premier ordre à une enceinte à charge symétrique, sous réserve d'un réajustage du résonateur [31]. Cette technique fut intégrée dans le logiciel TopBox, qu'il est facile de se procurer [32,33]. Toutes ces méthodes exigeront un minimum de tâtonnements.

La figure 2.61 décrit le retard de groupe et l'excursion de la membrane. La courbe de retard de groupe reflète un amortissement semblable à celui d'une enceinte *bass-reflex*. Bien que la pente d'atténuation dans le registre des fréquences les plus basses soit du second ordre, comme pour une enceinte close, sa réponse transitoire est comparativement moins bonne. L'impédance est illustrée en figure 2.62, et la vitesse du cône dans la figure 2.63. Les deux courbes ressemblent à celles d'une enceinte *bass-reflex*, avec une accélération maximale du haut-parleur aux fréquences de résonance.

La courbe d'amplitude, pour une puissance de 20 W, est moins plate à ses deux extrémités, d'après la figure 2.64. L'excursion de la membrane s'accroît jusqu'à environ 6,4 mm, ce qui est une bonne performance, vu le niveau sonore de 102 dB SPL et $X_{max} + 15\%$, qui n'est que de 6 mm. Le volume total de ce modèle, environ 34 l, est grand pour un haut-parleur de graves unique de 20 cm (8") de diamètre. L'application des techniques à haut-parleurs de graves jumelés donnera des versions plus compactes d'enceinte à charge symétrique.

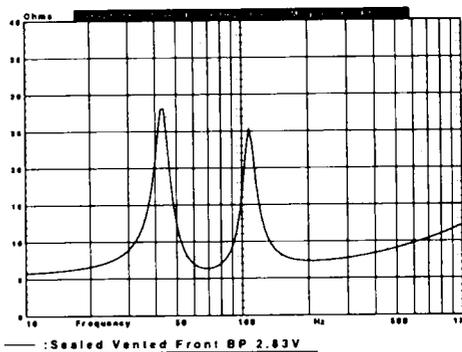


Figure 2.62

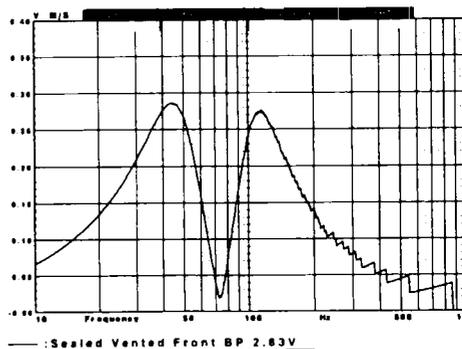


Figure 2.63

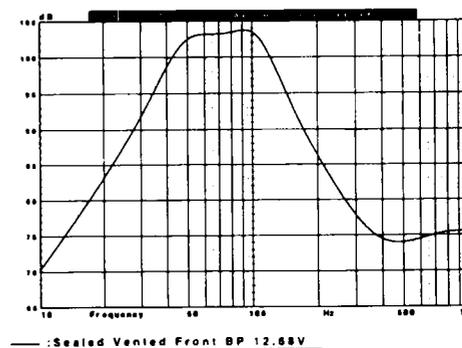


Figure 2.64

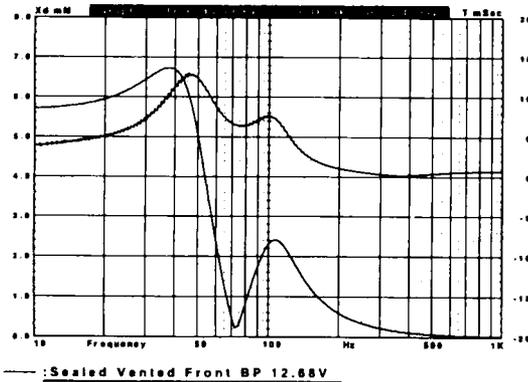


Figure 2.65

2.18 Variations autour de la charge symétrique

Plusieurs variantes des enceintes closes à charge symétrique sont possibles. Les dessins de la figure 2.66 décrivent cinq possibilités :

- A. enceinte à charge symétrique à un seul haut-parleur.
- B. enceinte à charge symétrique à deux haut-parleurs *push-pull*.
- C. enceinte à charge symétrique à haut-parleurs de graves jumelés.
- D. enceinte à charge symétrique à trois cavités.
- E. enceinte à charge symétrique *push-pull* à trois cavités.

La configuration B utilise le même volume pour les deux haut-parleurs. Le volume de la cavité centrale de la version à trois cavités est égal au total des volumes des deux résonateurs et accordé à cette fréquence. Dans les versions B, C et D, les haut-parleurs sont branchés en opposition de phase entre eux, peu importe que le montage soit fait en parallèle ou en série. Un article décrivant la construction d'une enceinte à charge symétrique *push-pull*, à triple cavité, pour l'automobile, a été publié par Matthew Honnert dans *Speaker Builder* (6/90), sous le titre *Symmetrical loading for Auto Subwoofer*.

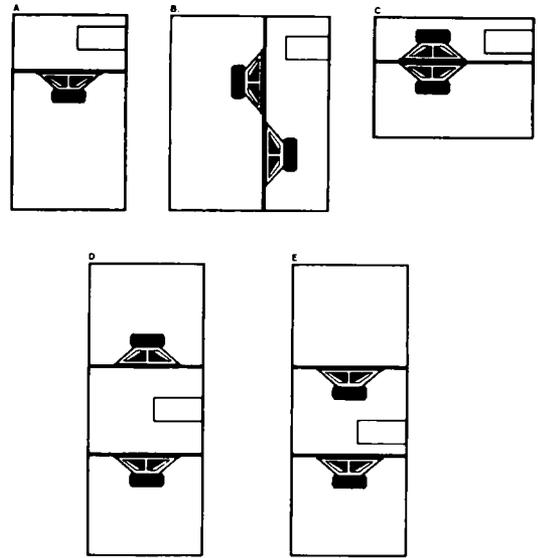


Figure 2.66 : Enceintes à charge symétrique.

2.19 Enceinte close apériodique

L'enceinte close à amortissement apériodique est une variante de l'enceinte close, qui correspond plutôt à une extension des techniques d'amortissement décrites au paragraphe 2.8.2. C'est une enceinte close, munie d'un dispositif nommé Variovent. Le Variovent, commercialisé par Scan Speak et par Dynaudio, produit un cheminement résistif pour un flux d'air qui s'échappe vers l'extérieur et qui transforme l'enceinte close en une enceinte close à fuite résistive. L'accessoire, qui se monte dans un trou d'un diamètre de 10 cm, ressemble à un évent et consiste en un support en matière synthétique, qui maintient en sandwich un disque de 2,5 cm d'épaisseur, constitué de laine de verre de forte densité. Cette laine de verre produit une fuite résistive, mais ne fonctionne pas comme un évent. Le Variovent amortit l'impédance d'une enceinte close d'une manière semblable à l'amortissement apporté par un remplissage à 100% du volume interne avec un matériau absorbant à haute densité. Les deux tech-

Tableau 2.29

	Z_0	f_0	Q_m	Q_e	Q_{tc}	f_3
Variovent sans laine de verre	25,74	86,62	4,53	1,42	1,08	66,00
Variovent avec laine de verre	20,22	81,65	3,17	1,39	0,96	65,30
1 lb, laine de verre	27,77	79,51	4,93	1,40	1,09	60,37
4 lb, laine de verre/Acousta-Stuf	21,96	79,11	3,49	1,33	0,96	63,40

niques augmentent le volume effectif de l'enceinte. L'historique de l'amortissement aperiodique remonte aux enceintes Dynaco A-25 des années soixante. C'est Scan Speak qui fabriqua avec beaucoup de succès l'enceinte A-25, qui était munie d'un Variovent.

La fabrication d'une enceinte à Variovent est facile. Vous découpez simplement un trou de montage dans la face arrière de l'enceinte, puis vous tapissez l'intérieur de celle-ci avec du matériau absorbant, en prenant soin qu'il n'y ait pas d'obstacle entre le Variovent et le haut-parleur de graves. Le constructeur recommande le montage d'un Variovent pour une enceinte allant jusqu'à 50 l, de deux pour un volume jusqu'à 80 l, et de trois au-delà. Afin de se faire une idée pratique des performances de l'amortissement apporté par le Variovent, on mesura un Variovent de Dynaudio pour le comparer avec l'amortissement d'un des matériaux décrit dans le paragraphe 2.8.2. De la même manière, pour la mesure de l'impédance de l'ensemble haut-parleur/enceinte, on utilisa la même procédure, haut-parleur, enceinte, et le même distorsiomètre Audio Precision System 1 qu'auparavant. On fit les mesures, le Variovent monté dans l'enceinte, sans ajouter de laine de verre, puis avec la quantité de laine prescrite (environ 50% du volume interne). Les fichiers du System 1 furent transmis au logiciel LEAP 4.0, convertis en impédance réelle, puis les courbes tracées et reproduites dans la figure 2.67. Trois courbes sont présentées : l'enceinte sans laine de verre et sans Variovent, l'enceinte avec Variovent et sans

laine de verre, et l'enceinte avec laine de verre et Variovent. La routine "calcul automatique des paramètres de l'enceinte" du logiciel LEAP calcula les paramètres de l'enceinte. Le tableau 2.29 compare les mesures du Variovent avec et sans laine de verre, avec les données du tableau 2.21, concernant 50% de remplissage avec de la laine de verre à 16 kg/m^3 (R19), et également le cas d'un mélange de 50% de 64 kg/m^3 avec 50% d'Acoustat Stuff. Les effets du Variovent sont très proches de ceux du remplissage avec un mélange de 50% de 64 kg/m^3 et 50% d'Acoustat Stuff. De cette information on déduit que le Variovent peut être une alternative viable, comparée à d'autres variantes de remplissage. La courbe de réponse en fréquence ne fut pas mesurée, car elle serait environ la même que celle de l'exemple étudié au paragraphe 2.8.2, qui correspond à un remplissage de 50% effectué avec de la laine de verre de type R19.

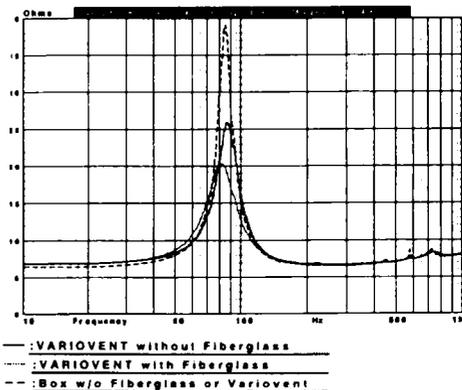


Figure 2.67

Bibliographie

1. **D. B. Weems**, *Closed-Box Speaker System Design*, Popular Electronics, 6-7/73
2. **E. M. Villchur**, *Revolutionary Loudspeaker and Enclosure*, Audio, 10/54
3. **R. Small**, *Direct Radiator Loudspeaker System Analysis*, JAES, 6/72
4. **R. Small**, *Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1, 2*, JAES, 1-2/73
5. **V. Brociner**, *Speaker Size and Performance in Small Cabinets*, Audio, 3/70
6. **L. Beranek**, *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954, p. 226
7. **M. Colloms**, *High-Performance Loudspeakers*, Pentech Press, 1978, 1985
8. **Dr. Richard & C. Cabot**, *Audio Tests and Measurements*, *Audio Engineering Handbook*, revu par K. Blair Benson, 1988, McGraw-Hill Inc.
9. **J. Ashley & T. Saponas**, *Wisdom and Witchcraft of Old Wives' Tales about Woofer Baffles*, JAES, 10/70
10. **H. D. Harwood**, *Some Factors in Loudspeaker Quality*, *Wireless World*, 5/75
11. **R. Small**, *Suitability of Low-Frequency Drivers for Horn Loaded Loudspeaker Systems*, AES publication préliminaire n° 1251
12. **H. J. J. Hoge**, *Switched on Bass*, Audio, 8/76
13. **M. Gander**, *Moving Coil Loudspeaker Topology as an Indicator of Linear Excursion Capability*, JAES, 1/81
14. **K. P. Zacharia**, *On the Syntheses of Closed-Box Systems Using Available Drivers*, JAES, 11/73
15. **D.B. Weems**, *Ten Speaker Enclosure Fallacies*, Popular Electronics 6/76
16. **W. D'Ascenzo**, *The AR-1 Rejuvenated*, *Speaker Builder*, 2/82
17. **L. M. Chase**, *The Thermo-Acoustic Properties of Fibrous Materials*, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 8/74
18. **W.M. Leach**, *Electroacoustic-Analogous Circuit Models for Filled Enclosures*, JAES 7-8/89
19. **A. Carrion-Isbert**, *A New Method of Designing Closed Box Loudspeaker Systems Under the Influence of Enclosure Filling Material*, 75^e convention de l'AES, publication préliminaire n° 2058
20. **Small & Margolis**, *Personal Calculator Program*, JAES, 6/81
21. **W. M. Leach**, *Active Equalization of Closed-Box Loudspeaker Systems*, JAES, 6/81
22. **W.M. Leach**, *A Generalized Active Equalizer for Closed-Box Loudspeaker Systems, Part I – Isolated Filters Driving Second-Order (Closed-Box) Systems*, JAES 7-8/79
23. **V. Staggs**, *Transient-Response Equalization of Sealed-Box Loudspeakers*, JAES, 12/82
24. **Greiner & Schoessow**, *Electronic Equalization of Closed-Box Loudspeakers*, JAES, 3/83
25. **J. E. Benson**, *An Introduction to the Design of Filtered Loudspeaker Systems, Part I – Isolated Filters Driving Second Order (Closed-Box) Systems*, JAES 7-8/79
26. **D. R. Von Recklinghausen**, *Low-Frequency Range Extension of Loudspeakers*, JAES 6/85
27. **Geddes & Clark**, *Passively Assisted Loudspeakers*, 79^e convention de l'AES, publication préliminaire n° 2991
28. **Tom Nousaine**, *A Passively Assisted Woofer System*, *Speaker Builder*, 2/89, p. 16
29. *Voice Coil*, 8/90
30. **Augris & Santens**, *Optimisation des enceintes à charge symétrique*, *L'Audiophile*, n° 23, 1982
31. **J.A. D'Appolito**, *Designing Symmetric Response Bandpass Loudspeakers*, 91^e convention de l'AES, publication préliminaire n° 3205
32. **V. Dickason**, *New Design Software: TopBox*, *Voice Coil*, 6/92.
33. **V. Dickason**, *TopBox Speaker Enclosure Program*, Audio, 6/94.

3 Enceintes acoustiques bass-reflex

3.1 Définition

Une enceinte *bass-reflex* est analogue à un filtre passe-haut ayant une atténuation de 24 dB/octave. Elle est constituée d'un coffret muni d'une ouverture, appelée évent, en forme de tunnel ou de tuyau pour la circulation de l'air entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte [1]. Aux basses fréquences, l'évent contribue considérablement au rayonnement sonore de l'enceinte. Toutefois, il le fait en augmentant la charge acoustique à l'arrière du cône du haut-parleur, réduisant ainsi son mouvement et donc son niveau de sortie. Ainsi, l'évent ne peut émettre vers l'extérieur que l'énergie qui aura été retranchée au haut-parleur de graves. Comme nous le verrons ultérieurement, l'évent émet également des sons parasites. Comparées à des enceintes closes, les enceintes *bass-reflex* présentent plusieurs caractéristiques originales :

A. Une plus faible excursion de cône, au voisinage de la fréquence de résonance de l'enceinte, ce qui augmente la tenue en puissance et abaisse la distorsion d'intermodulation [2]. Cette caractéristique des enceintes *bass-reflex* présente un grand intérêt lors de la composition d'enceintes acoustiques à deux voies. Malheureusement, à des fréquences très inférieures à la fréquence de résonance, de grandes excursions de membrane rendent cette configuration (à deux voies) très sensible aux signaux de très basse fréquence, tels ceux provoqués par un disque voilé. Heureusement, il est facile d'y remédier avec un filtre passe-haut éliminant les infra-sons.

B. Une fréquence de coupure inférieure à celle obtenue en enceinte close avec le même haut-parleur.

C. En théorie, l'utilisation d'un volume identique à celui d'une enceinte close aug-

mente l'efficacité de 3 dB. Même si c'est plutôt secondaire en pratique, le fait que, pour un haut-parleur de graves utilisé en *bass-reflex*, il faille, à moteur identique, une membrane plus légère et une bobine mobile ayant une élongation maximale plus faible, contribue de façon significative à une augmentation de l'efficacité.

D. À l'inverse, les enceintes *bass-reflex* sont beaucoup plus sensibles à un mauvais alignement des paramètres [3]. C'est pourquoi elles sont un peu plus difficiles à réaliser pour l'amateur débutant.

3.2 Historique

La paternité du premier brevet décrivant en détail l'interaction entre un haut-parleur et un évent a été accordée à A.C. Thuras en 1932. Durant les années cinquante, des publications de Locanthi, Beranek, Van Leeuwen, de Bøer, Lyon et Novak développèrent en détail la synthèse du modèle mathématique de filtre passe-haut; équivalent à l'enceinte *bass-reflex*. À partir d'un modèle simplifié, mis au point par Novak, A.N. Thiele publia son article de référence en 1961 (publié à nouveau dans le *JAES*, 1971 [4]). Bien que l'œuvre de A.N. Thiele soit, pour des réalisations concrètes, la plus complète et la plus détaillée, elle ne tient pas systématiquement compte des pertes dues à l'enceinte. En 1969, l'article de Nomura, intitulé *An Analysis of Design Conditions of a bass-reflex Loudspeaker Enclosure for Flat Frequency Response*, donna une description assez détaillée des déformations des courbes de réponse provoquées par les pertes de l'enceinte. En 1973, Richard Small publia sa série d'articles sur les enceintes *bass-reflex* dans le *JAES* [1]. On notera avec intérêt

que Robert Bullock refit une synthèse des tables de calculs de Small et les transforma en tables plus précises et plus faciles à lire [5]. Fréquemment utilisés lorsque l'on parle d'enceintes *bass-reflex*, les noms de « Thiele & Small » ne doivent pourtant pas nous faire oublier, que, malgré l'importance de leur contribution dans ce domaine, leur théorie repose surtout sur l'énorme travail de leurs prédécesseurs.

3.3 Coefficient de surtension Q et réponse de l'enceinte

Comme pour l'enceinte close, la réponse en basse fréquence de l'enceinte *bass-reflex* peut être prédite et modifiée par l'ajustement du coefficient de surtension total Q de l'enceinte. La plus grande différence, par rapport à une enceinte close, réside dans le déroulement de l'étude et de sa réalisation. Avec une enceinte close, vous choisissez une valeur du coefficient Q_{tc} (figure 2.1) puis vous en déduisez le volume interne qui correspond à la réponse recherchée. Les enceintes *bass-reflex*, par contre, sont déterminées par des alignements spécifiques, qui ajustent tous les paramètres de façon à obtenir, pour une fréquence f_3 donnée, une réponse plus ou moins plate ($Q = 1,0$) [4]. En d'autres termes, jamais vous ne pourrez ajuster les paramètres d'une enceinte *bass-reflex* pour obtenir des courbes de réponse avec un coefficient Q_c de 0,7 ou 1,5. Les variations des paramètres, qui créent des augmentations ou des diminutions dans le grave, sont qualifiées de mauvais alignements. Par exemple, la variation de 20% du coefficient Q_s d'un haut-parleur entraîne une variation de niveau de pression sonore (SPL) de 2 à 4 dB [15]. Ce n'est pas la même chose que de faire varier le coefficient Q_c d'une enceinte close de 0,7 à 1,5. Dans les graves, les enceintes *bass-reflex* ont une pente d'atténuation à la fréquence de coupure beaucoup plus raide ; si elles sont mal accordées, leur son

sera détérioré par un traînage important. En fait, le son de tonneau, qui faisait la mauvaise réputation des enceintes *bass-reflex*, était dû, sans aucun doute, à des enceintes particulièrement mal accordées.

3.4 Choix du haut-parleur de graves

Comparés aux haut-parleurs de graves (*woofer* en anglais, « boomer » dans le jargon) qui sont optimisés pour les enceintes closes, les haut-parleurs de graves pour enceintes *bass-reflex* ont généralement une membrane plus légère, une bobine mobile plus courte (car l'excursion en dehors de l'entrefer est plus courte) et un coefficient de surtension général Q_{ts} inférieur. Comme pour les enceintes closes, les enceintes *bass-reflex* peuvent prendre presque toutes les valeurs du coefficient Q_{ts} ; cependant, en règle générale, seules les valeurs situées entre 0,2 et 0,5 donnent des réponses satisfaisantes. Les valeurs aux alentours de 100, que Small suggère pour l'EBP (paragraphe 2.4), donneront de bons résultats pour les enceintes *bass-reflex*. Bien que les fuites puissent jouer un rôle déterminant dans le calcul du volume et dans l'accord de l'enceinte, il est préférable de négliger les problèmes posés par les fuites apparentes de certains haut-parleurs de graves et d'utiliser ceux-ci tels quels. Les cache-noyau poreux, qui provoquent une fuite de l'air qui est à l'intérieur de l'enceinte, sont montés par les fabricants de haut-parleurs de graves pour refroidir la bobine mobile ; les rendre étanches risque de créer encore plus de problèmes qu'ils n'en causent déjà. Les suspensions périphériques souples, constituées de tissu plissé, produiront également des fuites importantes. Aussi longtemps que les paramètres du haut-parleur et les fuites sont correctement mesurés, il n'y a pas lieu d'éviter ce type de suspension, dans la mesure où il correspond à l'usage recherché.

3.5 Alignement des paramètres haut-parleur/enceinte *bass-reflex*

Pour déterminer le volume de l'enceinte, choisissez auparavant un alignement approprié, qui satisfera soit à certains critères de construction de l'enceinte, soit aux limites du haut-parleur de graves que vous avez retenu. Le concept « d'alignement » n'est pas particulièrement difficile à saisir ; un alignement représente une association précise d'un certain nombre de paramètres qui définissent l'enceinte *bass-reflex* (à savoir le volume de l'enceinte et l'ensemble des réglages). Cette association produit une réponse cohérente en fréquence qui sera plus ou moins utilisable (c'est-à-dire plus ou moins plate). Il y a, à ce jour, au moins quinze catégories d'alignements bien définies. Les deux catégories fondamentales sont les alignements actifs et les alignements passifs. Les alignements actifs, décrits en premier lieu par Thiele, exigent une égalisation par filtre électronique pour obtenir la réponse en fréquence recherchée (paragraphe 3.16) [4]. Les alignements passifs ne nécessitent pas une égalisation électronique pour obtenir une réponse définie, ce sont les modèles les plus utilisés par les constructeurs d'enceintes *bass-reflex*. Les alignements passifs se divisent en deux groupes : ceux qui ont une courbe de réponse plate et ceux dont la courbe de réponse n'est pas plate. Le groupe des courbes de réponse plates requiert généralement des valeurs du coefficient Q_s inférieures à 0,4 ; ce groupe est représenté par six catégories :

A. SSB₄

Enceinte alignée, d'ordre 4, « super boom » (*The Super Fourth Order Boom Box*). Il s'agit d'une extension, avec un coefficient Q_s plus faible, de la variante BB₄ de Hoge. D'abord décrite par Bullock [5], la version SSB₄ est caractérisée par un grand volume, un accord plus bas (évent plus long), et une bonne réponse transitoire. Ici le terme de « *Boom Box* » semble un peu déplacé [5].

B. SC₄

Enceinte alignée « sub-Chebychev » d'ordre 4. C'est une variante dont le coefficient Q_s est plus bas que celui de la version Chebychev (C₄). La réponse en fréquence et la fréquence de coupure f_3 sont en gros les mêmes pour cette version que pour SBB₄, mais l'accord de la fréquence de résonance n'est pas identique. Comparée à la version SBB₄, la réponse transitoire de la version SC₄ est un peu dégradée.

C. QB₃

L'alignement d'ordre quasi trois est la version *bass-reflex* la plus communément utilisée, car elle réunit, pour un coefficient Q_s de haut-parleur donné, une enceinte plus petite et une fréquence de coupure plus basse. Sa réponse transitoire n'est pas aussi bonne que la version SBB₄ ou SC₄.

D. Alignements discrets

Il y a trois alignements discrets :

B₄ (Butterworth d'ordre 4)

BE₄ (Bessel d'ordre 4)

IB₄ (Butterworth d'ordre intermédiaire)

Ces alignements reçoivent l'appellation « discrets », car ils n'existent que pour une seule valeur précise du coefficient Q_s . Comme les pertes provenant de l'enceinte affectent les valeurs de l'alignement discret, il est difficile, pour ne pas dire impossible, d'atteindre cet alignement. Des trois alignements, l'alignement BE₄ a la meilleure réponse transitoire.

Les alignements du groupe à courbes moins plates sont obtenus en général avec des valeurs de coefficient Q_s élevées ; ils sont caractérisés par des transitoires et des courbes de réponse moins bonnes. De ce fait, leur emploi en haute-fidélité fut quelque peu limité. Si, dans un cas particulier, leurs défauts sont tolérables, sachez que cette configuration affichera, pour un haut-parleur donné, les valeurs de la fréquence de coupure f_3 les plus faibles :

A. C₄

L'alignement de type Chebychev, à ondulation constante, est valable pour de faibles ondulations, inférieures à 1 dB. La première description a été faite par van Leeuwen en 1956 (page 364 de [1] pour la référence).

B. BB₄

L'enceinte surnommée *Boom Box*, d'ordre 4, fut décrite en premier lieu par Hoge [6]. Sa dénomination provient de sa bosse dans la courbe de réponse qui, placée juste avant la coupure dans le grave, lui confère, si elle est trop grande, le même défaut indésirable que celui des enceintes closes ayant un coefficient Q_{tc} élevé, de 1,2 et plus.

C. SQB₃

La variante d'ordre trois du type quasi Butterworth (*The Super Third-Order Quasi-Butterworth*) est une extension à coefficient Q_{ts} élevé, du groupe à alignement QB₃. Il fut décrit par R. Bullock dans *Speaker Builder* (3 / 81).

La simulation par ordinateur permet de comparer les six versions. Deux haut-parleurs de graves furent utilisés : un haut-parleur de graves de 30 cm (12") avec un coefficient Q_s de 0,3 pour un alignement linéaire du type SBB₄, SC₄ et QB₃ ; puis un haut-parleur de graves de 25 cm (10") avec un coefficient Q_s de 0,5 pour des alignements non linéaires du type SQB₃, BB₄ et C₄ (les alignements discrets, vu leur nature particulière et limitée, ne sont pas représentés). Bien que ces simulations représentent des performances de haut-parleurs particuliers, on peut néanmoins poser des conclusions générales quant aux types de réponses. Les différents paramètres des enceintes sont comparés dans le tableau 2.0 (l'angle de phase à -3 dB ne sera pas utilisé comme repère pour les enceintes *bass-reflex*, car il ne se rapporte pas aussi facilement à un alignement donné qu'avec les coefficients Q_c des enceintes closes). Les données du groupe à alignement linéaire, qui figurent dans le tableau 3.0, montrent une pente d'atténuation

Tableau 3.0

alignement type	V_b	f_b	f_3	pente db/oct.
alignement à courbe de réponse plate				
SBB ₄	2,7	25 Hz	36 Hz	18
SC ₄	2,4	27 Hz	36 Hz	19
QB ₃	2,0	31 Hz	36 Hz	20
alignement à courbe de réponse non plate				
SQB ₃	7,6	30 Hz	34 Hz	27
BB ₄	2,8	37 Hz	30 Hz	30
C ₄	5,3	30 Hz	27 Hz	30

à la fréquence de coupure qui est environ la même pour tous les trois types d'alignement (du moins pour ce haut-parleur de graves). La différence figure dans une coupure un peu moins raide de l'alignement SBB₄, qui, de ce fait, a une réponse transitoire un peu meilleure. Toutefois, les compromis se font lors du choix du volume de l'enceinte. Les courbes des simulations de l'alignement linéaire sont présentées dans la figure 3.1 à 3.5. Les courbes de réponse et de phase dans la figure 3.1 sont très groupées, l'atténuation dans le grave suit typiquement une forte pente, de l'ordre de 18 à 20 dB/octave. L'observation des courbes de retard de groupe de la figure 3.2 montre que la forme des trois courbes est similaire à la forme d'une courbe d'une enceinte close ayant un coefficient Q_c de 0,9, mais dont les délais de retard de groupe ont des valeurs bien plus élevées. La performance transitoire des meilleures enceintes *bass-reflex* reste inférieure à celle des meilleures enceintes closes, et les différences sont certainement audibles [15]. Cependant, il n'en reste pas moins que certaines enceintes *bass-reflex* ont obtenu de bons comptes rendus de tests dans la presse spécialisée ; le public les a aimées, et elles ont fait la fortune de leur fabricant. Des trois alignements du groupe linéaire, le type QB₃ est certainement le meilleur choix, car il a

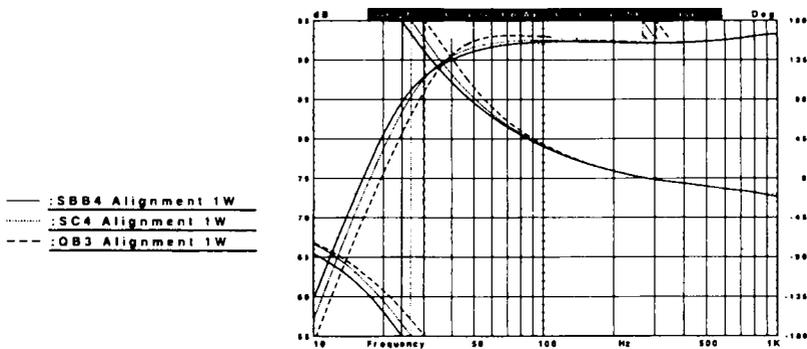


Figure 3.1

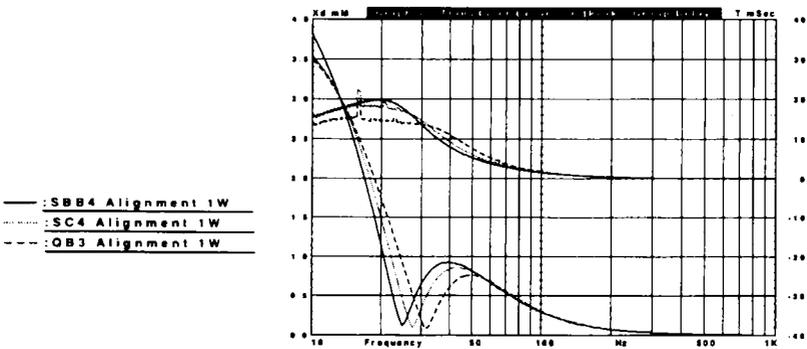


Figure 3.2

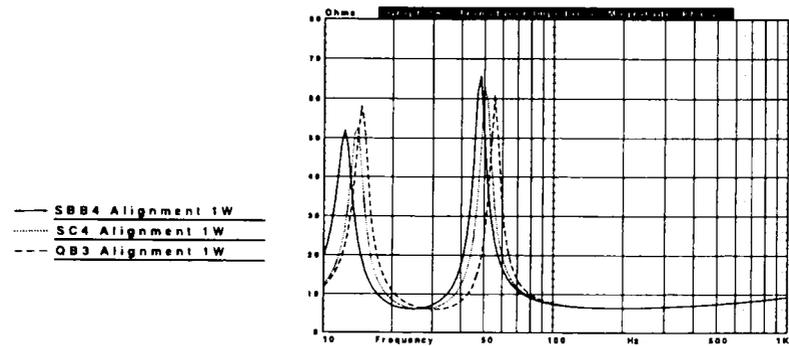


Figure 3.3

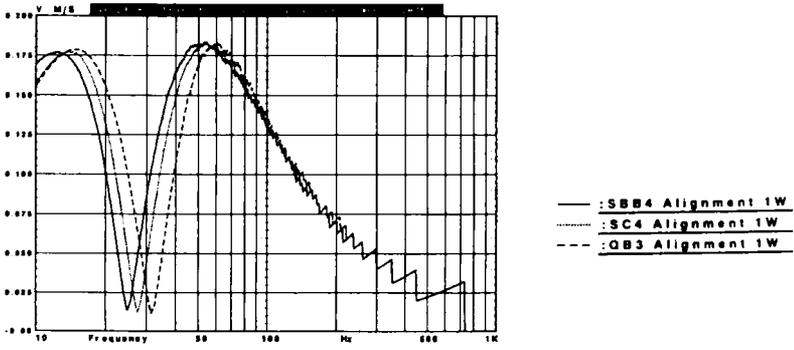


Figure 3.4

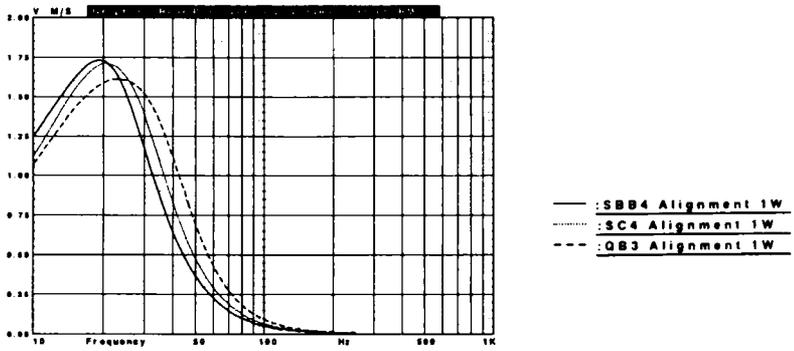


Figure 3.5

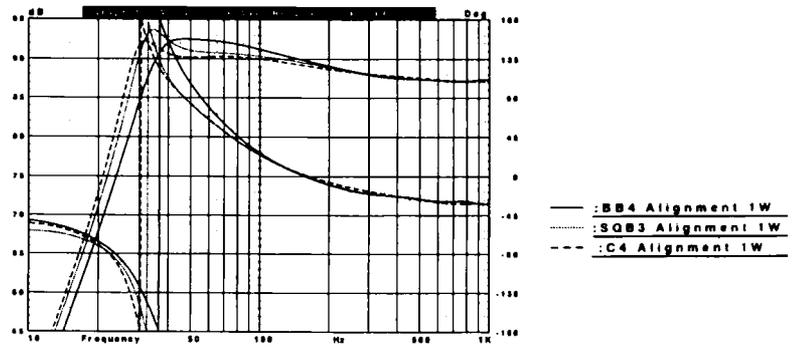


Figure 3.6

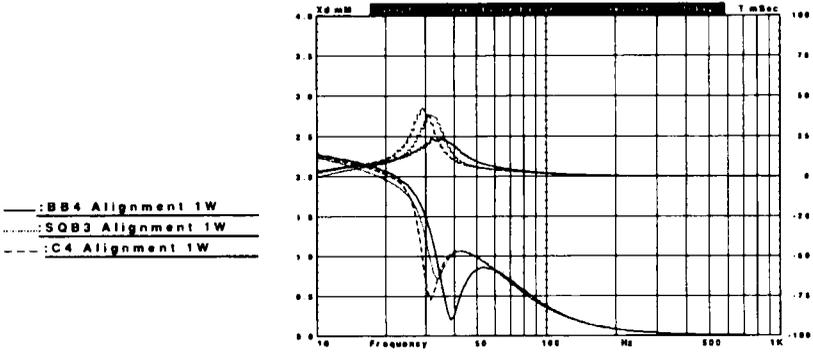


Figure 3.7

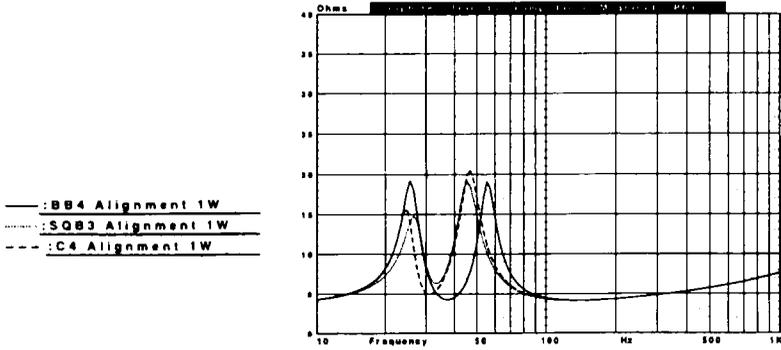


Figure 3.8

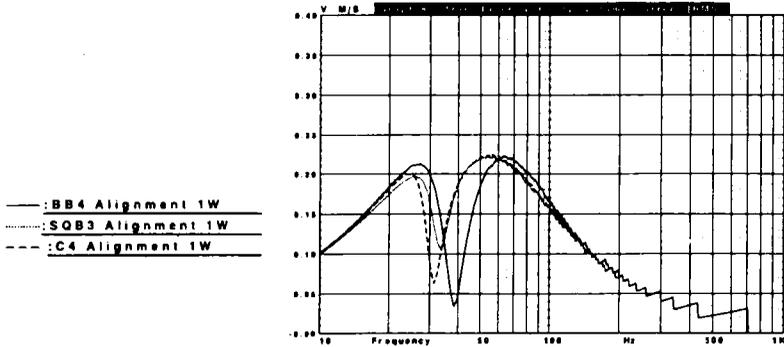


Figure 3.9

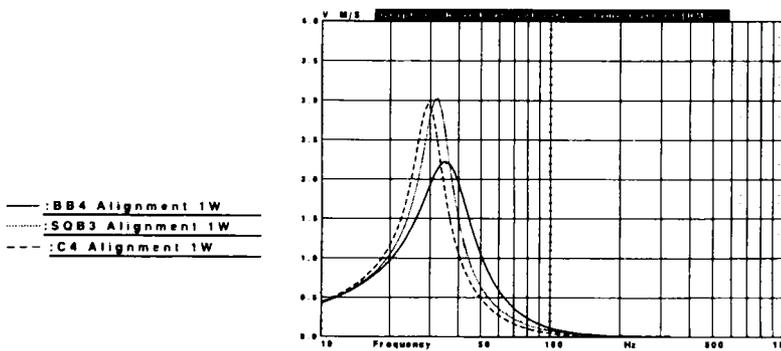


Figure 3.10

la même fréquence f_3 et la même réponse transitoire que les deux autres du groupe, tout en ayant l'enceinte la plus petite [16].

Les courbes de la figure 3.2 illustrent l'avantage principal des enceintes *bass-reflex*, à savoir la faible excursion de la membrane. Au-dessus de la fréquence d'accord, l'excursion de la membrane est bien inférieure à celle d'une enceinte close, ce qui implique également une distorsion plus faible. Cet avantage est aussi l'un des problèmes les plus importants, car l'excursion augmente rapidement en dessous de la fréquence d'accord f_b et continue de s'accroître vers le domaine infra-sonore. Ceci provoque des problèmes d'excursion de membrane avec des messages sonores contenant des signaux de très basses fréquences et des bruits infra-sonores, comme le bruit de fond en basse fréquence des disques voilés (*rumble*) (paragraphe 3.12). La figure 3.3 compare les courbes d'impédance : elles sont les mêmes pour tous les trois alignements. La vitesse de la bobine mobile, représentée en figure 3.4, montre que les points d'accélération des haut-parleurs de graves coïncident en gros avec les points d'impédance ; il en est de même pour les minima. La vitesse d'évent, c'est-à-dire la vitesse de l'air dans l'évent, est décrite dans la figure 3.5. La vitesse est maximale aux alentours de la fréquence f_b .

Les alignements non-linéaires, pour des haut-parleurs de graves à coefficient Q plus élevé, présentés dans les figures 3.6 à 3.10, affichent des performances quelque peu différentes. En observant les courbes de réponse de la figure 3.6, on s'aperçoit que la forme générale des courbes change en fonction des différents types d'alignement. L'alignement de type BB4 est similaire au groupe d'alignement linéaire pour ce qui est du volume de l'ébénisterie et de la fréquence f_3 mais il est moins bien amorti et affecté d'une pente d'atténuation à la fréquence de coupure plus raide. Bien que des haut-parleurs de graves, caractérisés par un coefficient de surtension Q plus élevé, soient susceptibles de fonctionner dans une enceinte *bass-reflex*, leur performance en régime transitoire laisserait bien à désirer. Les autres alignements de type C4 et SQB3 donneront des fréquences de coupure f_3 très basses, mais nécessiteront, de ce fait, des enceintes plutôt grandes au regard de la taille du haut-parleur de graves. Les courbes de retard de groupe de la figure 3.7 confirment la dégradation des performances transitoires de cette famille d'alignements qui utilise des haut-parleurs de graves à coefficient Q élevé. Sur la même figure, l'excursion de membrane donne un résultat similaire à celui des alignements linéaires : il est bon au-dessus de f_b , très délicat en dessous de f_b . La figure 3.8 compare les courbes d'impédance. La valeur

minimale de l'impédance à la fréquence f_b est plus élevée que la valeur des alignements plus amortis que sont C_4 et SQB_3 . La figure 3.9 montre que les courbes de vitesse du cône ont leur maximum en amplitude à environ les mêmes fréquences, f_L et f_H que celles des impédances (figure 3.32) ; il en est de même pour le minimum de la vitesse du cône et celui de l'impédance. La vitesse à l'intérieur de l'évent de la figure 3.10 a son maximum aux alentours de la fréquence f_b .

3.6 Calcul du volume de l'enceinte et des principaux paramètres

La détermination du volume de l'enceinte *bass-reflex* est un peu plus complexe que la détermination du volume d'une enceinte close. Tout d'abord, procurez-vous pour le haut-parleur de graves les valeurs des paramètres suivants :

- f_s fréquence de résonance à l'air libre en Hz
- Q_{ts} coefficient de surtension total du haut-parleur de graves, incluant toutes les résistances séries
- V_{as} volume d'air équivalent à la compliance du haut-parleur de graves en m^3
- X_{max} longueur de bobine mobile dépassant de l'entrefer en mm
- S_d surface effective de rayonnement du haut-parleur de graves en m^2
- V_d volume d'air déplacé = $S_d \cdot X_{max}$ en m^3

Vous pouvez obtenir les trois derniers paramètres auprès du fabricant de haut-parleurs. Reportez-vous au chapitre 9, Enceintes acoustiques et mesures, pour appliquer la bonne méthode de calcul des trois premiers paramètres. Même si vous décidez d'utiliser les données publiées pour f_s , Q_{ts} et V_{as} , n'oubliez pas d'inclure les résistances séries que vous connaissez dans la valeur du coefficient

Q_{ts} (c'est faisable quand le coefficient Q_s est accompagné des coefficients Q_{es} et Q_{ms}).

La façon la plus pratique pour faire les différents calculs est de construire un tableau de données numériques, comme dans le cas des enceintes closes. Rassemblez-y toutes les données concernant les trois alignements linéaires. En observant les tableaux 3.1 à 3.10, vous remarquerez trois groupes de trois tableaux, plus un tableau pour les alignements discrets [5]. Plus précisément : les tableaux 3.1 à 3.3 pour SBB_4 et BB_4 , les tableaux 3.4 à 3.6 pour QB_3 et SQB_3 , les tableaux 3.7 à 3.9 pour SC_4 et C_4 , enfin le tableau 3.10 pour les alignements discrets. Les trois tableaux, concernant chaque couple d'alignements (linéaire et non-linéaire), correspondent aux différents niveaux de pertes du boîtier ou au coefficient Q_L .

3.6.1 Pertes provenant du coffret

Trois types de pertes peuvent affecter le calcul final du volume de l'enceinte et l'accord de son événement : la fuite (Q_L), l'absorption (provenant du matériau amortissant) (Q_A) et les pertes de l'évent (Q_P). La perte totale (Q_B) pour toute enceinte *bass-reflex* est constituée des trois pertes séparées et se calcule ainsi :

$$\frac{1}{Q_B} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_A} + \frac{1}{Q_P}$$

Dans la pratique, on constate que les coefficients Q_A et Q_P ont tendance à être si faibles qu'on les néglige. On veillera toutefois à ce que les événements ne soient pas obstrués et qu'un minimum de matériau absorbant (2,5 cm) recouvre les parois internes de l'enceinte. Comme ce sont les fuites d'air qui dominent, ce sont les seules dont on tient compte dans les différents tableaux de calculs. La figure 3.11 montre les effets que ces différents niveaux de fuites peuvent avoir sur la réponse en fréquence d'un ensemble haut-parleur de graves / alignement donné. Mais comme ces pertes sont toutes imprévisibles, il

Tableau 3.1 : $Q_L = 3$, SBB_4 et BB_4

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	pic* dB
0,2000	1,0000	5,4444	3,5401	0
0,2100	1,0000	4,9031	3,3255	0
0,2200	1,0000	4,4355	3,1280	0
0,2300	1,0000	4,0290	2,9454	0
0,2400	1,0000	3,6736	2,7761	0
0,2500	1,0000	3,3611	2,6186	0
0,2600	1,0000	3,0850	2,4718	0
0,2700	1,0000	2,8399	2,3347	0
0,2800	1,0000	2,6213	2,2068	0
0,2900	1,0000	2,4257	2,0873	0
0,3000	1,0000	2,2500	1,9759	0
0,3100	1,0000	2,0916	1,8724	0
0,3200	1,0000	1,9484	1,7763	0
0,3300	1,0000	1,8114	1,6876	0
0,3400	1,0000	1,7002	1,6068	0
0,3500	1,0000	1,5924	1,5313	0
0,3600	1,0000	1,4938	1,4632	0
0,3700	1,0000	1,4035	1,4014	0
0,3800	1,0000	1,3205	1,3450	0
0,3900	1,0000	1,2441	1,2952	0
0,4000	1,0000	1,1736	1,2499	0
0,4100	1,0000	1,1085	1,2091	0,01
0,4200	1,0000	1,0482	1,1724	0,05
0,4300	1,0000	0,9923	1,1394	0,12
0,4400	1,0000	0,9403	1,1098	0,20
0,4500	1,0000	0,8920	1,0828	0,30
0,4600	1,0000	0,8469	1,0589	0,41
0,4700	1,0000	0,8049	1,0365	0,53
0,4800	1,0000	0,7656	1,0165	0,66
0,4900	1,0000	0,7289	0,9983	0,79
0,5000	1,0000	0,6944	0,9815	0,93
0,5100	1,0000	0,6621	0,9663	1,08
0,5200	1,0000	0,6318	0,9520	1,23
0,5300	1,0000	0,6033	0,9394	1,38
0,5400	1,0000	0,5765	0,9275	1,54
0,5500	1,0000	0,5512	0,9165	1,70
0,5600	1,0000	0,5274	0,9068	1,86
0,5700	1,0000	0,5048	0,8968	2,02
0,5800	1,0000	0,4836	0,8880	2,18
0,5900	1,0000	0,4635	0,8797	2,34
0,6000	1,0000	0,4444	0,8720	2,50
0,6100	1,0000	0,4264	0,8649	2,66
0,6200	1,0000	0,4093	0,8581	2,82
0,6300	1,0000	0,3931	0,8518	2,98
0,6400	1,0000	0,3777	0,8458	3,14
0,6500	1,0000	0,3631	0,8402	3,30
0,6600	1,0000	0,3492	0,8349	3,46
0,6700	1,0000	0,3359	0,8299	3,61
0,6800	1,0000	0,3233	0,8252	3,77
0,6900	1,0000	0,3113	0,8207	3,92
0,7000	1,0000	0,2999	0,8165	4,08

* niveau en dB du pic de résonance

Tableau 3.2 : $Q_L = 7$, SBB_4 et BB_4

Q_{ts}	H	α	f_3/f_{st}	pic* dB
0,2000	1,0000	5,8980	3,3686	0
0,2100	1,0000	5,3339	3,1518	0
0,2200	1,0000	4,8457	2,9521	0
0,2300	1,0000	4,4204	2,7674	0
0,2400	1,0000	4,0478	2,5960	0
0,2500	1,0000	3,7114	2,4366	0
0,2600	1,0000	3,4286	2,2883	0
0,2700	1,0000	3,1699	2,1503	0
0,2800	1,0000	2,9388	2,0220	0
0,2900	1,0000	2,7315	1,9031	0
0,3000	1,0000	2,5448	1,7932	0
0,3100	1,0000	2,3761	1,6922	0
0,3200	1,0000	2,2233	1,6000	0
0,3300	1,0000	2,0843	1,5162	0
0,3400	1,0000	1,9576	1,4406	0
0,3500	1,0000	1,8419	1,3728	0
0,3600	1,0000	1,7357	1,3122	0
0,3700	1,0000	1,6392	1,2583	0
0,3800	1,0000	1,5484	1,2104	0,01
0,3900	1,0000	1,4656	1,1679	0,06
0,4000	1,0000	1,3890	1,1302	0,14
0,4100	1,0000	1,3181	1,0966	0,24
0,4200	1,0000	1,2523	1,0667	0,37
0,4300	1,0000	1,1911	1,0399	0,51
0,4400	1,0000	1,1341	1,0160	0,66
0,4500	1,0000	1,0809	0,9944	0,82
0,4600	1,0000	1,0313	0,9750	1,00
0,4700	1,0000	0,9849	0,9574	1,17
0,4800	1,0000	0,9414	0,9415	1,36
0,4900	1,0000	0,9006	0,9270	1,55
0,5000	1,0000	0,8622	0,9137	1,74
0,5100	1,0000	0,8262	0,9015	1,93
0,5200	1,0000	0,7923	0,8904	2,13
0,5300	1,0000	0,7603	0,8801	2,33
0,5400	1,0000	0,7302	0,8706	2,53
0,5500	1,0000	0,7017	0,8619	2,73
0,5600	1,0000	0,6747	0,8537	2,93
0,5700	1,0000	0,6493	0,8462	3,13
0,5800	1,0000	0,6251	0,8391	3,33
0,5900	1,0000	0,6022	0,8325	3,53
0,6000	1,0000	0,5805	0,8264	3,73
0,6100	1,0000	0,5599	0,8206	3,93
0,6200	1,0000	0,5403	0,8152	4,12
0,6300	1,0000	0,5216	0,8102	4,32
0,6400	1,0000	0,6038	0,8054	4,51
0,6500	1,0000	0,486	0,8009	4,70
0,6600	1,0000	0,4708	0,7967	4,90
0,6700	1,0000	0,4554	0,7926	5,09
0,6800	1,0000	0,4407	0,7889	5,27
0,6900	1,0000	0,4267	0,7853	5,46
0,7000	1,0000	0,4133	0,7819	5,65

* niveau en dB du pic de résonance

Tableau 3.3 : $Q_L = 15$, SBB_4 et BB_4

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	pic* dB
0,2000	1,0000	6,0844	3,2996	0
0,2100	1,0000	5,5113	3,0818	0
0,2200	1,0000	5,0149	2,8811	0
0,2300	1,0000	4,5821	2,6955	0
0,2400	1,0000	4,2025	2,5233	0
0,2500	1,0000	3,8678	2,3633	0
0,2600	1,0000	3,5711	2,2146	0
0,2700	1,0000	3,3070	2,0764	0
0,2800	1,0000	3,0708	1,9483	0
0,2900	1,0000	2,8588	1,0301	0
0,3000	1,0000	2,6678	1,7214	0
0,3100	1,0000	2,4650	1,6222	0
0,3200	1,0000	2,3384	1,5323	0
0,3300	1,0000	2,1958	1,4514	0
0,3400	1,0000	2,0357	1,3790	0
0,3500	1,0000	1,9467	1,3146	0
0,3600	1,0000	1,8375	1,2576	0
0,3700	1,0000	1,7372	1,2071	0,01
0,3800	1,0000	1,6447	1,1626	0,07
0,3900	1,0000	1,5593	1,1233	0,16
0,4000	1,0000	1,4803	1,0886	0,27
0,4100	1,0000	1,4070	1,0577	0,41
0,4200	1,0000	1,3390	1,0303	0,57
0,4300	1,0000	1,2757	1,0050	0,73
0,4400	1,0000	1,2167	0,9840	0,91
0,4500	1,0000	1,1616	0,9643	1,10
0,4600	1,0000	1,1101	0,9466	1,30
0,4700	1,0000	1,0619	0,9305	1,50
0,4800	1,0000	1,0167	0,9160	1,71
0,4900	1,0000	0,9743	0,9027	1,91
0,5000	1,0000	0,9344	0,8906	2,13
0,5100	1,0000	0,8969	0,8795	2,34
0,5200	1,0000	0,8616	0,8696	2,56
0,5300	1,0000	0,8282	0,8590	2,78
0,5400	1,0000	0,7967	0,8513	2,99
0,5500	1,0000	0,7670	0,8432	3,21
0,5600	1,0000	0,7388	0,8358	3,43
0,5700	1,0000	0,7121	0,8289	3,65
0,5800	1,0000	0,6868	0,8224	3,86
0,5900	1,0000	0,6628	0,8164	4,08
0,6000	1,0000	0,6400	0,8108	4,29
0,6100	1,0000	0,6183	0,8055	4,51
0,6200	1,0000	0,5977	0,8006	4,72
0,6300	1,0000	0,5781	0,7959	4,93
0,6400	1,0000	0,5594	0,7916	5,14
0,6500	1,0000	0,415	0,7874	5,35
0,6600	1,0000	0,5245	0,7836	5,55
0,6700	1,0000	0,5083	0,7799	5,76
0,6800	1,0000	0,4927	0,7764	5,96
0,6900	1,0000	0,4779	0,7731	6,16
0,7000	1,0000	0,4637	0,7700	6,36

* niveau en dB du pic de résonance

Tableau 3.4 : $Q_L = 3$, QB_3 et SQB_3

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	pic* dB
0,1000	4,3303	31,2904	5,6709	0
0,1100	3,9371	25,6824	5,1456	0
0,1200	3,6096	21,4169	4,7069	0
0,1300	3,3325	18,0974	4,3348	0
0,1400	3,0950	15,4635	4,0150	0
0,1500	2,8892	13,3386	3,7371	0
0,1600	2,0792	11,5994	3,4932	0
0,1700	2,5504	10,1581	3,2772	0
0,1800	2,4092	08,9502	3,0844	0
0,1900	2,2830	07,9280	2,9113	0
0,2000	2,1694	07,0552	2,7548	0
0,2100	2,0666	06,3041	2,6125	0
0,2200	1,9733	05,6531	2,4824	0
0,2300	1,8881	05,0851	2,3630	0
0,2400	1,8100	04,5866	2,2528	0
0,2500	1,7381	04,1467	2,1508	0
0,2600	1,6719	03,7566	2,0559	0
0,2700	1,6105	03,4090	1,9674	0
0,2800	1,5536	03,0980	1,8845	0
0,2900	1,5006	02,8186	1,8065	0
0,3000	1,4512	02,5666	1,7331	0
0,3100	1,4050	02,3386	1,6636	0
0,3200	1,3617	02,1317	1,5978	0
0,3300	1,3210	01,9432	1,5351	0
0,3400	1,2828	01,7712	1,4754	0
0,3500	1,2467	01,6136	1,4183	0
0,3600	1,2127	01,4690	1,3636	0
0,3700	1,1806	01,3360	1,3110	0
0,3800	1,1501	01,2133	1,2605	0
0,3900	1,1213	01,0999	1,2118	0
0,4000	1,0939	0,9949	1,1649	0
0,4100	1,0679	0,8974	1,1198	0
0,4200	1,0431	0,8069	1,0763	0
0,4300	1,0195	0,7225	1,0346	0
0,4400	0,9970	0,6439	0,9947	0
0,4500	0,9755	0,5704	0,9568	0
0,4600	0,9550	0,5016	0,9210	0,02
0,4700	0,9354	0,4672	0,8875	0,06
0,4800	0,9166	0,3767	0,8563	0,14
0,4900	0,8986	0,3199	0,8276	0,27
0,5000	0,8813	0,2665	0,8014	0,45
0,5100	0,8647	0,2161	0,7775	0,70
0,5200	0,8488	0,1686	0,7558	1,00
0,5300	0,8336	0,1238	0,7363	1,36
0,5400	0,8189	0,0814	0,7186	1,77
0,550	0,8047	0,0413	0,7027	2,25
0,5600	0,7911	0,0033	0,6883	2,78

* niveau en dB du pic de résonance

Tableau 3.5 : $Q_L = 7$, QB_3 et SQB_3

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	pic* dB
0,1000	3,8416	34,3925	5,2233	0
0,1100	3,4947	28,2341	4,7386	0
0,1200	3,2058	23,5499	4,3337	0
0,1300	2,9615	19,9046	3,9902	0
0,1400	2,7525	17,0150	3,6949	0
0,1500	2,5712	14,6784	3,4381	0
0,1600	2,4129	12,7685	3,2126	0
0,1700	2,2743	11,1855	3,0128	0
0,1800	2,1495	9,8589	2,8345	0
0,1900	2,0388	8,7361	2,6741	0
0,2000	1,9393	7,7775	2,5289	0
0,2100	1,8494	6,9524	2,3968	0
0,2200	1,7678	6,2372	2,2759	0
0,2300	1,6935	5,6132	2,1647	0
0,2400	1,6254	5,0655	2,0620	0
0,2500	1,5629	4,5822	1,9667	0
0,2600	1,5054	4,1535	1,8778	0
0,2700	1,4522	3,7714	1,7946	0
0,2800	1,4029	3,4295	1,7165	0
0,2900	1,3571	3,1223	1,6429	0
0,3000	1,3145	2,8421	1,5732	0
0,3100	1,2748	2,5944	1,5070	0
0,3200	1,2376	2,3667	1,4439	0
0,3300	1,2028	2,1594	1,3836	0
0,3400	1,1702	1,9699	1,3258	0
0,3500	1,1395	1,7964	1,2702	0
0,3600	1,1106	1,6371	1,2167	0
0,3700	1,0834	1,4905	1,1651	0
0,3800	1,0578	1,3552	1,1153	0
0,3900	1,0335	1,2300	1,0674	0
0,4000	1,0106	1,1141	1,0214	0
0,4100	0,9889	1,0065	0,9776	0
0,4200	0,9683	0,9064	0,9362	0,01
0,4300	0,9488	0,8131	0,8975	0,05
0,4400	0,9303	0,7260	0,8618	0,14
0,4500	0,9128	0,6445	0,8294	0,31
0,4600	0,8961	0,5682	0,8001	0,56
0,4700	0,8802	0,4966	0,7741	0,90
0,4800	0,8651	0,4294	0,7510	1,32
0,4900	0,8507	0,3661	0,7307	1,85
0,5000	0,8370	0,3065	0,7129	2,46
0,5100	0,8240	0,2503	0,6972	3,18
0,5200	0,8116	0,1971	0,6835	4,01
0,5300	0,7998	0,1468	0,6715	4,97
0,5400	0,7886	0,0992	0,6610	6,08
0,5500	0,7779	0,0540	0,6518	7,36
0,5600	0,7677	0,0111	0,6438	8,87

* niveau en dB du pic de résonance

Tableau 3.6 : $Q_L = 15$, QB_3 et SQB_3

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	pic* dB
0,1000	3,6841	35,4793	5,0715	0
0,1100	3,3494	29,1286	4,6004	0
0,1200	3,0732	24,2984	4,2069	0
0,1300	2,8398	20,5392	3,8730	0
0,1400	2,6400	17,5563	3,5859	0
0,1500	2,4670	15,1498	3,3362	0
0,1600	2,3158	13,1802	3,1169	0
0,1700	2,1826	11,5478	2,9225	0
0,1800	2,0644	10,1797	2,7488	0
0,1900	1,9589	9,0218	2,5926	0
0,2000	1,8640	8,0331	2,4512	0
0,2100	1,7784	7,1822	2,3225	0
0,2200	1,7007	6,4446	2,2045	0
0,2300	1,6299	5,8010	2,0960	0
0,2400	1,5652	5,2361	1,9956	0
0,2500	1,5058	4,7375	1,9023	0
0,2600	1,4512	4,2952	1,8153	0
0,2700	1,4007	3,9011	1,7338	0
0,2800	1,3540	3,5484	1,6571	0
0,2900	1,3106	3,2314	1,5846	0
0,3000	1,2703	2,9455	1,5159	0
0,3100	1,2327	2,6867	1,4504	0
0,3200	1,1976	2,4517	1,3880	0
0,3300	1,1648	2,2376	1,3281	0
0,3400	1,1341	2,0420	1,2705	0
0,3500	1,1052	1,8629	1,2151	0
0,3600	1,0781	1,6983	1,1615	0
0,3700	1,0526	1,5468	1,1099	0
0,3800	1,0286	1,4070	1,0602	0
0,3900	1,0059	1,2777	1,0125	0
0,4000	0,9845	1,1579	0,9672	0
0,4100	0,9643	1,0466	0,9245	0,02
0,4200	0,9452	0,9430	0,8849	0,08
0,4300	0,9272	0,8464	0,8488	0,21
0,4400	0,9101	0,7562	0,8162	0,43
0,4500	0,8939	0,6719	0,7872	0,76
0,4600	0,8786	0,5928	0,7618	1,18
0,4700	0,8641	0,5185	0,7395	1,72
0,4800	0,8503	0,4488	0,7202	2,36
0,4900	0,8373	0,3830	0,7034	3,13
0,5000	0,8249	0,3211	0,6889	4,04
0,5100	0,8132	0,2625	0,6764	5,09
0,5200	0,8021	0,2072	0,6656	6,33
0,5300	0,7916	0,1547	0,6560	7,79
0,5400	0,7817	0,1050	0,6483	9,56
0,5500	0,7723	0,0577	0,6416	11,80
0,5600	0,7635	0,0128	0,6359	14,70

* niveau en dB du pic de résonance

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	ond* dB
0,2500	1,0093	3,4080	2,6083	0
0,2600	1,0322	3,2301	2,4391	0
0,2700	1,0529	3,0516	2,2860	0
0,2800	1,0703	2,8731	2,1473	0
0,2900	1,0871	2,6952	2,0217	0
0,3000	1,1004	2,5188	1,9078	0
0,3100	1,1109	2,3447	1,8042	0
0,3200	1,1187	2,1738	1,7097	0
0,3300	1,1236	2,0069	1,6232	0
0,3400	1,1255	1,8448	1,5437	0
0,3500	1,1244	1,6885	1,4703	0
0,3600	1,1203	1,5387	1,4023	0
0,3700	1,1133	1,3961	1,3390	0
0,3800	1,1034	1,2616	1,2798	0
0,3900	1,0909	1,1356	1,2244	0
0,4000	1,0758	1,0187	1,1723	0
0,4100	1,0586	0,9110	1,1236	0
0,4200	1,0394	0,8128	1,0778	0
0,4300	1,0188	0,7238	1,0348	0
0,4400	0,9970	0,6439	0,9947	0
0,4500	0,9744	0,5726	0,9572	0
0,4600	0,9515	0,5093	0,9222	0
0,4700	0,9286	0,4533	0,8898	0
0,4800	0,9059	0,4040	0,8597	0
0,4900	0,8837	0,3605	0,8318	0
0,5000	0,8621	0,3223	0,8060	0,01
0,5100	0,8412	0,2885	0,7822	0,02
0,5200	0,8212	0,2586	0,7601	0,02
0,5300	0,8021	0,2321	0,7397	0,03
0,5400	0,7838	0,2084	0,7208	0,05
0,5500	0,7664	0,1872	0,7033	0,06
0,5600	0,7499	0,1681	0,6871	0,08
0,5700	0,7341	0,1508	0,6720	0,10
0,5800	0,7192	0,1350	0,6579	0,12
0,5900	0,7049	0,1205	0,6447	0,14
0,6000	0,6913	0,1072	0,6324	0,17
0,6100	0,6784	0,0984	0,6209	0,20
0,6200	0,6661	0,0832	0,6101	0,23
0,6300	0,6543	0,0723	0,5999	0,26
0,6400	0,6430	0,0630	0,5906	0,29
0,6500	0,6322	0,0524	0,5812	0,32
0,6600	0,6218	0,0431	0,5726	0,35
0,6700	0,6118	0,0343	0,564	0,39
0,6800	0,6022	0,0258	0,5567	0,42
0,6900	0,5929	0,0175	0,5493	0,46
0,7000	0,5840	0,0096	0,5423	0,50

* niveau d'ondulations en dB

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	ond* dB
0,2500	1,0338	3,8961	2,3949	0
0,2600	1,0534	3,6755	2,2282	0
0,2700	1,0703	3,4551	2,0784	0
0,2800	1,0842	3,2360	1,9439	0
0,2900	1,0951	3,0193	1,8229	0
0,3000	1,1028	2,8062	1,7137	0
0,3100	1,1073	2,5977	1,6149	0
0,3200	1,1086	2,3952	1,5251	0
0,3300	1,1065	2,1997	1,4431	0
0,3400	1,1012	2,0125	1,3679	0
0,3500	1,0926	1,8347	1,2986	0
0,3600	1,0810	1,6672	1,2345	0
0,3700	1,0667	1,5109	1,1751	0
0,3800	1,0498	1,3665	1,1200	0
0,3900	1,0309	1,2343	1,0689	0
0,4000	1,0103	1,1146	1,0215	0
0,4100	0,9886	1,0070	0,9777	0
0,4200	0,9662	0,9113	0,9373	0
0,4300	0,9436	0,8266	0,9001	0
0,4400	0,8212	0,7521	0,8660	0
0,4500	0,8992	0,6868	0,8348	0,01
0,4600	0,8780	0,6297	0,8064	0,01
0,4700	0,8578	0,5798	0,7804	0,02
0,4800	0,8385	0,5361	0,7567	0,03
0,4900	0,8203	0,4978	0,7351	0,05
0,5000	0,8031	0,4642	0,7155	0,07
0,5100	0,7870	0,4345	0,6975	0,09
0,5200	0,7719	0,4083	0,6810	0,12
0,5300	0,7578	0,3849	0,6659	0,15
0,5400	0,7445	0,3640	0,6620	0,19
0,5500	0,7321	0,3453	0,6393	0,23
0,5600	0,7205	0,3284	0,6275	0,27
0,5700	0,7096	0,3131	0,6166	0,31
0,5800	0,6993	0,2992	0,6065	0,36
0,5900	0,6896	0,2865	0,5971	0,41
0,6000	0,6805	0,2749	0,5883	0,46
0,6100	0,6719	0,2641	0,5802	0,51
0,6200	0,6638	0,2542	0,5726	0,57
0,6300	0,6561	0,2449	0,5654	0,63
0,6400	0,6488	0,2363	0,5587	0,68
0,6500	0,6418	0,2283	0,5524	0,74
0,6600	0,6353	0,2208	0,5465	0,80
0,6700	0,6289	0,2136	0,5409	0,89
0,6800	0,6229	0,2069	0,5355	0,92
0,6900	0,6171	0,2006	0,5305	0,98
0,7000	0,6116	0,1946	0,5258	1,05

* niveau d'ondulations en dB

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	ond* dB
0,2500	1,0420	4,0890	2,3097	0
0,2600	1,0601	3,8500	2,1477	0
0,2700	1,0751	3,6119	1,9970	0
0,2800	1,0871	3,3757	1,8647	0
0,2900	1,0958	3,1429	1,7460	0
0,3000	1,1011	2,9147	1,6391	0
0,3100	1,1031	2,6924	1,5426	0
0,3200	1,1016	2,4774	1,4549	0
0,3300	1,0966	2,2711	1,3749	0
0,3400	1,0884	2,0748	1,3016	0
0,3500	1,0769	1,8896	1,2342	0
0,3600	1,0626	1,7166	1,1720	0
0,3700	1,0456	1,5567	1,1146	0
0,3800	1,0265	1,4101	1,0615	0
0,3900	1,0058	1,2779	1,0125	0
0,4000	0,9840	1,1591	0,9675	0
0,4100	0,9615	1,0535	0,9262	0
0,4200	0,9390	0,9604	0,8884	0
0,4300	0,9167	0,8787	0,8539	0
0,4400	0,8951	0,8074	0,8226	0,01
0,4500	0,8744	0,7453	0,7942	0,02
0,4600	0,8547	0,6911	0,7684	0,03
0,4700	0,8361	0,6439	0,7451	0,05
0,4800	0,8187	0,6027	0,7239	0,07
0,4900	0,8025	0,5666	0,7047	0,09
0,5000	0,7873	0,5348	0,6873	0,12
0,5100	0,7732	0,5068	0,6714	0,16
0,5200	0,7601	0,4820	0,6569	0,20
0,5300	0,7479	0,4599	0,6437	0,24
0,5400	0,7366	0,4402	0,6315	0,29
0,5500	0,7260	0,4225	0,6204	0,34
0,5600	0,7162	0,4065	0,6101	0,39
0,5700	0,7070	0,3921	0,6006	0,45
0,5800	0,6984	0,3789	0,5919	0,51
0,5900	0,6903	0,3670	0,5838	0,57
0,6000	0,6828	0,3560	0,5762	0,63
0,6100	0,6757	0,3459	0,5692	0,70
0,6200	0,6690	0,3366	0,5626	0,77
0,6300	0,6627	0,3281	0,5565	0,83
0,6400	0,6567	0,3201	0,5508	0,90
0,6500	0,6511	0,3127	0,5454	0,97
0,6600	0,6458	0,3058	0,5403	1,00
0,6700	0,6408	0,2994	0,5355	1,12
0,6800	0,6360	0,2933	0,5311	1,19
0,6900	0,6314	0,2876	0,5268	1,26
0,7000	0,6271	0,2823	0,5228	1,33

* niveau d'ondulations en dB

alignements discrets				
Butterworth				
Q_L	Q_{ts}	H	α	f_3/f_s
3	0,4386	1,0000	0,6543	1,0000
7	0,4048	1,0000	1,0613	1,0000
15	0,3937	1,0000	1,2444	1,0000
Bessel				
3	0,3535	0,9696	1,4036	1,4911
7	0,3312	0,9735	1,9076	1,4941
15	0,3230	0,9749	2,1296	1,4951
Butterworth d'ordre intermédiaire				
3	0,3835	1,1397	1,1722	1,2432
7	0,3572	1,1184	1,6802	1,2315
15	0,3477	1,1117	1,9030	1,2278

sera nécessaire d'effectuer des mesures sur l'enceinte en fonctionnement.

Pour effectuer une correction due à des pertes, commencez à prendre pour le coefficient Q_L la valeur à priori de 7 ; après le calcul de son volume, construisez l'enceinte, accordez-la à la fréquence indiquée, puis faites les mesures sur cette nouvelle enceinte pour déterminer exactement les pertes. Si les pertes mesurées sont proches de la valeur du coefficient Q_L posée à priori, aucune modification supplémentaire ne sera nécessaire. Si, par contre, la perte mesurée est inférieure ou supérieure à $Q_L = 7$, vous devrez refaire les calculs en modifiant les valeurs du volume et de l'accord de l'enceinte. Le diagramme 3.12 décrit la relation entre le volume de l'enceinte et les valeurs possibles du coefficient Q_L . Il n'est pas rare d'avoir, pour résultat de mesure, une valeur du coefficient Q_L inférieure à 7. En conséquence, vous devrez augmenter le volume de l'enceinte. Si vous avez l'habitude de travailler le bois, en particulier de démonter rapidement les panneaux en aggloméré de votre ébénisterie, cela vous

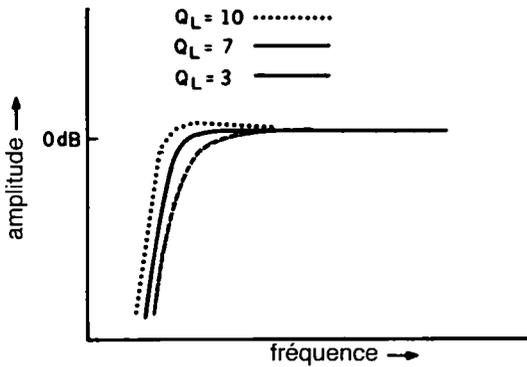


Figure 3.11 : Influence des pertes sur la courbe de réponse.

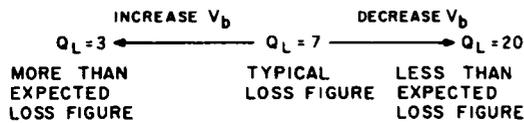


Figure 3.12 : Variation du coefficient Q_L en fonction du volume de l'enceinte bass-reflex.

sera fort utile pour déterminer les pertes de votre enceinte. Si cela vous semble trop contraignant, commencez par surévaluer le volume de votre enceinte de 25%, puis réduisez-le avec un produit de remplissage solide, facile à enlever. Si le coefficient Q_L se révèle plus faible, il vous reste à enlever la quantité adéquate de matériau de remplissage. Si le coefficient Q_L est plus élevé, augmentez la quantité de produit de remplissage. Prenez la précaution de toujours accroître le volume au-delà du calcul, pour compenser les éventuels facteurs imprévus (paragraphe 3.7). La procédure utilisée actuellement pour mesurer Q_L sera décrite au paragraphe 3.10.

3.6.2 Utilisation des tables de calcul 3.1 à 3.10

Une fois l'alignement choisi, vous pouvez utiliser une valeur du paramètre H (le rapport des résonances), de α (compliance du système) ou le rapport du volume d'enceinte et de V_{as} , et f_3/f_s (rapport de fréquences lié à f_3) pour trouver la fréquence d'accord de l'enceinte (f_B), le volume de l'enceinte (V_B) et aussi f_3 .

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha} \qquad f_B = H \times f_s$$

$$f_3 = (f_3/f_s) \times f_s$$

3.7 Calcul des dimensions de l'évent

Les tuyaux en PVC utilisés dans le bâtiment pour les eaux usées sont le matériau idéal pour des événements d'enceintes *bass-reflex* : facile à travailler et facile à trouver, ce matériau, disponible dans de nombreuses sections (de 2 cm à 20 cm de diamètre), est, de plus, facile à couper pour effectuer l'accord de l'enceinte. Construire des événements rectangulaires en bois est possible aussi, mais l'adaptation de leur longueur pour accorder l'enceinte prend trop de temps. C'est pour cette raison que nous ne considérerons que des événements fabriqués à partir de tuyaux.

Le calcul de la longueur d'un événement cylindrique affleurant la face avant de l'enceinte s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$L_v = \frac{9438,792 \cdot R^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 1,463 R$$

où :

(b pour *box* (enceinte en anglais))

L_v = longueur en pouces

f_b = fréquence d'accord en Hz

V_b = volume de l'enceinte en pouces³

R = rayon de l'évent en pouces

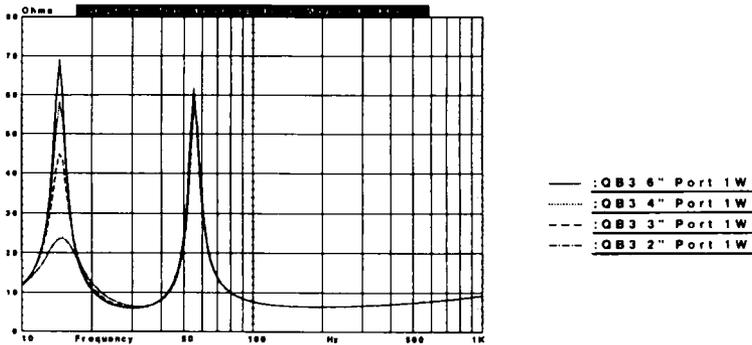


Figure 3.13

L'évent devra assurer un minimum de circulation d'air pour éviter une compression de la dynamique, car virtuellement toute la puissance acoustique est rayonnée par l'évent à la fréquence d'accord f_b . Un calcul approché du diamètre minimum [7] est donné par :

$$1. \quad d_v \geq 39,37 \left(\frac{411,25 \cdot V_d}{\sqrt{f_b}} \right)^{1/2}$$

où :

d_v = diamètre minimum de l'évent en pouces

f_b = fréquence d'accord en Hz

V_d = volume déplacé par le cône en m^3

Comme directive, Small [1] propose une formule plus simple (avec les mêmes unités que ci-dessus) :

$$2. \quad d_v \geq 39,37 (f_b \cdot V_d)^{1/2}$$

Pour une enceinte accordée à 33,5 Hz et équipée d'un haut-parleur de graves de 25 cm (10"), le diamètre minimal de l'évent sera de 9,1 cm dans le premier cas et de 6,2 cm dans le deuxième. Comme ce ne sont que des approximations, c'est un événement de 8 à 10 cm qui, d'après les formules précédentes, serait adéquat. Cependant, les simulations par ordinateur ainsi que des essais empiriques ont montré que, quel que soit le diamètre de l'évent, des défauts de linéarité apparaissent. Les courbes d'impédance de la

figure 3.13 sont le produit d'une comparaison, par simulation sur ordinateur, de quatre événements cylindriques de diamètres différents, mesurés à une puissance de 1 W, avec la même enceinte, le même haut-parleur de graves et accordés à la même fréquence (le même haut-parleur de 30 cm (12") et la même enceinte QB3 que dans le paragraphe 3.5). Les diamètres et les longueurs d'évents sont les suivants :

diamètre		longueur	
6"	15,2 cm	30,0"	76,2 cm
4"	10,2 cm	12,3"	31,2 cm
3"	7,6 cm	6,2"	15,6 cm
2"	5,1 cm	2,3"	5,8 cm

Il apparaît que l'évent de 15,2 cm de diamètre a une longueur qui n'est guère utilisable, mais il pourra servir de référence pour comprendre la dynamique de la non linéarité des événements. Les différentes courbes d'impédance de la figure 3.13 montrent bien que, même à 1 W, les événements d'une longueur de 10,2 cm, 7,6 cm et 5,1 cm fonctionnent d'une manière non-linéaire, ce qui signifie qu'ils sont incapables de déplacer suffisamment d'air à la vitesse requise. Une série de simulations à différentes puissances fut faite pour les événements de diamètre de 6", 4" et 2", afin

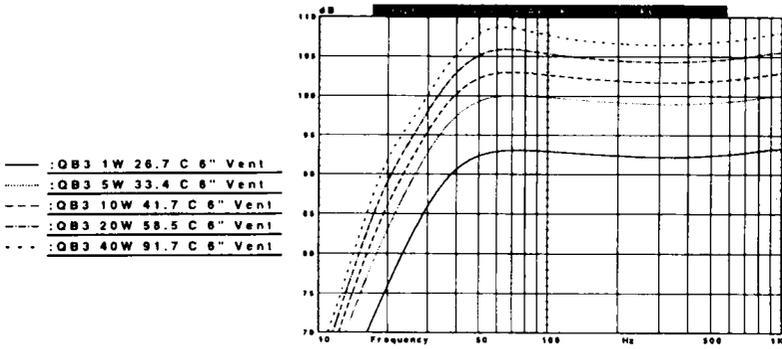


Figure 3.14

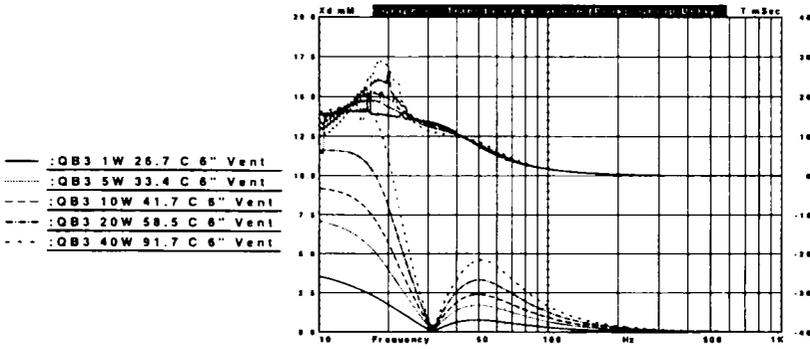


Figure 3.15

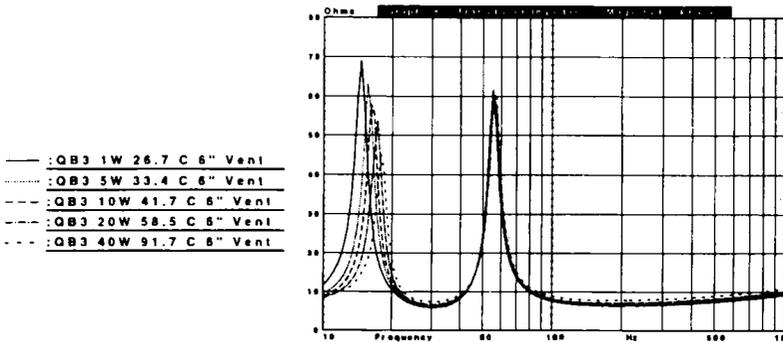


Figure 3.16

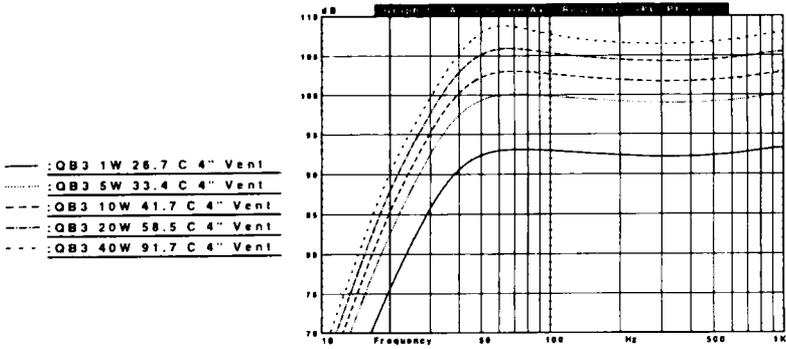


Figure 3.17.

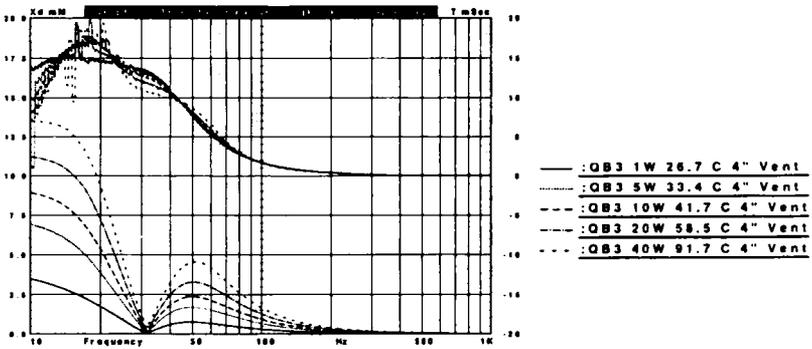


Figure 3.18

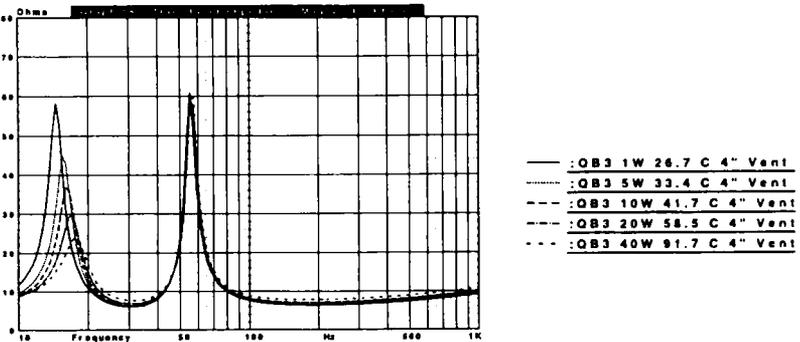


Figure 3.19

de mieux apprécier l'effet de non linéarité. La série est constituée de cinq puissances de 1, 5, 10, 20 et 40 W, accompagnées de la montée adéquate en température de la bobine mobile. Les figures 3.14 à 3.16 concernent l'événement cylindrique de 6" de diamètre, les figures 3.17 à 3.19 concernent l'événement cylindrique de 4" de diamètre, et les figures 3.20 à 3.22 concernent l'événement cylindrique de 2" de diamètre. Les courbes de niveau SPL de la figure 3.14, qui correspondent à l'événement de 6", montrent non seulement les variations attendues par la montée en puissance d'entrée, mais également des indices de non linéarité d'événement : la fréquence f_3 varie, comme attendu, vu la montée en puissance de 40,6 Hz pour 1 W à 42,3 Hz à 40 W. La pente change peu, de 18,4 dB/octave pour 1 W à 17,5 dB/octave à 40 W. Cependant, une discontinuité se précise vers 20 Hz pour des puissances d'entrée plus élevées. Cette discontinuité, due à la non linéarité des événements aux puissances élevées, augmente la fréquence de résonance d'événement, ainsi que la pente d'atténuation de la fréquence de coupure à 20 Hz. Les courbes de retard de groupe, figure 3.15, se détériorent progressivement avec la montée en puissance ; celle qui correspond à 40 W est la plus mauvaise. Le déplacement le plus important de la membrane reste inférieur à une excursion de 5 mm pour la puissance la plus élevée, ce qui est encore 0,5 mm en deçà des 6 mm de X_{\max} du haut-parleur de graves de 30 cm (12") (comme précisé antérieurement, les excursions des haut-parleurs montés en *bass-reflex* sont très faibles, au-dessus de f_b). Les courbes d'impédance de la figure 3.16 présentent le même défaut de linéarité que celui des courbes d'impédance à 1 W, concernant les événements cylindriques de différents diamètres (figure 3.13). L'amplitude du pic le plus faible, à la fréquence f_L , a chuté de 24 Ω (de 69 Ω à 1 W à 45 Ω à 40 W) et sa dérive en fréquence a augmenté de 4 Hz à 40 W, comparée à la dérive de la fréquence à 1 W. Les courbes de réponse SPL des événements de 4" de diamètre, de la figure 3.17, ont des variations proches des courbes SPL de l'exemple

avec des événements de 6" de diamètre. La fréquence de coupure f_3 varie de 38 Hz pour 1 W à 42 Hz pour 40 W, et ce essentiellement à cause de l'accroissement de la puissance. La pente subit une faible modification de 17,7 dB/octave à 17,4 dB/octave, moins importante que prévue, qui provient des défauts occasionnés par les événements. À puissance plus élevée, la pente développe une discontinuité similaire à celle de l'événement de 6". Comme les performances en régime transitoire se dégradent avec la puissance, on observe que le retard de groupe, figure 3.18, accuse un coude plus prononcé à 40 W. Dans la figure 3.19, on voit que les pics des courbes d'impédance, correspondant à la fréquence f_L , disparaissent progressivement. Quand la puissance passe de 1 W à 40 W, l'amplitude des pics chute de 33 Ω (58 Ω à 25 Ω) et leur fréquence s'accroît de 3 Hz. La compression est globalement supérieure à celle des événements de 6". Les courbes SPL des événements de 2" de diamètre, réunies dans la figure 3.20, illustrent la forte non linéarité de ce format d'événement. Le flanc des courbes se dégrade et tend vers une pente de 12 dB/octave en dessous de 20 Hz. La fréquence f_3 passe de 40 Hz pour 1 W à 45 Hz pour 40 W. La pente des courbes passe de 19 dB/octave pour 1 W à 14,4 dB/octave à 40 W, témoignant des changements qui ont lieu en dessous de 20 Hz. Les courbes de retard de groupe de la figure 3.21 indiquent des perturbations plus importantes du régime transitoire, lors de la montée en puissance ; celles-ci proviennent à l'évidence essentiellement de la non linéarité des événements. Remarquez que l'amplitude minimale de l'excursion de la membrane n'est plus nulle à toutes les puissances, mais que ce minimum augmente en niveau avec la puissance. Les courbes d'impédance de la figure 3.22 montrent que l'événement est pratiquement sans effet pour des puissances supérieures à 5 W. La différence entre un événement relativement linéaire, comme celui de 6" de diamètre, et un événement effectivement non linéaire, tel celui de 2" de diamètre, est documentée dans les figures 3.23 à 3.25 (puissance

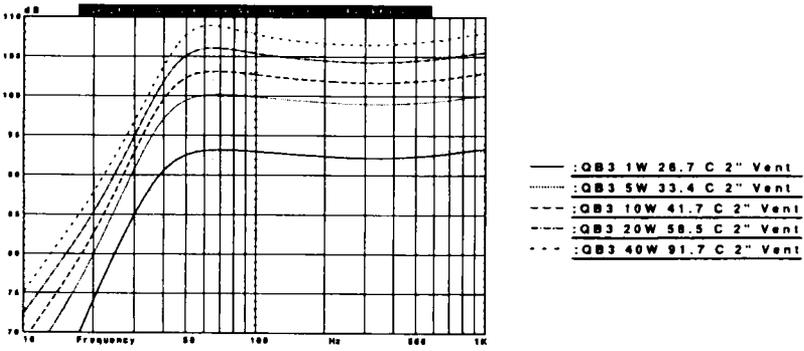


Figure 3.20

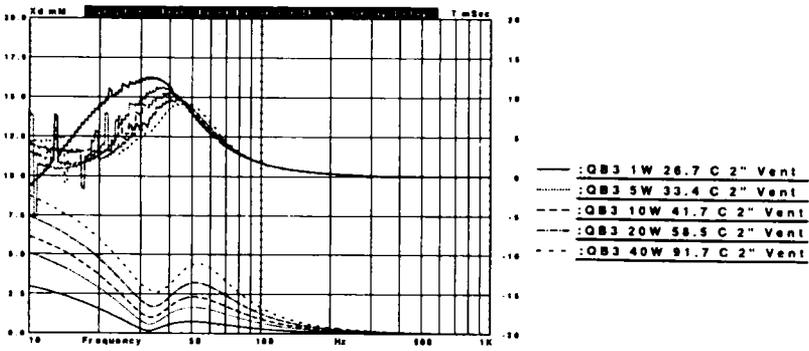


Figure 3.21

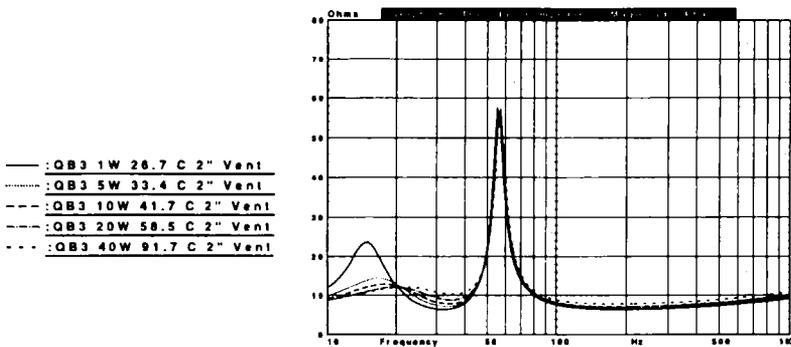


Figure 3.22

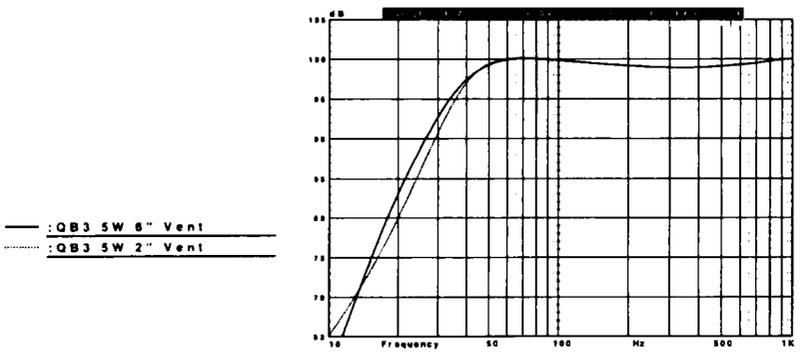


Figure 3.23

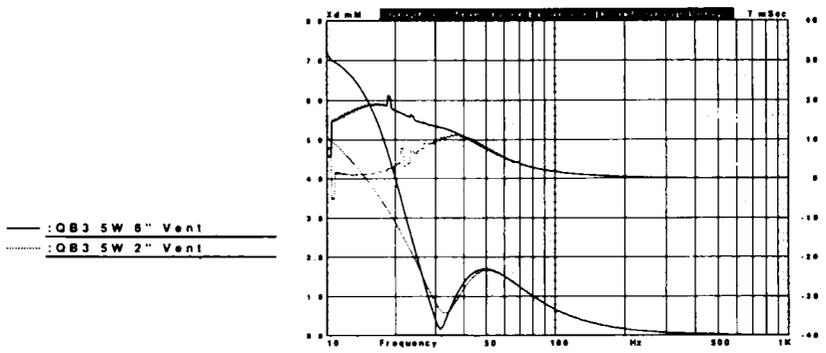


Figure 3.24

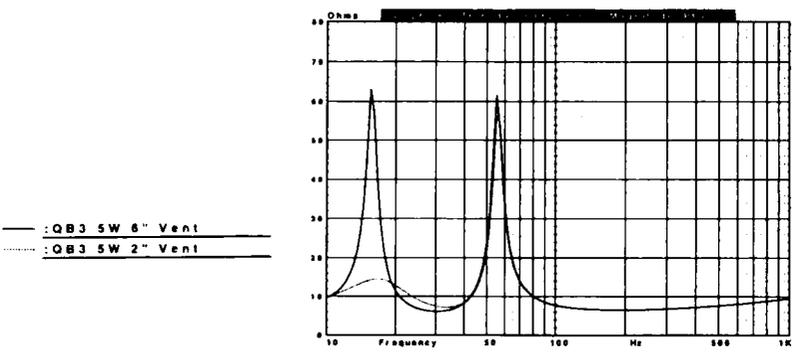


Figure 3.25

de 5 W, niveau de 100 dB SPL) et ne nécessite pas de commentaires supplémentaires.

La conclusion semble assez évidente à la lumière des simulations précédentes. Bien que cela soit généralement ignoré, pratiquement aucun événement cylindrique réalisable ne fonctionne d'une manière complètement linéaire, et la plupart de ces événements provoquent une chute de performance aux puissances élevées. La dimension minimale d'un événement peut être différente de ce que donnent les calculs effectués à l'aide de l'une ou l'autre formule. Bien que ces calculs semblent suggérer l'existence d'une limite minimale pour la dimension d'un événement linéaire, celui-ci sera néanmoins affecté d'une certaine non linéarité. Dans tous les cas, des sections d'événements de plus grande surface donneront toujours une meilleure linéarité (Note : le mot « surface » désigne ici l'aire circulaire de l'orifice, et non la surface intérieure rectangulaire du cylindre de l'événement). Pour des applications qui demandent de fortes puissances, comme les enceintes utilisées sur scène ou pour la sonorisation, il est préférable de choisir une surface d'événement aussi proche que possible de celle du haut-parleur. L'inconvénient des événements cylindriques de grand diamètre, c'est de produire, à cause de leur longueur, des résonances de tuyau. Bien que les résonances produites par les événements de grande longueur puissent provoquer des variations d'amplitude mineures, de l'ordre de 1 à 2 dB, ces perturbations de la courbe de réponse sont probablement moins embarrassantes que les fortes non linéarités provenant d'événements sous-dimensionnés.

Les non linéarités dues aux événements ont toujours été source de problèmes ; c'est une donnée restée longtemps ignorée par la plupart des constructeurs, en toute bonne foi pour les uns, par négligence délibérée pour d'autres. Pour des applications domestiques à volume sonore modéré, les effets ne sont pas particulièrement gênants, surtout si vous choisissez la section la plus forte dans la catégorie des

événements recommandés. Les effets de non linéarité ne seront pas trop importants, aussi longtemps que le rapport entre la surface de l'événement et celle du haut-parleur sera au minimum égal à 1/9. Un rapport égal à 1/4 ou plus donne généralement une assez bonne linéarité d'événement. Avec les dimensions standard des tuyaux PVC, on obtient : des événements de 1" de diamètre, qui ne sont valables que pour des haut-parleurs de 4" ; des événements de 2" de diamètre, qui sont valables pour des haut-parleurs de 4" et 5" de diamètre, mais qui représentent un minimum pour un haut-parleur de 6" ; des événements de 3" de diamètre, qui sont valables pour des haut-parleurs de 6" et tolérables en valeur minimale pour un haut-parleur de 8" ; des événements de 4" de diamètre, qui sont valables pour des haut-parleurs de 8" et 10" et, comme valeur minimale, pour des haut-parleurs de 12" et 15" ; des événements de 6", qui sont valables pour des haut-parleurs de 12" et 15" (et pour tout haut-parleur plus petit, si l'enceinte est assez grande pour contenir la longueur de l'événement). Bien que les événements cylindriques soient très pratiques, l'événement, qui a la section la plus importante pour une profondeur d'ébénisterie donnée (sans utiliser un coude pour rallonger l'événement), est l'événement de type tunnel rectangulaire (d'après le premier article que publia Thiele, réédité dans *AES Loudspeaker Anthology*, volume 1). Les événements à tunnel rectangulaire ne sont pas particulièrement faciles à accorder, ni rapides à modifier, c'est pourquoi ils ne seront pas traités ici. Pour des haut-parleurs de graves de diamètre important (dont le rayon est plus grand ou égal à 2"), il est plus commode d'utiliser plusieurs événements. La relation entre deux événements cylindriques d_1 et d_2 est donnée par :

$$d_t = (d_1^2 + d_2^2)^{1/2}$$

Le montage de deux événements de 4" de diamètre est équivalent à un événement ayant un diamètre de 5,7" (144,8 mm).

3.7.1 Résonance d'évent et couplage avec la membrane

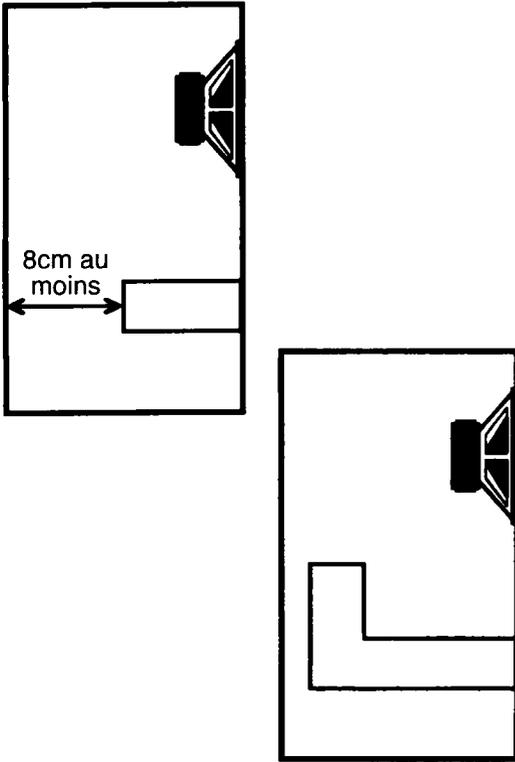


Figure 3.26 : Événement droit et événement coudé.

Si la longueur de l'événement est telle que la distance, qui reste libre entre la fin de l'événement et l'intérieur de la face arrière de l'enceinte, est inférieure à 7,5 cm (pour un événement monté en façade), l'utilisation d'un coude PVC à 90° s'impose (figure 3.26). Small met en garde contre des événements de très grande longueur, car ils engendreraient trop de bruits parasites. D'autres auteurs, tels Weems et Bullock, ne semblent pas de cet avis.

Le couplage acoustique entre l'événement et le haut-parleur, ou entre plusieurs événements, produit des perturbations multiples dans le fonctionnement d'une enceinte *bass-reflex*. Tout en contribuant à l'émission sonore du bas du spectre, l'événement ajoute également ses bruits d'écoulement d'air, ses résonances perturbatrices, et transmet la coloration sonore due aux ondes stationnaires provenant de l'intérieur de l'enceinte. Les résonances de type « tuyau d'orgue », qui proviennent des ondes stationnaires qui s'établissent à l'intérieur des événements de forme cylindriques, sont fonction de leur diamètre et de leur longueur. Généralement, les événements cylindriques courts, dont la longueur n'excède pas le diamètre, n'ont pas les problèmes de résonance que l'on rencontre sur les événements de grande longueur. Dans la figure 3.27, les courbes de réponse illustrent les problèmes de résonance d'événements ; ce sont les mêmes événements que ceux utilisés dans la simulation du paragraphe 3.7 ci-dessus, avec en supplément un exemple d'événements multiples. Les courbes ont été décalées volontairement en amplitude par une quantité constante en décibel, afin d'en rendre la lecture plus facile. Le diamètre des événements, leur longueur ainsi que la distance entre le centre du haut-parleur et le centre de l'événement sont donnés ci-dessous (en cm) :

diam.	longueur	HP-événement	événement-événement
15,2	76,8	24,8	–
10,2	31,2	21,6	–
7,6	15,9	20,3	–
2 × 7,6	38,1	24,8	16,5

Pour définir une première référence, tous les événements de cette simulation sont placés immédiatement à côté du haut-parleur. Dans ces simulations d'un genre particulier, les niveaux sont amplifiés d'au moins un facteur de dix et vous sont présentés uniquement

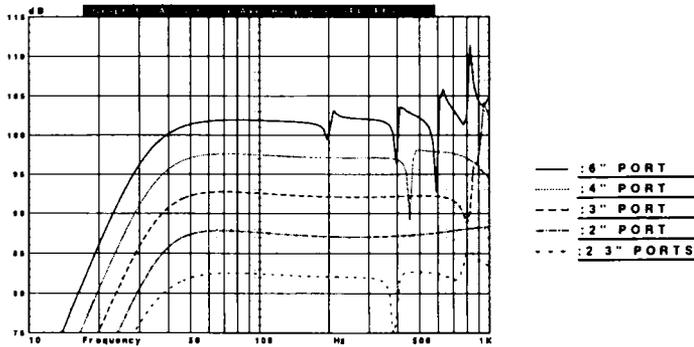


Figure 3.27

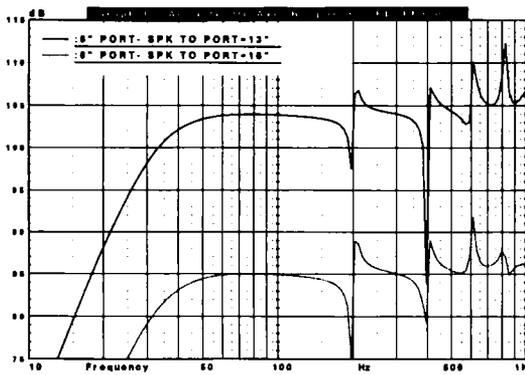


Figure 3.28

pour vous donner une idée, pour différentes dimensions d'évents, de l'effet produit par divers emplacements sur la face avant et par des ondes stationnaires dans l'évent. Comme il est précisé au paragraphe 3.7, les résonances d'évent ne produisent habituellement que des changements mineurs dans la réponse du haut-parleur et, de ce fait, sont difficiles à distinguer des autres anomalies de la réponse du haut-parleur. Les résonances de type « tuyau d'orgue » sont particulièrement difficiles à prévoir : elles varient avec l'emplacement de l'évent sur la face avant, avec la proximité de l'évent des parois du coffret

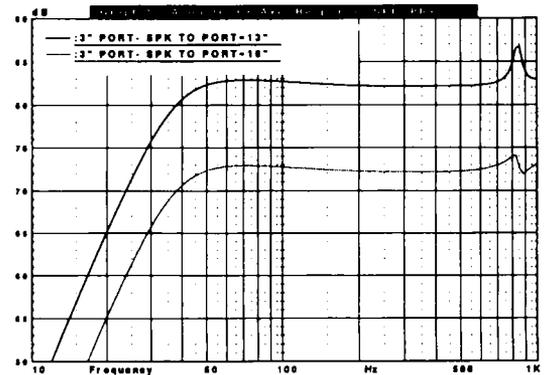


Figure 3.29

ainsi qu'avec la distribution (position) du matériau amortissant dans l'environnement immédiat de l'évent. Une autre possibilité est de placer l'évent sur la face arrière de l'enceinte. Cette configuration modifiera quelque peu le niveau sonore émis en très basse fréquence, niveau qui est fonction de la position de l'enceinte dans la pièce. Le fait de placer l'évent à l'arrière de l'enceinte atténue l'importance subjective des problèmes engendrés par les bruits parasites d'évent.

Le couplage mutuel de l'évent et du haut-parleur varie avec la position et le diamètre

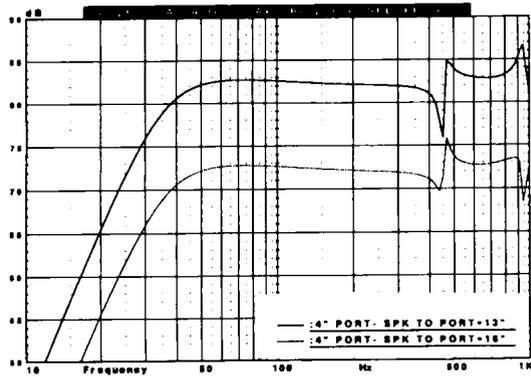


Figure 3.30

de l'évent. Il n'existe pas de règles vraiment opérationnelles qui puissent servir de guide, il reste la simulation par ordinateur qui peut au moins vous servir de piste et vous montrer les éventuelles possibilités. Les exemples des figures 3.28 (évent de 6"), 3.29 (évent de 4"), 3.30 (évent de 3") et 3.31 (deux événements de 3"), illustrent la variation des résonances d'évent en fonction de la distance entre l'évent et le haut-parleur (ici l'amplitude des résonances de type « tuyau d'orgue » est également amplifiée par au moins un facteur de dix). Les trois courbes des figures 3.28, 3.29 et 3.30 correspondent à une position d'évent adjacente au haut-parleur, soit 13" et 16" entre les centres des événements et le centre du cône de 12". Les deux événements de 3" étaient placés à la même distance du haut-parleur dans les deux exemples : dans la première courbe, ils étaient adjacents ; dans la deuxième, ils étaient écartés l'un de l'autre. Il semble que pour les événements de 4" et 6" de diamètre, le montage en proximité immédiate du haut-parleur soit le cas qui produit le moins de perturbations. L'évent de 3" pose moins de problèmes, s'il est placé à quelque distance du haut-parleur. La configuration multiple à deux événements de 3" de la figure 3.31 produit moins de problèmes, si les deux événements sont séparés par une distance conséquente.

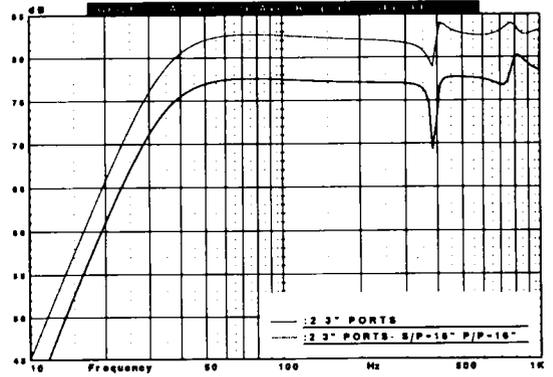


Figure 3.31

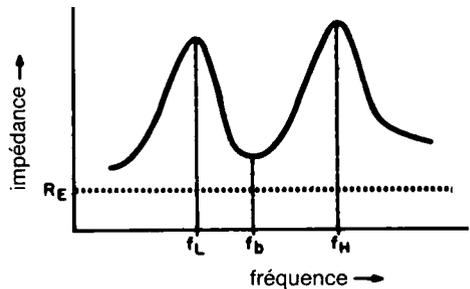


Figure 3.32 : Accord de l'évent à l'aide de la courbe d'impédance.

3.7.2 Accord d'une enceinte bass-reflex

Vous pouvez procéder à l'accord final de l'enceinte une fois que vous avez choisi la dimension de l'évent. Mesurez une courbe d'impédance avec un générateur basse fréquence et un voltmètre (chapitre 9), et déterminez la fréquence f_B qui est dans le creux situé entre les deux pics d'impédance. Si la valeur mesurée de f_B est inférieure ou supérieure à la valeur désirée, ajustez la longueur de l'évent en conséquence (figure 3.32).

Comme f_B varie en fonction des fuites dues à l'ébénisterie et aussi en fonction de l'inductance de la bobine mobile, il est souhaitable d'avoir une méthode de réglage (d'accord) plus précise. Placez un sonomètre près de la membrane du haut-parleur de graves et cherchez le minimum de niveau sonore avec le générateur basse fréquence. Vous obtiendrez ainsi la vraie valeur de la fréquence f_B . Dans les deux méthodes, vos mesures doivent être faites avec l'enceinte munie de son matériau amortissant et avec le filtre connecté au haut-parleur. Si vous avez des difficultés à trouver la fréquence centrale f_B , déterminez la fréquence des deux pics d'impédance et calculez-en la moyenne. Pour rendre la mesure de la fréquence plus facile, on peut débrancher le filtre et enlever le matériau absorbant, mais attention, si on enlève plus de 30% de celui-ci, la mesure de la fréquence f_B en sera affectée. Il faudra alors procéder à une mesure complémentaire, avec la présence de tout le matériau absorbant à l'intérieur de l'enceinte.

3.8 Paramètres complémentaires

Comme pour les enceintes closes, trois paramètres complémentaires sont utiles pour l'évaluation des performances du haut-parleur : l'efficacité caractéristique, la puissance acoustique limitée par l'élongation maximale de la bobine mobile ainsi que la puissance électrique correspondante.

3.8.1 Efficacité caractéristique (η_0)

Pour les enceintes *bass-reflex*, on considère l'efficacité caractéristique η_0 (éta) comme identique à celle du haut-parleur à l'air libre :

$$\eta_0 = \frac{K (f_s^3 V_{as})}{Q_{es}}$$

$$\begin{aligned} \text{où : } K &= 9,64 \times 10^{-10} \text{ pour } V_{as} \text{ en litres} \\ &= 9,64 \times 10^{-7} \text{ pour } V_{as} \text{ en m}^3 \\ &= 2,70 \times 10^{-8} \text{ pour } V_{as} \text{ en pieds}^3 \\ &= 1,56 \times 10^{-11} \text{ pour } V_{as} \text{ en pouces}^3 \end{aligned}$$

Pour convertir η_0 en pourcentage :

$$\% = \eta_0 \cdot 100$$

$$\text{SPL, 1 W / 1M dB} = 112 + 10 \log_{10} \eta_0$$

3.8.2 Puissance acoustique limitée par les excursions maximales de la bobine mobile (P_{ar})

Pour un signal d'entrée contenu essentiellement dans la bande passante de l'enceinte, la puissance acoustique P_{ar} se calcule par :

$$P_{ar} = 3,0 \cdot f_s^4 \cdot V_d^2$$

où :

P_{ar} est en watts

V_d est le volume déplacé par la membrane en m^3

Exprimé en niveau de pression sonore (SPL) :

$$\text{dB} = 112 + 10 \log_{10} P_{ar}$$

3.8.3 Puissance électrique d'entrée maximale (P_{er})

La puissance P_{er} est fonction de P_{ar} et de l'efficacité caractéristique de l'enceinte, à savoir :

$$P_{er} = \frac{P_{ar}}{\eta_0}$$

où P_{er} est en watt et η_0 sans dimension.

Vous pouvez ainsi comparer P_{er} à la tenue en puissance donnée par le constructeur, qui exprime la limite thermique, et constater si la puissance sonore souhaitée par votre projet dépasse la capacité du haut-parleur. En règle générale, ces résultats n'informent pas sur la

validité d'un alignement d'enceinte *bass-reflex*. Prenez également en compte le type de message sonore que vous diffuserez, le niveau de distorsion acceptable et le niveau d'écoute sonore moyen. En d'autres mots, si vous écoutez du jazz acoustique (sans instruments amplifiés), aux environs de 85 à 90 dB, le fait de dépasser les limites thermiques du haut-parleur sera sans grande importance. Par contre, si vous aimez la musique rock heavy metal à un niveau sonore de 115 dB et plus, un choix plus prudent sera préférable.

3.9 Exemples de calcul

Les tableaux 3.11 et 3.12 donnent des exemples de calcul pour une enceinte *bass-reflex* avec deux haut-parleurs appropriés. Lors du calcul du volume total de votre enceinte, n'hésitez pas à surévaluer ce volume, afin de pouvoir compenser tout imprévu qui diminuerait le volume initial (paragraphe 3.7). De la même manière, tenez compte de toutes les résistances séries, quand vous calculerez le coefficient Q_s final (chapitre 9).

Vous trouverez dans les articles suivants du magazine *Speaker Builder* des exemples supplémentaires de calculs et de constructions (réalisations) d'enceintes *bass-reflex*, qui peuvent être fort utiles :

Tableau 3.11 : Exemple d'application avec un haut-parleur de 20 cm (8")

QL = 7										
Qts	Qes	Qms	fs	Xmax	Sd (m ²)		Vd (m ³)		Vas	
0,26	0,28	4,0	32	3,5 mm	2,15 · 10 ⁻²		7,53 · 10 ⁻⁵		2,76 ft ³	
AL	Vb ft ³	f3 Hz	fb Hz	Lv in	dv in	Par(p) watts	SPL dB	η0 %	SPL	Per watts
QB3	0,67	61	49	2	1,5	0,235	106	0,908	92	26
SC4	0,75	72	34	4	1,5	0,457	109	0,908	92	50
SBB4	0,81	74	32	8,7	2	0,509	109	0,908	92	56

Tableau 3.12 : Exemple d'application avec un haut-parleur de 25 cm (10")

QL = 7										
Qts	Qes	Qms	fs	Xmax	Sd (m ²)		Vd (m ³)		Vas	
0,25	0,29	42,1	22	3,5 mm	3,3 · 10 ⁻²		1,16 · 10 ⁻⁴		7,51 ft ³	
AL	Vb ft ³	f3 Hz	fb Hz	Lv in	dv in	Par(p) watts	SPL dB	η0 %	SPL	Per watts
QB3	1,7	42	34	3	2	0,126	103	0,724	91	17,4
SC4	2,0	51	23	12	2,5	0,267	106	0,724	91	36,9
SBB4	2,1	52	22	12	2,5	0,288	106	0,724	91	39,8

1. **P. Stamler**, *How to Improve That Small, Cheap Speaker*, 1/80
2. **R. Saffran**, *Build a Mini-Pipe Speaker*, 3/81
3. **M. Lampton**, *A Three-Way Corner Loud-speaker System*, 4/82
4. **R. Parker**, *A Thiele/Small Aligned Satellite/Subwoofer System*, 1/84
5. **H. Hirsch**, *Tenth Row, Center*, 2/84
6. **D. Baldwin**, *A Beginner Builds His First Speaker*, 3/84
7. **S. Ellis**, *The Curvilinear Vertical Array*, 2/85
8. **W. Marshall Leach, Jr.**, *The Audio Laboratory Loudspeaker System*, 2/89.
9. **Bill Schwefel**, *The Beer Budget Window Rattler*, 3/90
10. **Thomas Nousaine**, *Four Eight by Twos*, 6/90
11. **M. Rumreich**, *Box Design and Woofer Selection: A New Approach*, 1/92, p. 9
12. **G.R. Koonce & R.O. Wright, Jr.**, *Alignment Jamming* 4/92, p. 14
13. **P.E. Rahnefeld**, *Non-Optimum Vented-Box Spreadsheet Documentation*, 5/92, p. 16
14. **R. Gonzalez**, *Quasi-Monotonic Vented Alignments*, 1/93, p. 24
15. **M. Redhill**, *Stalking f_b* , 2/93, p. 24

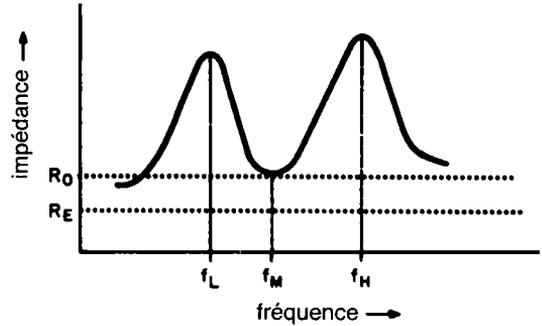


Figure 3.33 : Recherche des pertes à l'aide de la courbe d'impédance.

celle qui correspond à l'impédance minimale, f_M ($f_M = f_B$). Ces deux fréquences sont parfois un peu différentes, à cause du déphasage imposé par une bobine mobile de forte inductance. Pour obtenir une meilleure approximation de la fréquence f_B , fermez simplement l'évent et mesurez la fréquence de résonance (f_C) de cette enceinte devenue close ; il vous reste à appliquer les relations suivantes :

$$f_b = (f_L^2 + f_H^2 - f_C^2)^{1/2}$$

La série d'équations suivantes établira la valeur du coefficient Q_L :

$$f_{sb} = \frac{f_L \cdot f_H}{f_B}$$

$$r_m = \frac{R_0}{R_e}$$

où R_E représente la résistance en courant continu de la bobine du haut-parleur.

$$Q_{msb} = \left(\frac{f_s}{f_{sb}} \right) \cdot Q_{ms}$$

$$Q_{esb} = \left(\frac{f_s}{f_{sb}} \right) \cdot Q_{es}$$

$$Q_{tsb} = \left(\frac{f_s}{f_{sb}} \right) \cdot Q_{ts}$$

3.10 Mesure du coefficient de perte totale Q_L

Nous avons déjà signalé que lorsque vous aurez déterminé le volume de l'enceinte et que vous l'aurez construite avec la valeur du coefficient $Q_L = 7$ comme objectif (de pertes), vous devrez contrôler et réajuster votre enceinte pour tenir compte des pertes réelles. Commencez par mesurer l'impédance de la nouvelle version et notez les valeurs de f_L , f_M , f_H et R_0 (figure 3.33). La résistance R_0 est égale à l'impédance (mesurée) à la fréquence f_M .

Si votre enceinte est vide de tout matériau amortissant et si le filtre est hors circuit, alors la fréquence f_B sera en général la même que

$$h_a = \frac{f_B}{f_{sb}}$$

$$\alpha' = \frac{(f_H^2 - f_B^2)(f_B^2 - f_L^2)}{(f_H^2 f_L^2)}$$

$$Q_L = \frac{h_a}{\alpha'} \cdot \left(\frac{1}{Q_{esb}(rM - 1)} - \frac{1}{Q_{msb}} \right)$$

Si le coefficient Q_L , que vous venez de calculer à partir de vos mesures, est très différent de celui que vous vous étiez fixé comme objectif, à savoir $Q_L = 7$, alors prenez, dans les calculs, le cas de figure le plus proche de votre coefficient Q_L actuel, et recalculez tous les paramètres avec Q_{tsb} . Si vous mesurez le coefficient Q_{ts} du haut-parleur sur une face avant, dont les dimensions sont voisines de la face avant de votre enceinte *bass-reflex*, sa valeur sera proche du coefficient Q_{sb} . La précision du coefficient Q_L peut être vérifiée par la relation :

$$\frac{f_B}{f_M} = 1 \approx \left(\frac{\alpha' Q_L^2 - h_a^2}{\alpha' Q_L^2 - 1} \right)^{1/2}$$

Si le résultat de votre calcul est suffisamment proche de 1, vous pouvez estimer que $f_B = f_M$ et que la procédure a été assez précise.

chute en basse fréquence), pour des cas où le coefficient Q_s a été mal mesuré, et pour d'autres cas où l'enceinte a été mal accordée (figure 3.34) [1,3].

Tableau 3.13 :
Variations de la courbe de réponse provoquées par de mauvais alignements

coeff. Q_{ts}		fréq. d'accord H	
var. coeff. Q_{ts}	dB	var. fréq. d'accord H	dB
+100	+7	+50	+7
+20	+7	+20	+2
-20	-3	-20	-2
-50	-5	-50	-4

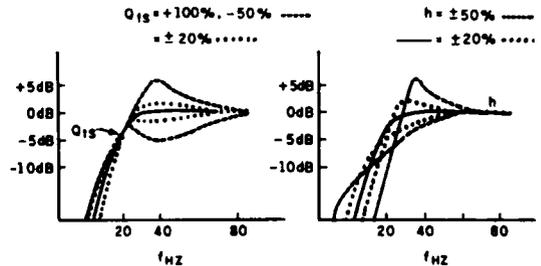


Figure 3.34 : Courbes de réponse en fonction du coefficient Q_{ts} ou de l'accord (h).

3.11 Modification de la courbe de réponse due à un mauvais alignement

À la lumière de ce qui précède, il apparaît que la mise au point d'une enceinte *bass-reflex* demande un minimum de précision, essentiellement parce que des paramètres mal optimisés portent facilement à conséquence. Le tableau 3.13 décrit les variations d'amplitude de la courbe SPL qui auront lieu à la fréquence de coupure basse (juste avant la

3.11.1 Variations de la réponse dynamique en fréquence pour divers alignements

Les variations dans la courbe de réponse, et celles d'autres facteurs, proviennent de la montée en puissance et de l'accroissement de la température de la bobine mobile, mais la non linéarité des événements fait qu'il n'est pas aussi facile de les observer avec les enceintes *bass-reflex* qu'avec les enceintes closes. Ceci est apparu dans l'exposé du paragraphe 3.7. La simulation par ordinateur de six aligne-

ments de type linéaire et de six autres de type non-linéaire aidera à clarifier les variations dynamiques dues à la montée en puissance. Les simulations, qui donnent les courbes de réponse en fréquence, les courbes de retard de groupe et celles d'excursion de cône, sont essentiellement les mêmes que celles obtenues à 1 W dans le paragraphe 3.5, avec en complément une série de simulations à 20 W, ajoutées par souci de comparaison. Les illustrations concernant ces différents alignements sont les suivantes :

alignement	figure
SBB ₄	3.35 - 3.36
SC ₄	3.37 - 3.38
QB ₃	3.39 - 3.40
BB ₄	3.41 - 3.42
SQB ₃	3.43 - 3.44
C ₄	3.45 - 3.46

L'observation des courbes des différents alignements pour une puissance de 1 W et 20 W donne des conclusions similaires à celles obtenues pour les enceintes closes au chapitre 2. Lorsque la puissance augmente, l'amortissement tend à décroître, tandis que la fréquence f_3 , elle, augmente légèrement. Comme l'amortissement a tendance à décroître, les alignements linéaires développent une bosse aux puissances élevées. Si vous ne disposez pas d'un logiciel de CAO, vous pouvez compenser l'altération de la courbe de réponse aux fortes puissances en choisissant un accord légèrement plus faible que celui qui est recommandé dans les tables de calcul par les modèles de Thiele/Small. Le modèle de Thiele/Small a été conçu pour de petits signaux et calcule des courbes plates pour de petits niveaux d'entrée. Abaisser la fréquence d'accord f_0 de 10 à 20%, entraînera une réponse plus amortie aux petites puissances et une réponse plus plate aux puissances plus élevées. Toutefois, ceci peut susciter des difficultés, car l'utilisation d'un événement de diamètre suffisamment grand nécessitera forcément

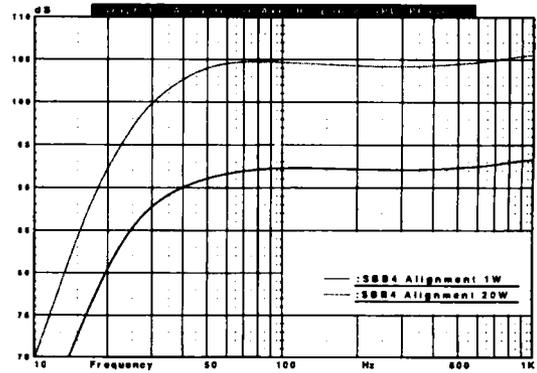


Figure 3.35

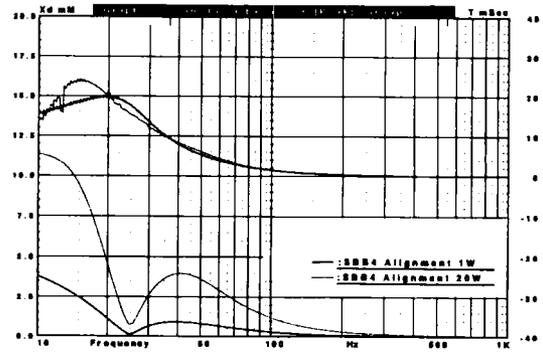


Figure 3.36

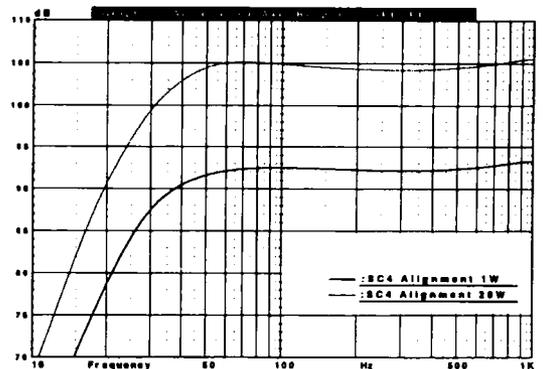


Figure 3.37

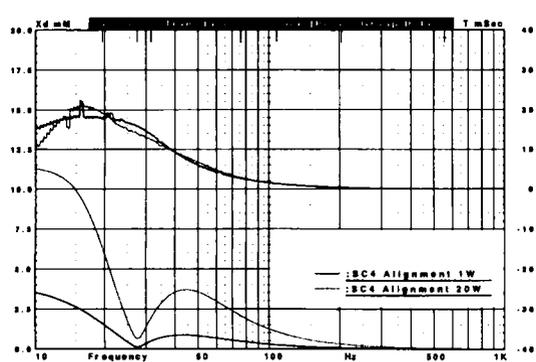


Figure 3.38

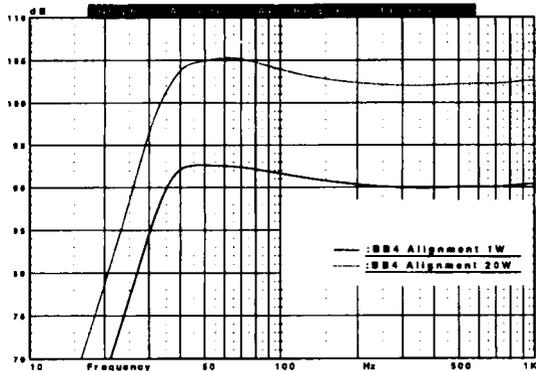


Figure 3.41

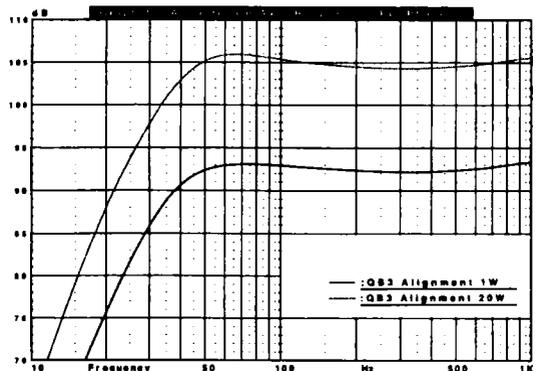


Figure 3.39

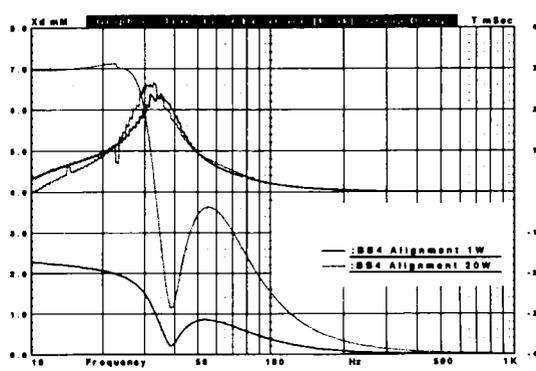


Figure 3.42

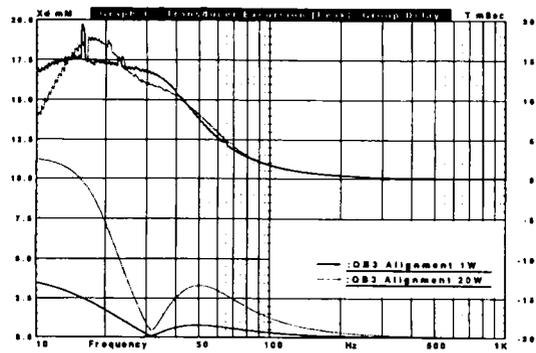


Figure 3.40

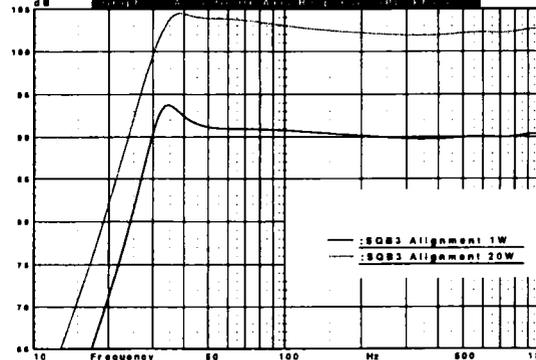


Figure 3.43

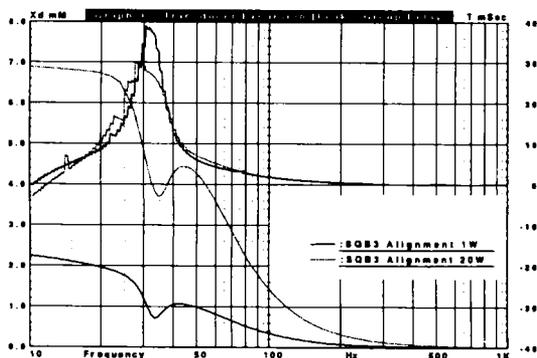


Figure 3.44

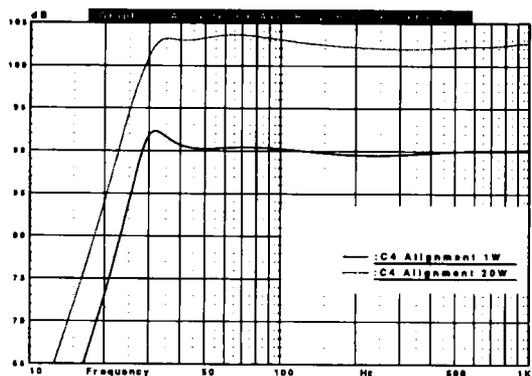


Figure 3.45

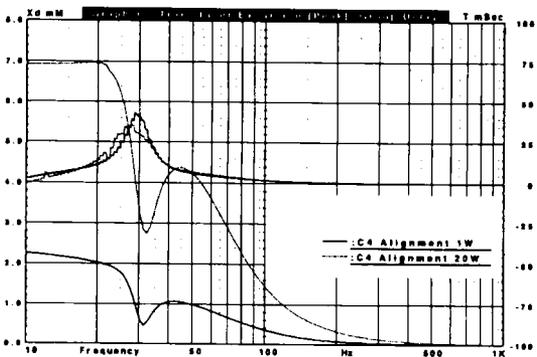


Figure 3.46

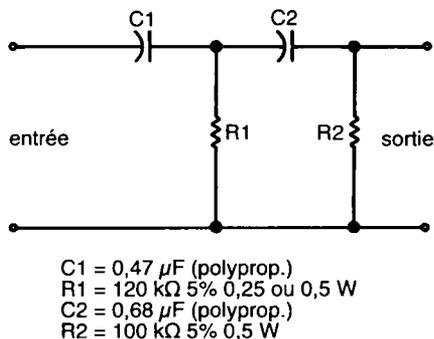


Figure 3.47 : Filtre passif passe-haut infra-sonore.

une longueur relativement élevée. L'accord de l'enceinte vers une fréquence f_b plus faible augmente encore la longueur de l'évent qui deviendra peut-être trop grand par rapport aux dimensions du coffret.

3.12 Filtre pour infra-sons

Ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 3.1, les enceintes *bass-reflex* sont très sensibles aux signaux infra-sonores, comme ceux provoqués par des disques analogiques voilés. Dans de pareilles conditions, l'excursion de la membrane du haut-parleur de graves dépassera nettement la limite d'élongation X_{max} et engendrera beaucoup de distorsion. C'est pourquoi, il est important d'utiliser un filtre passe-haut actif ou passif avec toute enceinte *bass-reflex*. Un filtre actif passe-haut de 12 dB/octave ou 18 dB/octave, comme la version KF-6 de la société *Old Colony*, est efficace, disponible en kit et de prix modique [1]. Une autre possibilité est de construire un simple filtre passif de type CR, tel celui présenté en figure 3.47. Une des particularités de ce type de filtre est que la fréquence de coupure f_3 sera sensible à l'impédance de sortie du

préamplificateur. Les valeurs données en exemple fonctionneront avec la majorité des amplificateurs à transistors, mais avec une variation d'environ ± 6 Hz de la fréquence de coupure. Bien que ce modeste circuit supprime assez efficacement les mouvements de membrane dus aux infra-sons, il est préférable de construire un filtre avec un circuit intégré tampon [10].

3.13 Amortissement de l'enceinte

La technique d'amortissement « traditionnelle », utilisée pour supprimer les ondes stationnaires dans les enceintes *bass-reflex*, consiste à tapisser une paroi sur deux d'une couche de laine de verre d'une épaisseur de 2,5 à 5 cm. Il est toutefois préférable de recouvrir toutes les parois placées à l'arrière et à côté du haut-parleur de graves avec du matériau amortissant. Colloms recommande que de tels matériaux absorbants occupent tout le volume interne de l'enceinte et pas seulement la surface des parois. L'effet de l'amortissement peut être observé par des simulations sur ordinateur. Trois enceintes du même type QB₃ que celles des simulations du paragraphe 3.5, équipées du même haut-parleur de graves de 30 cm (12"), ont été remplies avec 0%, 10% et 50% de laine de verre standard (R19). Le remplissage à 10% fut obtenu en tapisant une paroi sur deux avec de la laine de verre de 2,5 cm d'épaisseur. Le remplissage à 50% consista à recouvrir les quatre côtés et la face arrière avec une épaisseur de 7,5 cm. Les résultats, dans les figures 3.48 à 3.50, sont présentés sous forme de graphes calculés par ordinateur. Les courbes SPL de la figure 3.48 ont peu changé. De même, les variations d'amortissement de la figure 3.49, concernant le retard de groupe, donnent des écarts négligeables. De la même manière, les courbes d'impédance de la figure 3.50 ne montrent que des changements mineurs. Ainsi l'intérêt essentiel, au vu des

courbes, proviendrait de l'affaiblissement des ondes stationnaires, ce qui ferait de l'enceinte remplie à 50% une solution intéressante. Veillez à ne pas boucher l'évent lors du remplissage...

3.14 Configuration à deux haut-parleurs de graves

Toutes les considérations du paragraphe 2.9 concernant les enceintes closes s'appliquent aux enceintes *bass-reflex*. La seule exception est celle des configurations en haut-parleurs de graves (*woofer* en anglais, « boomer » dans le jargon) jumelés. Dans certains cas, l'enceinte plus petite risque d'exiger un évent trop long au regard des dimensions de l'enceinte.

Des exemples d'enceintes *bass-reflex* à haut-parleurs de graves jumelés ont été publiés dans les articles suivants de la revue *Speaker Builder* :

1. John Cockroft, *The Demonstrator : A Vented, Compound Speaker system*, 2/87.
2. Chris Edmonson, *A Thunderbird Isobarik*, 3/89, (Hi-Fi auto)

3.15 Événements résistifs et événements multiples

D'après les analyses de Thiele [4], les événements résistifs (résistances séries sous la forme de matériau fibreux ou de tissu tendu à travers l'évent) et les événements multiples (résistance parallèle sous forme de plusieurs trous réunis à la place d'un seul grand évent) provoquent dans une enceinte *bass-reflex* normale les changements suivants :

1. augmentation de la fréquence f_3
2. baisse du niveau de sortie (efficacité)

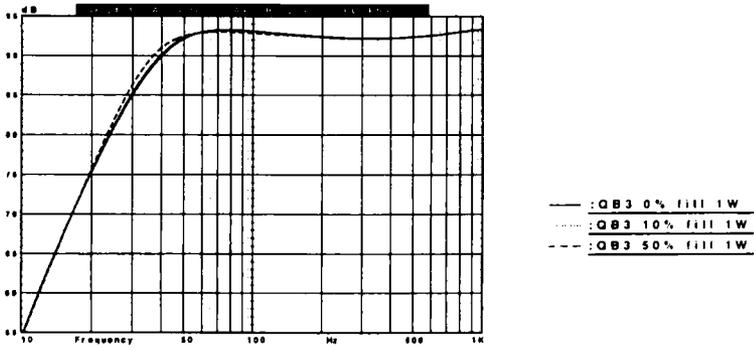


Figure 3.48

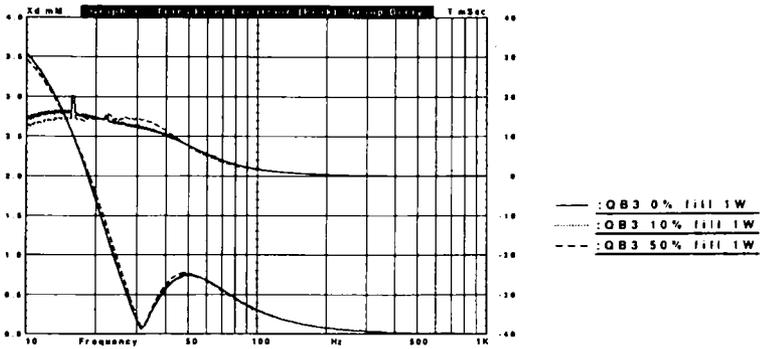


Figure 3.49

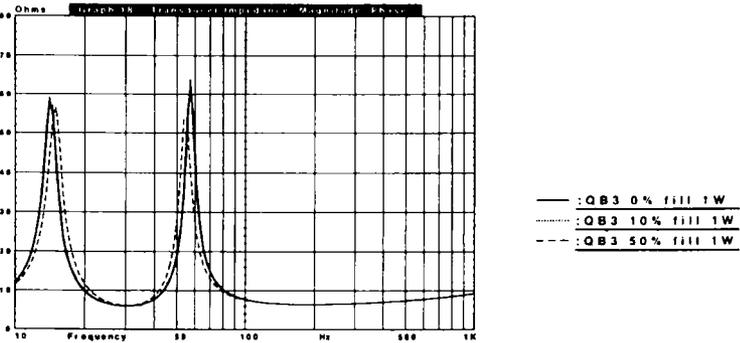


Figure 3.50

3. augmentation de l'excursion de la membrane près de la fréquence de coupure
4. affaiblissement du coefficient Q_s .

D'après Thiele, si un alignement normal, sans résistance, a une fréquence de coupure plus faible et une efficacité plus élevée que l'enceinte de même volume équipée d'une charge résistive, pourquoi se compliquer la vie ? Comme pour les enceintes closes, il est parfois intéressant de pouvoir effectuer une petite correction par cette méthode, surtout quand l'enceinte est déjà montée.

Suit une liste des différentes techniques que vous pouvez appliquer. Indépendamment des désavantages déjà signalés précédemment, pour appliquer avec succès l'une de ces méthodes, il vous faudra procéder par tâtonnements successifs et refaire plusieurs fois les mesures :

A. Amortissement des ouvertures à l'arrière du saladier. Une des méthodes les plus efficaces pour réduire le coefficient Q du haut-parleur est de tendre du tissu, dont la caractéristique acoustique est d'être résistif, sur les ouvertures arrières du châssis du haut-parleur de graves [1,11]. La toile adhésive se prête bien à cet usage. Plusieurs couches seront nécessaires jusqu'à l'obtention de la valeur recherchée du coefficient Q . Cette méthode d'ajustage du coefficient Q est préférable à celle qui consiste à ajouter une résistance à l'évent.

B. Amortissement de l'évent. Pour ajouter une résistance à l'évent, on peut utiliser du Dacron, de la laine naturelle, de la laine de verre ou de la mousse synthétique. Un tissu raide et poreux, tendu à l'extrémité de l'évent, aura le même effet.

C. Remplissage de l'intérieur de l'enceinte. Si vous remplissez le volume de l'enceinte avec de la laine de verre ou du Dacron, vous aurez des résultats similaires à ceux du para-

graphe B, mais le bourrage augmentera la qualité du registre médium du haut-parleur [11].

D. Évent freiné. Cette technique, une variante de l'idée utilisant les événements multiples, fonctionne plutôt bien. Remplissez simplement l'évent avec un paquet de paille synthétique ou de carton ondulé enroulé. Cette méthode est plus facile à ajuster que celle utilisant une résistance série. Par tâtonnements successifs, vous pouvez modifier la longueur de l'évent jusqu'à obtenir la même fréquence d'accord qu'avec un évent vide. La mesure du coefficient Q_L vous donnera une indication sur l'importance de votre modification.

3.16 Enceintes bass-reflex avec compensation électronique

Dans la première publication de Thiele, apparaissait l'idée remarquable de prendre un alignement de type QB_3 ou C_4 , d'abaisser sa fréquence d'accord, de rajouter électriquement une quantité de grave limitée (à l'opposé de l'amplification importante du grave, effectuée sur les enceintes closes à compensation électronique), ce qui, associé à un filtre infra-sonore, permettait d'abaisser la fréquence de coupure basse f_3 d'environ une demi octave. Depuis cette première publication de Thiele, plusieurs auteurs ont traité ce sujet [12,13,14], mais personne ne l'a fait aussi complètement que Robert Bullock dans son article sur les alignements d'ordre six publié dans *Speaker Builder* (1/82). Le tableau 3.14 compare, pour les trois types d'alignements, la version avec compensation électronique et la version sans compensation électronique. En observant le tableau 3.14, on constate qu'il suffit d'une relativement faible amplification du grave pour que les modèles de type 1 étendent leur domaine de grave d'environ une demi-octave. Bien que les modèles de type

Tableau 3.14

avec compensation électronique ($Q_L = 7$)			sans compensation électronique ($Q_L = 7$)		
Q_{ts}	type	gain dB	f_3/f_s	Q_{ts}	f_3/f_s
0,3	I	5,1	1,098	0,31	1,573 (QB3)
0,3	II	1,7	1,990	0,30	1,573 (QB3)
0,55	III	6,3	1,009	0,49	0,735 (C4)

deux et trois aient une fréquence de coupure f_3 plus haute, leur niveau de sortie SPL sans distorsion est plus élevé que les versions sans compensation électronique. Quoique les sources de grande étendue dynamique, comme celle des disques compacts, rendent discutable l'emploi de toute amplification supplémentaire de grave à de forts niveaux sonores, l'alignement d'ordre six est une manière bien plus intéressante de manipuler le registre grave que ne le permettent les circuits utilisés dans les enceintes closes assistées électroniquement (paragraphe 2.1). Pour plus de détails et pour la description d'une méthode facile pour adapter un filtre KF-6 de la société *Old Colony*, reportez-vous aux articles de *Speaker Builder* cités précédemment. Bien que, pour les enceintes compensées électroniquement, les enceintes *bass-reflex* ne produisent pas des excursions de membrane aussi catastrophiques que celles des enceintes closes, il y a des limites à ne pas franchir. À partir de la méthode décrite dans l'article publié dans *Speaker Builder* (1 / 82) (page 20 à 24) par Bullock, nous avons effectué une simulation sur ordinateur pour montrer les effets sur la dynamique d'un système de type un d'ordre six. À nouveau, les paramètres du même haut-parleur de graves de 30 cm (12") furent utilisés en association avec une enceinte alignée en QB3. Le volume V_b de l'enceinte était de 76,5 l et sa fréquence d'accord f_b de 24,8 Hz. La fréquence d'accord du filtre actif était de 27,14 Hz avec un coefficient Q de 1,77, ce qui provoque une remontée du grave de 5,33 dB. La figure 3.51 permet de comparer les deux courbes de réponse SPL avec une puissance d'1 W d'entrée pour

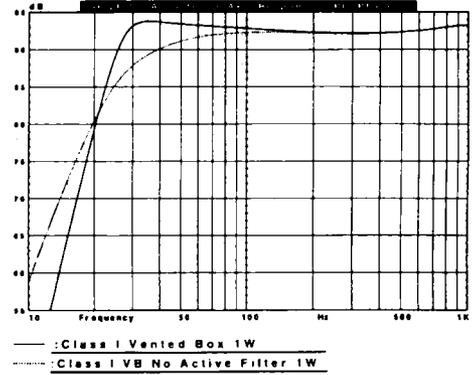


Figure 3.51

l'enceinte avec filtre et pour l'enceinte sans filtre électronique. La fréquence de coupure F_3 et sa pente associée furent dans les deux cas les suivantes :

type	f_3	dB/oct.
-	36 Hz	20
filtre	26 Hz	34

L'extension en fréquences basses est bien la demi octave prévue, mais la pente d'atténuation à la fréquence de coupure est beaucoup plus forte. Dans les courbes de retard de groupe, simulées à 1 W, on constate à la figure 3.52, que le coude de la courbe de l'enceinte munie d'un filtre actif est beaucoup plus prononcé et que son retard de groupe a augmenté pratiquement d'un facteur de trois. La figure 3.53 montre les courbes d'excursion de membrane et celles de retard de groupe pour une puissance d'entrée de 20 W. L'élongation maximale n'est que de 5,8 mm pour l'ensemble haut-parleur de graves / filtreactif ; de plus, la montée typique de l'excursion, en dessous de la fréquence f_b , a été réduite à un niveau plus faible. Compte tenu de la valeur de X_{max} , qui est de 6 mm pour le haut-parleur, ce système de type un devrait avoir de bonnes performances pour les forts niveaux sonores SPL. Le seul

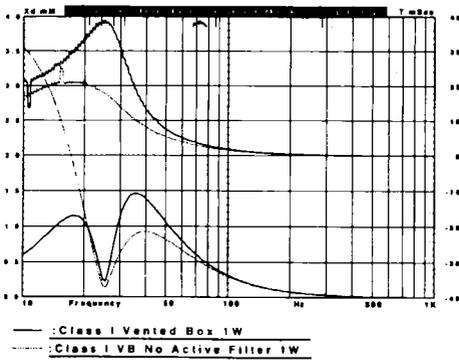


Figure 3.52

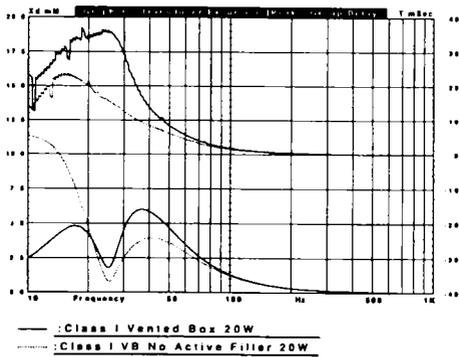


Figure 3.53

inconvenient, ou compromis, est la modification importante de l'amortissement qui accompagne l'utilisation du filtre. Si l'ensemble était mis en application comme caisson de graves ou *subwoofer* et filtré en passe bas à 75 Hz avec une pente de 24 dB/octave, la perte en performance pour le régime transitoire ne serait certainement pas audible.

3.17 Enceintes *bass-reflex* à charges symétriques

Le calcul des enceintes *bass-reflex* à charges symétriques est nettement plus compliqué que celui de leurs homologues à enceintes closes, décrites au chapitre 2. Bien que ce principe induise une grande souplesse lors de la mise au point, personne n'a encore publié de méthode de calcul avec calculatrice de poche pour concevoir cette variété d'enceintes. Il semble bien que plusieurs des modèles, qui ont été mis sur le marché ces dernières années par des fabricants, ont été mis au point par tâtonnements successifs. Plusieurs logiciels capables de procéder à des simulations de ce type d'enceinte sont disponibles aujourd'hui. Les trois logiciels qui entrent actuellement en ligne de compte sont : *Low Frequency Designer* de Speakeasy, *Speak* de DLC Design, *LEAP 4.0* de Audio Technology Inc. Le logiciel *LEAP 4.0* fut utilisé pour faire des simulations avec le même haut-parleur de graves de 30 cm (12") que celui qui a servi dans la plupart des essais précédents de ce chapitre. La cavité arrière avait un volume de 160 l et fut accordée à 21 Hz, tandis que la cavité avant avait un volume de 35 l et une fréquence d'accord de 48 Hz. L'ensemble était une enceinte plutôt grande, avec un volume total de presque 200 l. La figure 3.54 montre les courbes de réponse obtenues pour des puissances d'entrée de 1 W et de 20 W. La coupure en basse fréquence se fait à $f_{3L} = 15$ Hz avec une pente de 16 dB/octave, et en haute fréquence à $f_{3H} = 78$ Hz avec une pente de 15 dB/octave. L'efficacité de 90 dB est environ la même que pour les autres alignements décrits pour ce haut-parleur de graves ; de ce fait, le compromis essentiel consiste à choisir entre le volume de l'enceinte et l'extension de la réponse en basses fréquences. La figure 3.55 montre les courbes de retard de groupe et celles d'excursion de membrane. Les excursions de membrane, comme pour toutes les enceintes *bass-reflex*, augmentent en dessous de la fréquence de résonance basse.

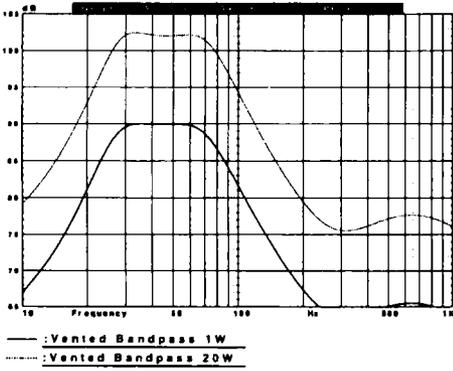


Figure 3.54

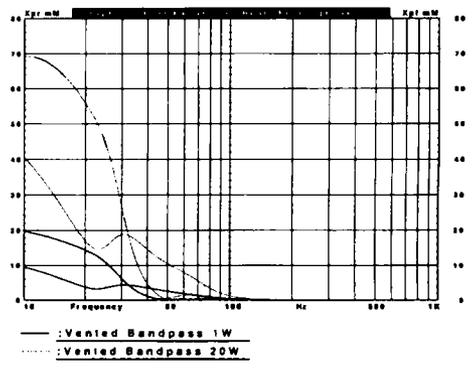


Figure 3.57

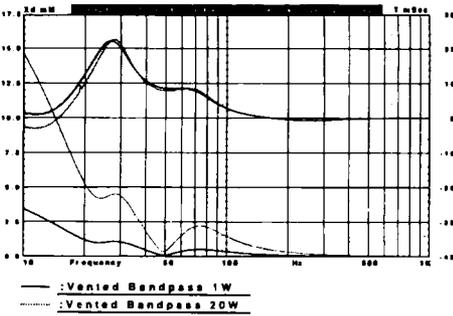


Figure 3.55

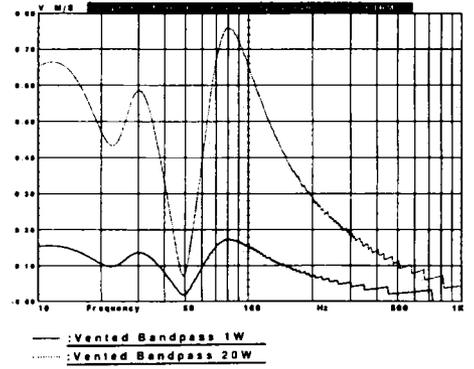


Figure 3.58

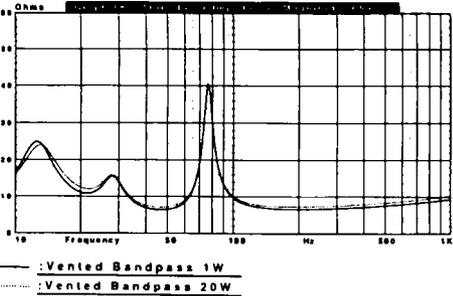


Figure 3.56

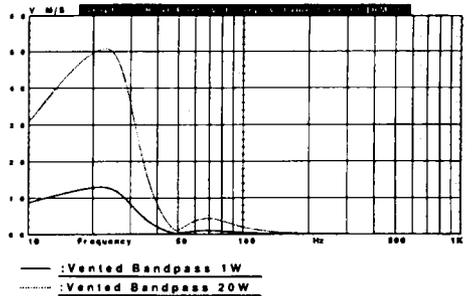


Figure 3.59

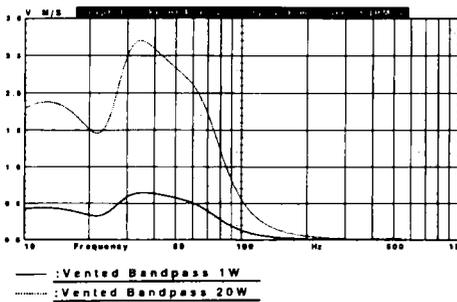


Figure 3.60

Mais même à 20 W, cette excursion n'est au maximum que de 4,4 mm au-delà de la fréquence d'accord, alors que l'élongation X_{\max} est de 6 mm. Le retard de groupe, pour cette combinaison particulière haut-parleur de graves/enceinte, avec une valeur maximale de 20 ms, est élevé, si on le compare aux autres alignements. Les courbes d'impédance de la figure 3.56 montrent la forme typique, due aux trois bosses, qui est caractéristique des enceintes *bass-reflex* à charges symétriques. Les figures 3.57 à 3.60 montrent les déplacements d'air dans les événements avant et arrière, la vitesse de la membrane du haut-parleur, la vitesse du volume d'air de l'événement arrière et de l'événement avant.

Bibliographie

1. R. Small, *Vented-Box Loudspeakers Systems*, JAES, 6 à 10/73
2. M. Lampton & L. Chase, *Fundamentals of Loudspeaker Design*, Audio, 12/73
3. D. B. Keele, Jr., *Sensitivity of Thiele's Vented Loudspeaker Enclosure Alignments to Parameter Variations*, JAES, 5/73
4. A. N. Thiele, *Loudspeakers in Vented-Boxes*, JAES, 5-5/71
5. R. Bullock III, *Thiele, Small and Vented Loudspeaker Design*, *Speaker Builder* 3/81
6. W. J. J. Hoge, *A New set of Vented Loudspeaker Alignments*, JAES, Vol. 25 1977
7. M. E. Engebretson, *Low Frequency Sound Reproduction*, JAES, 5/84
8. H. D. Harwood, *Examination of Distortion Caused by Different Types of Loading at Low Frequencies*, *Wireless World*, 11/74
9. A. Shure, *Filters and Attenuators*, Rider Publications, 4/61
10. W. Jung, *A L.F. Garbage Filter*, *Audio Amateur*, 4/75
11. J. Graver, *Acoustic Resistance Damping for Loudspeakers*, Audio, 5/65
12. D. B. Keele, Jr., *A New Set of Sixth-Order Vented-Box Loudspeaker System Alignments*, JAES, 6/75
13. R. Bywater & H. Wiebell, *Alignment of Filter Assisted Vented-Box Loudspeaker Systems*, JAES, 5/82
14. R. Normandin, *Extended Low Frequency Performance of Existing Loudspeaker Systems*, JAES, 1-2/84
15. G. J. Krauss, *Low Frequency Transient Response Problems in Vented Boxes*, 88^e convention de l'AES, 3/90, publication préliminaire n° 2895.
16. G. R. Koonce, *The QB₃ Vented Box is Best*, *Speaker Builder* 5/88, p. 22

4 Enceintes acoustiques à radiateur passif

4.1 Définition

Les enceintes acoustiques à radiateur passif (*Passive-Radiator*, PR) sont une variante des enceintes *bass-reflex*, où l'évent a été remplacé par un haut-parleur passif, appelé également radiateur passif ; les méthodes de conception de ces enceintes sont proches des méthodes de mise au point des enceintes *bass-reflex* et en possèdent les mêmes caractéristiques. Les radiateurs passifs, ou membranes passives, comme on les nomme parfois, présentent deux grands avantages par rapport aux événements. Premièrement, ils éliminent les colorations sonores (comme les résonances du type "tuyau d'orgue »), les bruits d'écoulement d'air et l'importante transmission de sons de fréquences élevées, provenant de l'intérieur de l'enceinte. Deuxièmement, c'est une solution pratique pour les petites enceintes, dont l'évent serait trop long au regard des dimensions du coffret. Les enceintes à radiateur passif sont plus faciles à concevoir, car elles requièrent moins de calculs d'alignement et moins de calculs de pertes. En contrepartie, les enceintes à radiateur passif ont une pente d'atténuation à la fréquence de coupure basse plus prononcée (et une moins bonne stabilité en régime transitoire), une fréquence de coupure (f_3) légèrement plus élevée et des pertes globalement plus grandes (Q_L) que les enceintes *bass-reflex*. Une erreur commune à propos des radiateurs passifs est de croire qu'ils fonctionnent essentiellement dans le registre grave, puis, quand la fréquence augmente, qu'ils amplifient le niveau de grave du haut-parleur de graves (*boomer*) par couplage mécanique. Effectivement, le radiateur passif fonctionne simultanément avec le haut-parleur de graves dans le grave, en partageant la charge acoustique et en réduisant ainsi l'excursion de la membrane du haut-parleur de graves. Comme il fonctionne de la même manière qu'un événement et qu'il est passif,

s'il émet de l'énergie acoustique, c'est que celle-ci aura été soustraite ailleurs. Ceci implique que le radiateur passif a les mêmes attributs positifs que l'évent de l'enceinte *bass-reflex* : il confère à l'enceinte une plus grande tenue en puissance et une distorsion plus faible.

4.2 Historique

Les enceintes à radiateur passif furent décrites en premier par Harry Olson en 1935, dans son brevet *Loudspeaker and Method of Propagating Sound*. Excepté l'article publié par Olson en 1954 [1], il y eut peu de publications, à propos des radiateurs passifs, et il fallut attendre l'article de Nomura et Kitamura, publié à l'IEEE en octobre 1973 [5], ainsi que l'article de R. Small dans le *JAES* d'octobre 1974 [2]. Aux États-Unis, la société Polk Audio est l'un des fabricants d'enceintes à radiateur passif les plus connus.

4.3 Coefficient Q du haut-parleur et réponse de l'enceinte

Les enceintes à radiateur passif présentent environ la même relation entre le coefficient Q et le coffret que les enceintes *bass-reflex* ; de ce fait, elles seront étudiées de façon analogue. La figure 4.1 compare les courbes de réponse SPL d'une enceinte close, d'une enceinte *bass-reflex* et d'une enceinte à radiateur passif, équipées toutes trois du même haut-parleur. La caractéristique qui distingue les enceintes à radiateur passif des enceintes *bass-reflex* est le « trou » dans la courbe de réponse, à la fréquence de résonance du radiateur passif

(f_p). Située en dessous de la coupure en basse fréquence, cette dépression accentue la coupure du haut-parleur dans ce domaine, et dégrade les performances du régime transitoire. La version à radiateurs passifs couplés de Clarke (traitée en fin de chapitre) résout en grande partie ce problème.

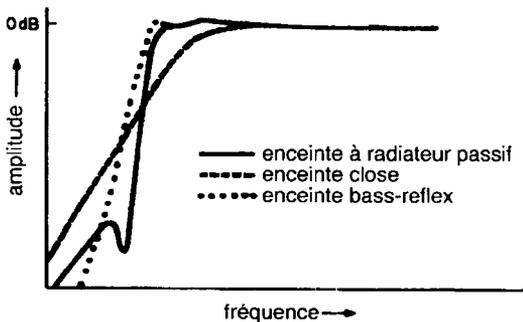


Figure 4.1 : Comparaison des courbes de réponse de trois enceintes (close, bass-reflex et à radiateur passif), chacune équipée du même haut-parleur de graves.

4.3.1 Choix du haut-parleur de graves

On suivra les mêmes procédures que pour le choix des haut-parleurs pour enceintes *bass-reflex* décrites au paragraphe 3.4.

4.4 Les différents alignements

Les alignements pour les enceintes à radiateur passif sont généralement limités aux types QB₃, B₄ et C₄ [2]. Les coefficients Q_s au-dessus de 0,5 ne sont pas viables, car leurs réponses de type C₄ sont affectées par une ondulation excessive dans la courbe de réponse en fréquence. Ceci réduit le choix du coefficient Q_s , pour une réponse plate, à des valeurs situées entre 0,2 à environ 0,35, dans le cadre d'alignements de type QB₃. Il n'y a pas eu, à ce jour, de publication concernant un éventuel alignement à compensation élec-

tronique pour les enceintes à radiateur passif. Les alignements à faible α ont un comportement en régime transitoire plutôt mauvais et donnent une réponse en fréquence avec de fortes ondulations de type C₄ (un α compris entre 1 et 2 correspond à un coefficient Q_s compris entre 0,44 et 0,35). Ceci est valable pour les analyses effectuées par Small, qui affirme que le rapport de compliance du radiateur passif (δ ou delta) est égal au rapport de compliance α (α) de l'ensemble du système. En d'autres mots, le radiateur passif est construit avec une membrane, une suspension périphérique, une suspension de centrage et un châssis identiques à ceux du haut-parleur de graves ($\delta = \alpha$). Par contre, si le radiateur passif est plus souple que le haut-parleur de graves, alors des alignements à faible α (Q_{ts} élevés) ressembleront à leurs équivalents *bass-reflex* et auront une réponse acceptable en régime transitoire. La figure 4.2 présente la courbe de réponse en fréquence et la courbe de phase obtenues grâce à une simulation par ordinateur d'un alignement de type QB₃ avec radiateur passif où $\delta = \alpha$.

On a utilisé ici le même haut-parleur de graves de 30 cm (12") que dans l'enceinte *bass-reflex* du chapitre 3. La réponse fut obtenue pour une puissance de 1 W et représente la forme caractéristique de la courbe d'une enceinte à radiateur passif, pour ce qui concerne la partie inférieure de la pente d'atténuation en basse fréquence. Le volume de l'enceinte, 57 l, est le même que pour la version *bass-reflex* de type QB₃ ; par contre, la version avec radiateur passif est accordée à 18 Hz, fréquence plus faible que pour la version avec évent, dont la fréquence d'accord est 31 Hz. Lors d'un alignement du type $\delta = \alpha$, la surface de la membrane du radiateur passif et sa compliance sont identiques à celles du haut-parleur de graves. Une masse de 131,9 g a été nécessaire pour accorder le radiateur passif de 30 cm (12") à la fréquence requise. La fréquence de coupure basse f_3 de l'enceinte à radiateur passif est de 41 Hz avec

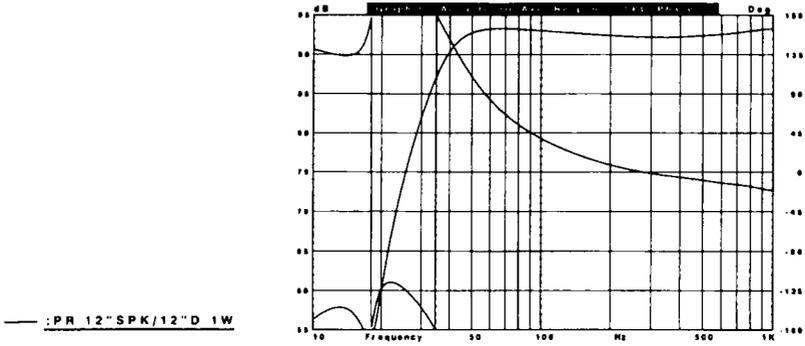


Figure 4.2

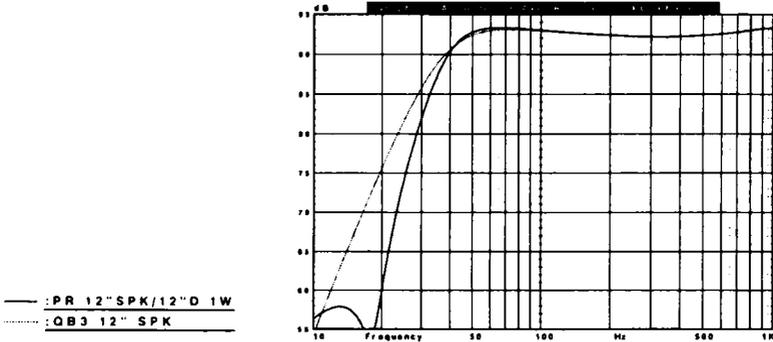


Figure 4.3

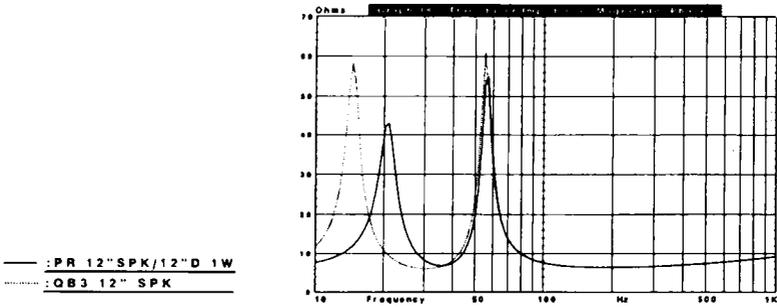


Figure 4.4

une pente de 29 dB/octave. La figure 4.3 compare, pour une puissance de 1 W, la courbe de réponse de l'enceinte à radiateur passif de type QB₃ à celle de son homologue *bass-reflex*, également de type QB₃. Dans cet exemple, l'enceinte *bass-reflex* a une meilleure réponse en basse fréquence que celle à radiateur passif. Malgré une légère perte dans le bas du registre grave pour le même haut-parleur de graves, le principal avantage de l'enceinte à radiateur passif, par rapport à l'enceinte *bass-reflex*, est de ne pas souffrir des résonances de tuyau, ni de la transmission, via l'évent, des ondes stationnaires qui se forment à l'intérieur du coffret. Les enceintes à radiateur passif ont, sur le plan de la perception subjective, une coloration sonore qui leur est propre et qui se distingue notamment de celle des enceintes *bass-reflex*. La figure 4.4 reproduit la courbe d'impédance des deux enceintes. La figure 4.5 rend compte, pour les deux types d'enceintes, des variations de dynamique dans la réponse en fréquence pour une puissance de 20 W, ce qui conduit à un niveau de pression sonore (SPL) d'environ 105 dB dans les deux cas. Les résultats confirment la chute attendue de l'amortissement, qui est accompagnée d'une légère augmentation de la fréquence de coupure à -3 dB à 42 Hz. Les courbes de retard de groupe et d'excursion de membrane sont tracées dans la figure 4.6. Comme pour l'enceinte *bass-reflex*, l'excursion de la membrane est modérée, présentant un maximum de 3 mm au-dessus de la fréquence f_m , qui est la fréquence centrale entre les maxima d'impédance (à l'inverse de la fréquence d'accord du radiateur passif). La distorsion est faible, car l'élongation maximale X_{\max} est de 6 mm. Mais, comme pour les enceintes *bass-reflex*, l'excursion de la membrane croît rapidement aux basses fréquences ; de ce fait, l'usage d'un filtre passe-haut à 20 Hz est recommandé. Le retard de groupe, montré dans la même figure, est avec une valeur d'environ 10 ms le même pour les deux types d'enceintes. Par contre, le changement de phase, qui s'effectue dans les basses

fréquences au voisinage du trou, fait changer de signe le retard de groupe, qui devient négatif. La figure 4.7 représente la courbe d'excursion du radiateur passif, elle est à son maximum à la fréquence d'accord du radiateur passif. La figure 4.8 affiche la courbe de vitesse de la membrane du haut-parleur, dont la forme est similaire à celle d'un alignement *bass-reflex* de type QB₃ : on constate que la vitesse est maximale lorsque l'impédance est maximale, et inversement que la vitesse est minimale lorsque l'impédance est minimale. Comme on le constate dans la figure 4.9, la vitesse de la membrane du radiateur passif est maximale, lorsque celle de la membrane du haut-parleur est minimale. Les procédures utilisées pour calculer des enceintes à radiateur passif, ainsi que celles de l'exemple ci-dessus, sont limitées aux radiateurs passifs dont la membrane et la compliance sont les mêmes que celles du haut-parleur de graves. L'utilisation de radiateurs passifs, de dimension ou de compliance différentes de celles du haut-parleur de graves, demande de procéder par tâtonnements successifs ou de faire appel à l'un des logiciels de CAO pour enceintes acoustiques disponibles sur le marché. Il existe encore une autre méthode, non exposée dans ce livre, qui permet d'utiliser différents types de radiateurs passifs, et qui a été publiée sous le titre *Generalized Design Method of Lossy Passive-Radiator Loudspeaker System* par Carrion-Isbert, AES preprint n° 2539.

4.4.1 Calcul du volume de l'enceinte et des principaux paramètres

À part les paramètres concernant le radiateur passif, vous pouvez calculer le volume de l'enceinte et la fréquence d'accord d'une enceinte à radiateur passif, de la même manière que pour une enceinte *bass-reflex*. Commencez par réunir, pour le haut-parleur, les paramètres suivants :

f_s fréquence de résonance à l'air libre, calculée sur un baffle plan, simulant

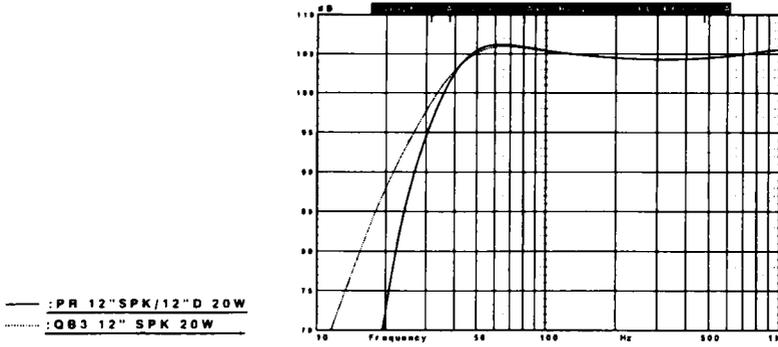


Figure 4.5

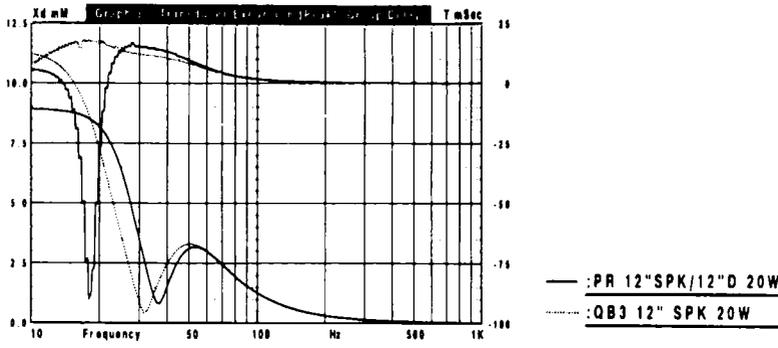


Figure 4.6

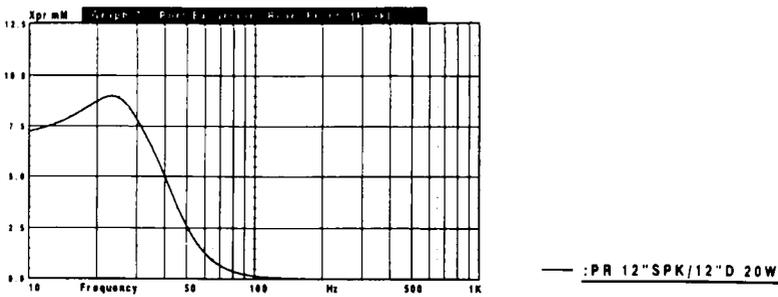


Figure 4.7

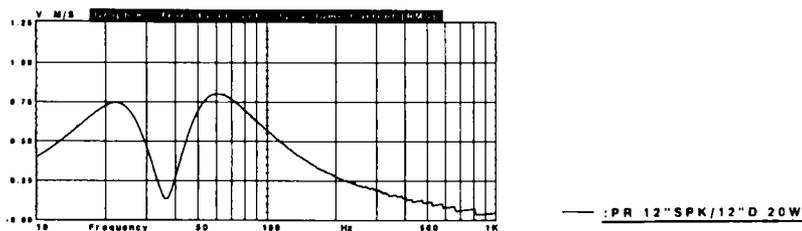


Figure 4.8

la charge de l'enceinte finale (même dimension que sa face avant)

- Q_{ts} coefficient total de surtension du haut-parleur de graves, incluant toutes les résistances séries
- V_{as} volume d'air équivalent à la compliance du haut-parleur
- X_{max} longueur de la bobine mobile dépassant de l'entrefer
- S_d surface efficace de rayonnement du haut-parleur de graves en m^2
- V_d volume d'air déplacé par la membrane en m^3
- S_{dp} surface du radiateur passif
- δ (delta), rapport de compliance du radiateur passif

Vous pouvez obtenir les six premiers paramètres de la même manière qu'au paragraphe 3.6. Calculez S_{dp} en utilisant la formule pour le calcul de la surface S_d du haut-parleur, qui figure dans le chapitre 2. La détermination de delta (δ) demande une procédure de mesure supplémentaire, qui est décrite au paragraphe 4.5.

4.5 Détermination du rapport δ pour les radiateurs passifs

La technique décrite ci-dessous est une variante d'une méthode proposée par Weems [3] pour l'accord d'enceintes *bass-reflex*, et adaptée aux radiateurs passifs par G.R. Koone [4].

Définition de termes complémentaires :

- V_T volume de test égal à V_b en m^3
- C_{ab} compliance acoustique de l'enceinte
- C_{mp} compliance mécanique du radiateur passif en mètre / newton
- C_{ap} compliance acoustique du radiateur passif = $C_{mp} \times S_{dp}^2$
- S_{dp} surface du radiateur passif en m^2
- V_{ap} volume d'air équivalent à la compliance du radiateur passif

La procédure suivante fonctionne avec tout type de radiateur passif, que ce soient des radiateurs passifs, fabriqués à partir de haut-parleurs démunis de moteurs, ou des radiateurs passifs construits avec un morceau de carton plat comme membrane et une bordure en mousse comme suspension périphérique.

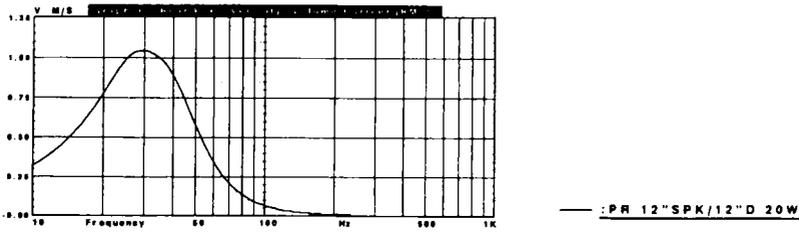


Figure 4.9

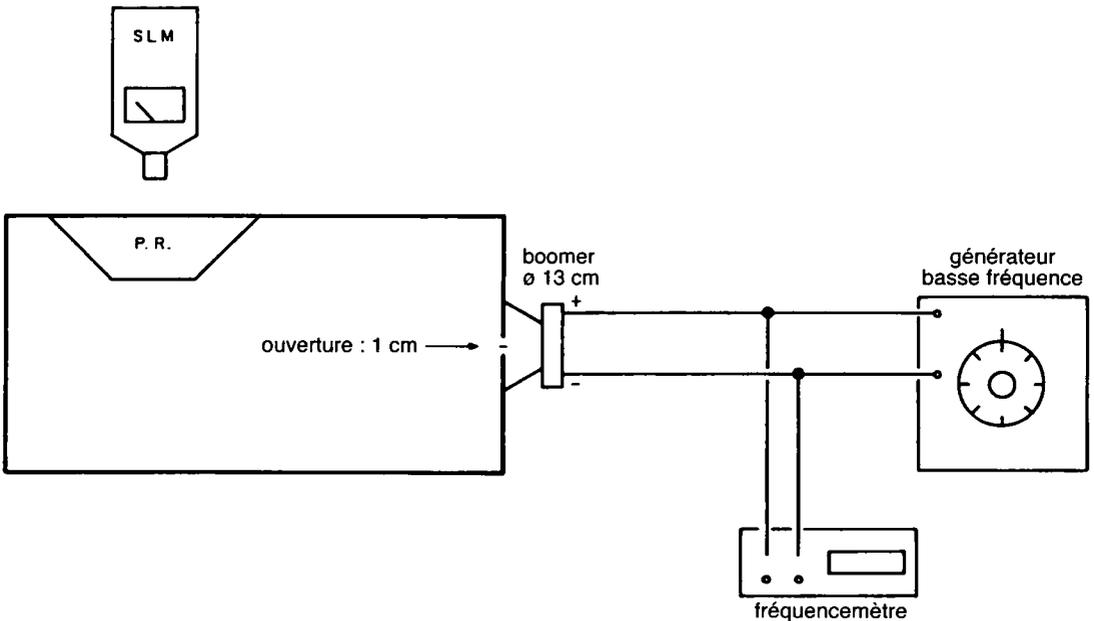


Figure 4.10 : Montage pour déterminer l'excursion maximale de la membrane du radiateur passif.

A. Pour calculer V_{ap} , déterminez d'abord la fréquence de résonance à l'air libre du radiateur passif f_p . Fixez le radiateur passif sur un baffle plan (de la même dimension et de la même forme que la face avant de l'enceinte utilisée pour mesurer V_{ap}), excitez-le avec un haut-parleur placé juste derrière lui, de l'autre côté du baffle, pour coupler le mouvement du

haut-parleur à celui du radiateur passif. Alimentez le haut-parleur avec un générateur basse fréquence et faites varier la fréquence, jusqu'à ce que l'élongation de la membrane du radiateur passif soit maximale. Cette fréquence se détermine en observant le mouvement de la membrane du radiateur passif.

B. En utilisant le montage de la figure 4.10, faites varier la fréquence du générateur, jusqu'à ce que vous ayez trouvé la fréquence de résonance f_c de l'enceinte. Vous calculerez V_{ap} par la relation :

$$V_{ap} \approx V_T [(f_c/f_p)^2 - 1]$$

Puis :

$$C_{ap} = \frac{V_{ap}}{1,42 \cdot 10^5}$$

C. Le coefficient C_{ab} de l'enceinte étudiée est calculé par :

$$C_{ab} = \frac{V_{ab}}{1,42 \cdot 10^5}$$

D. Enfin, calculez delta (δ), rapport de compliance du radiateur passif :

$$\delta = \frac{C_{ap}}{C_{ab}}$$

Une autre méthode, qui évite de percer, puis de boucher un trou dans l'enceinte, permet de calculer alpha en utilisant le coffret final. Commencez par relever une courbe d'impédance (comme en 3.10). Puis, en supposant que $f_M = f_B$:

$$f_{sb} = \frac{f_L \cdot f_H}{f_B}$$

Puis :

$$\alpha = \left(\frac{f_H^2 + f_L^2 - f_B^2}{f_{SB}^2} \right) - 1$$

Pour déterminer δ , résolvez l'équation suivante :

$$\frac{\alpha \cdot \delta}{\alpha + \delta + 1} = \frac{(f_H^2 - f_B^2)(f_B^2 - f_L^2)}{f_L^2 \cdot f_H^2}$$

4.5.1 Calcul du volume de l'enceinte et des principaux paramètres à partir du tableau 4.1

Vous n'aurez à utiliser qu'un seul tableau (le tableau 4.1) pour les calculs, car, comme les enceintes à radiateur passif ont des pertes importantes, généralement de l'ordre de $Q_L = 7$, elles ne relèvent que d'un seul type d'alignement. Ce tableau s'utilise de la même manière que pour le calcul des enceintes *bass-reflex* ; notez toutefois le rapport supplémentaire V_{pr}/V_d , qui est le rapport du volume défini par le déplacement du radiateur passif au volume défini par le déplacement de la membrane du haut-parleur.

$$\text{Volume de l'enceinte } V_b = \frac{V_{as}}{\alpha}$$

$$\text{fréquence de coupure } f_3 = (f_3/f_s) \cdot f_s$$

$$\text{fréquence d'accord } f_B = H(f_s)$$

Excursion du radiateur passif

$$V_{pr} = (V_{pr}/V_d) \cdot V_d$$

4.5.2 Emplacement du radiateur passif et couplage mutuel

La grande distance entre le centre du haut-parleur et le centre du radiateur passif (comparée à la distance plus faible entre le centre de l'évent et celui du haut-parleur pour les enceintes *bass-reflex*) ne semble guère affecter les performances de l'enceinte, malgré la proximité du montage.

4.5.3 Accorder une enceinte à radiateur passif

On accorde une enceinte à radiateur passif de la même manière qu'une enceinte *bass-reflex* (paragraphe 3.7.2). Seule la méthode d'ajustement de la fréquence d'accord diffère. Pour une enceinte *bass-reflex*, on ajuste la longueur de l'évent, alors que pour une enceinte à

Tableau 4.1

$Q_L = 7$
Enceinte à radiateur passif de
type QB₃, B₄ et C₄
 $\delta = \alpha$

Q_{ts}	H	α	f_3/f_s	V_{pr}/V_d
0,2000	2,10	8,21	2,65	1,81
0,2100	2,02	7,26	2,51	1,84
0,2200	1,94	6,38	2,36	1,88
0,2300	1,88	5,76	2,26	1,92
0,2400	1,82	5,20	2,16	1,98
0,2500	1,77	4,76	2,06	2,02
0,2600	1,73	4,33	1,98	2,07
0,2700	1,68	4,01	1,90	2,10
0,2800	1,64	3,65	1,82	2,15
0,2900	1,59	3,34	1,74	2,20
0,3000	1,56	3,08	1,67	2,24
0,3100	1,51	2,78	1,59	2,35
0,3200	1,48	2,58	1,53	2,44
0,3300	1,45	2,38	1,49	2,53
0,3400	1,42	2,20	1,44	2,61
0,3500	1,39	2,06	1,38	2,67
0,3600	1,35	1,91	1,33	2,76
0,3700	1,33	1,80	1,30	2,84
0,3800	1,30	1,66	1,27	2,94
0,3900	1,26	1,53	1,23	3,09
0,4000	1,23	1,41	1,19	3,11
0,4100	1,21	1,30	1,17	3,19
0,4200	1,19	1,22	1,14	3,25
0,4300	1,16	1,12	1,11	3,32
0,4400	1,13	1,03	1,08	3,38
0,4500	1,10	0,96	1,05	-
0,4600	1,06	0,87	1,01	-
0,4700	1,03	0,80	0,98	-
0,4800	1,00	0,73	0,95	-
0,4900	0,98	0,69	0,92	-
0,5000	0,95	0,65	0,90	-
0,5100	0,92	0,60	0,87	-
0,5200	0,90	0,55	0,84	-
0,5300	0,87	0,52	0,82	-
0,5400	0,84	0,48	0,79	-
0,5500	0,81	0,44	0,76	-
0,5600	0,78	0,39	0,72	-
0,5700	0,75	0,37	0,69	-
0,5800	0,72	0,33	0,67	-
0,5900	0,70	0,31	0,65	-
0,6000	0,68	0,28	0,62	-

Le rapport V_{pr}/V_d ne figure plus dans le tableau pour des valeurs supérieures à $Q_{ts} = 0,4400$ parce que l'ordinateur de R. Small n'enregistrait plus les données, passé cette valeur. Si α est proche de 1, les alignements avec des valeurs élevées de Q_{ts} sont très instables en régime transitoire (si $\delta = \alpha$) ; en d'autres mots, évitez ces configurations sans intérêt.

radiateur passif, on alourdit ou on allège la membrane (avec de la pâte à modeler ou en ajoutant un cache-noyau métallique), jusqu'à l'obtention de la fréquence f_B .

4.5.4 Paramètres complémentaires

Calculez η_0 , $P_{ar(p)}$ et P_{er} de la même façon qu'avec les enceintes *bass-reflex* (paragraphe 3.8).

4.5.5 Exemples de calculs

C'est à partir des deux mêmes haut-parleurs de graves qu'au paragraphe 3.9, que furent calculés les tableaux 4.2 et 4.3.

Comme la méthode de Small spécifie $\delta = \alpha$, vous calculerez l'excursion nécessaire du radiateur passif à l'aide de :

$$\frac{V_{pr}}{S_d} = 7,5 \text{ mm}$$

Cette excursion est plus que le double de celle du haut-parleur de graves, mais reste réalisable avec la plupart des suspensions périphériques à grande compliance. Si le radiateur passif avait été fait à partir d'une membrane de 25 cm (10") de diamètre ($S_d = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$), l'excursion se serait réduite à 4,7 mm.

Avec le haut-parleur de graves de 20 cm (8"), l'excursion du radiateur passif est de 7,5 mm. Si vous utilisez un radiateur passif de 30 cm (12"), l'excursion nécessaire sera de 5,3 mm. Pour les configurations où $\delta = \alpha$, la masse nécessaire pour accorder l'enceinte à la fréquence f_B est le double de celle du haut-parleur de graves.

Tableau 4.2 : Exemple d'application avec un haut-parleur de 20 cm (8")

Q_{ts}	Q_{es}	Q_{ms}	f_s	X_{max}	S_d (m ²)	V_d (m ²)	V_{as} (ft ³)
0,26	0,28	3,95	32	3,5 mm	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$7,53 \cdot 10^{-5}$	2,764

AL	V_b ft ³	f_3 Hz	f_B Hz	V_{pr} m ³	$P_{ar(p)}$ watts	SPL	η_0 %	SPL	P_{er} watts
QB ₃	0,64	64	56	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,285	107 dB	0,91	91,6	31

Tableau 4.3 : Exemple d'application avec un haut-parleur de 25 cm (10")

Q_{ts}	Q_{es}	Q_{ms}	f_s	X_{max}	S_d (m ²)	V_d (m ²)	V_{as} (ft ³)
0,25	0,29	2,05	22	3,5 mm	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$	7,51

AL	V_b ft ³	f_3 Hz	f_B Hz	V_{pr} m ³	$P_{ar(p)}$ watts	SPL	η_0 %	SPL	P_{er} watts
QB ₃	1,64	44	38	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,151	104 dB	0,72	91 dB	20,9

4.5.6 Détermination du coefficient Q

Le début de ce chapitre a montré que le coefficient Q_L typique des pertes des systèmes à radiateur passif était de 7, ce qui nous dispense de consulter une autre table de calcul. Pour bien vérifier une enceinte terminée, recalculez le coefficient Q par la procédure décrite au paragraphe 3.1. Si le coefficient Q est proche de 5 ou de 6, vous avez une fuite d'air soit dans votre ébénisterie, soit par le joint du radiateur passif ou du haut-parleur, voire par le cache-noyau.

4.5.7 Variations de la courbe de réponse

Mêmes remarques que pour les enceintes *bass-reflex* (paragraphe 3.11).

4.5.8 Filtrage infra-sonore

Mêmes conclusions que pour les enceintes *bass-reflex* (paragraphe 3.12).

4.5.9 Amortissement

Comme pour les enceintes *bass-reflex* (paragraphe 3.13).

4.6 Enceintes à radiateur passif et à charge symétrique

Comme pour les enceintes *bass-reflex* à charge symétrique, il est impossible, sans ordinateur, d'effectuer les calculs pour les enceintes à radiateur passif et à charge symétrique. Hormis les fastidieux tâtonnements et essais successifs (sciage, collage, mesure...), la simulation par ordinateur est la seule méthode

pour mettre au point ce type d'enceintes. Actuellement, seuls deux logiciels de conception d'enceintes acoustiques sont capables de simuler une enceinte à charge symétrique munie, soit pour la cavité avant, soit pour la cavité arrière, d'un radiateur passif : Speak de DLC Design et LEAP 4.0 de Audio Teknology.

Malgré certains travaux sur les radiateurs passifs associés à des charges symétriques, tels ceux de Laurie Fincham, qui furent présentés au 63^e congrès de l'AES en 1979 (*A Bandpass Enclosure*, AES preprint n°1512), la plupart des réalisations commerciales furent du type *bass-reflex*. L'un des principaux défauts des enceintes *bass-reflex* à charge symétrique est de transmettre les ondes stationnaires de la cavité à travers l'évent d'émission, ainsi que les résonances de tuyau engendrées par ce même événement (illustré au chapitre 3). Les radiateurs passifs, qui sont installés dans la cavité d'émission, ne souffrent pas de ces maux, ou du moins à un degré moindre. La figure 4.11 permet de comparer les courbes de réponse d'une enceinte à charge symétrique équipée d'un radiateur passif dans chacune de ses deux cavités, à une enceinte à charge symétrique, dont la cavité d'émission est équipée d'un événement, et la cavité arrière d'un radiateur passif. La simulation est identique à celle décrite au chapitre 3, elle utilise les mêmes éléments : un haut-parleur de graves de 30 cm (12"), une cavité arrière de 160 l et une cavité d'émission de 60 l. Chacune des deux cavités arrière fut calculée pour un radiateur passif de 30 cm (12") ($\delta = \alpha$), qui, lesté à 104,4 g, l'accorde à 20 Hz.

La fréquence d'accord de la cavité d'émission est assez différente suivant les deux exemples. La cavité d'émission, munie du radiateur passif lesté avec 68,6 grammes, est accordée à 24 Hz, fréquence proche de celle de la cavité arrière. Le modèle muni d'un événement, lui, est accordé à 45 Hz, avec un événement de 15,2 cm (6") de diamètre et une longueur de 25,5 cm (10"). La forme générale de la

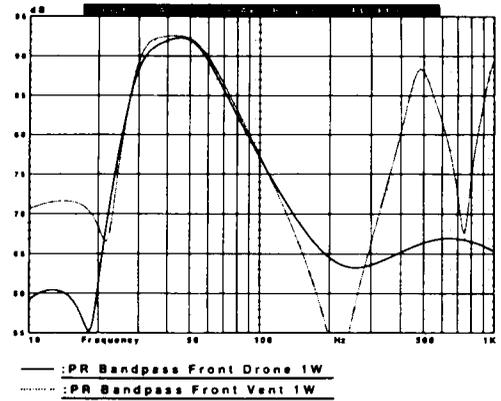


Figure 4.11

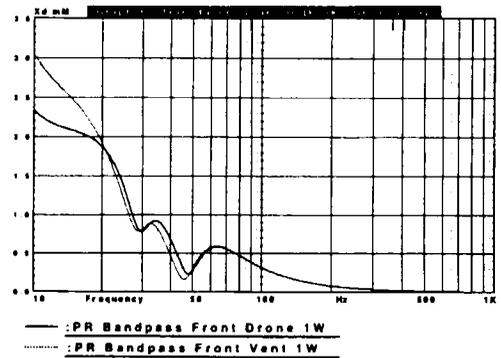


Figure 4.12

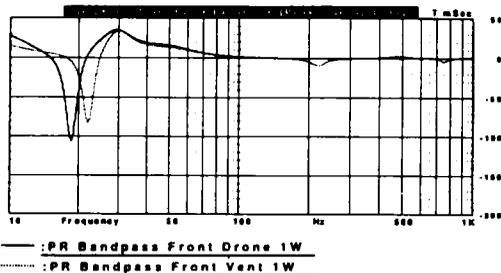


Figure 4.13

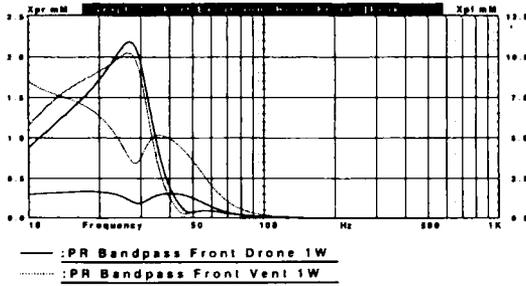


Figure 4.14

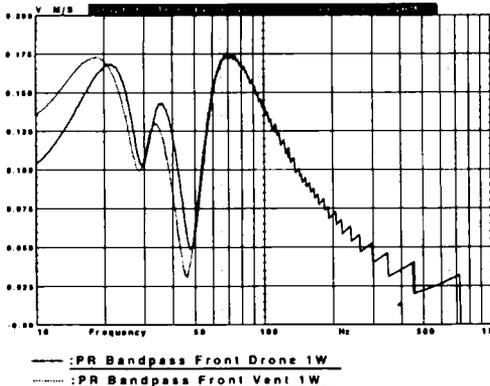


Figure 4.15

réponse en fréquence est la même, si ce n'est que le modèle à radiateur passif ne présente pas les anomalies dues aux ondes stationnaires et aux résonances de tuyau.

L'étude de la figure 4.12 montre que les courbes d'excursion de la membrane du haut-parleur de graves, dans les deux variantes à charge symétrique, sont, à peu de chose près, identiques. La figure 4.13 reproduit les courbes de retard de groupe. La figure 4.14 affiche les courbes d'excursion des radiateurs passifs des cavités arrière, ainsi que celles du radiateur passif et de l'évent des cavités d'émission. On constate, pour les cavités

d'émission, que le déplacement de l'air dans l'évent est supérieur au déplacement de la membrane du radiateur passif, ce qui reflète la différence de surface entre l'évent (15,2 cm de diamètre) et le radiateur passif (30 cm de diamètre). Dans la configuration radiateur passif / évent, la vitesse de la membrane du haut-parleur de graves est un peu supérieure en basse fréquence à celle de la configuration radiateur passif / radiateur passif (figure 4.15).

4.7 Enceintes à radiateurs passifs couplés

4.7.1 Définition

L'enceinte à radiateurs passifs couplés (*Augmented passive-radiator, APR*) est une variante à deux cavités de l'enceinte à radiateur passif classique. Elle est à même d'accepter la plupart des types d'alignement, que ce soit ceux pour enceinte *bass-reflex* ou ceux pour enceinte à radiateur passif. Pour un haut-parleur donné (Q_{ts}), l'enceinte APR aura un niveau sonore plus élevé et la fréquence de coupure grave sera réduite de 15% à 25% (jusqu'à une demi-octave d'extension). Le prix à payer pour cette extension, conséquente en basse fréquence, est une augmentation globale du volume de l'enceinte de 20%. Comparée à l'enceinte à radiateur passif, l'enceinte APR a une meilleure réponse transitoire et une fréquence de coupure plus basse. Ceci est dû au fait que la fréquence, où apparaît le « trou » typique des enceintes à radiateur passif, est abaissée et qu'elle est rejetée en dehors de la bande audio [5,6].

4.7.2 Historique

L'enceinte acoustique APR est un modèle assez récent, breveté pour la première fois par E. Hossbach en novembre 1973. Thomas

Clarke breveta une variante en février 1978. Les procédures de calcul présentées ici sont essentiellement basées sur les articles publiés par Clarke dans le *JAES* (juin, juillet et août 1981). (Voir également *Speaker Builder* 2/86, p.20).

4.7.3 Configuration

La figure 4.16 montre la configuration inhabituelle qui est celle d'une enceinte APR : deux radiateurs passifs de surfaces différentes, fixés dos à dos, établissent la liaison entre la face avant de l'enceinte et la cloison interne, qui sépare les deux cavités. Les radiateurs passifs sont constitués de suspensions périphériques et de membranes coniques (disponibles généralement auprès des réparateurs professionnels de haut-parleurs) et sont fixés directement sur les panneaux de bois, sans l'aide d'un châssis métallique. Suivant le type d'alignement utilisé, le volume V_1 occupe 33% à 75% du volume total.

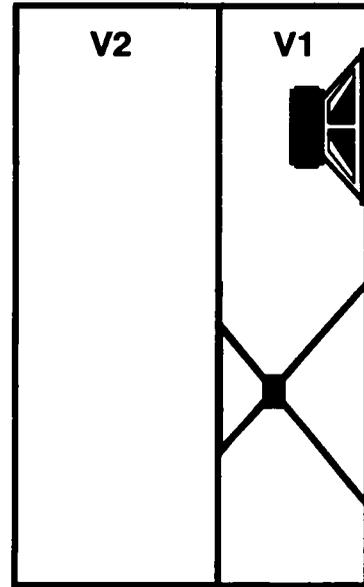


Figure 4.16 : Enceinte à radiateurs passifs couplés.

4.7.4 Sélection du haut-parleur de graves

La démarche est la même que pour les enceintes *bass-reflex* et les enceintes à radiateurs passifs.

4.7.5 Alignements

De nombreuses variantes d'alignements sont possibles avec les enceintes APR, mais nous ne retiendrons pour cet ouvrage que les alignements à réponse plate de type QB₃ et ceux à faible ondulation de type C₄.

4.7.6 Calcul du volume de l'enceinte

Pour calculer les dimensions d'une enceinte APR, suivez la même procédure que pour une enceinte *bass-reflex* ou une enceinte à radiateur passif. Commencez par réunir les

paramètres suivants du haut-parleur de graves :

- f_s fréquence de résonance à l'air libre
- Q_{ts} coefficient total de surtension du haut-parleur de graves, incluant toutes les résistances séries
- V_{as} volume d'air équivalent à la compliance du haut-parleur
- X_{max} longueur de la bobine mobile débordant de l'entrefer
- S_d surface efficace de rayonnement du haut-parleur de graves en m^2
- V_d volume d'air déplacé par la membrane en m^3

Comme pour d'autres procédures décrites dans ce livre, la meilleure démarche est d'établir une table de calcul. Celle-ci exposera

les différents paramètres calculés, quel que soit l'alignement choisi. Vous remarquerez que le tableau 4.4 est plus ou moins identique à ceux qui vous ont été présentés pour les enceintes *bass-reflex* ou à radiateur passif. Cependant, il s'y ajoute plusieurs paramètres nouveaux, dont il faudra tenir compte.

Définition de termes complémentaires :

α (alpha) est égal au rapport de compliance à la fois de V_1 et de V_2

Γ (Gamma) est égal au rapport de surface pour les membranes des deux radiateurs passifs
Pour $\Gamma = 1,67$, les combinaisons de membranes suivantes pour les radiateurs passifs seront appropriées (en pouces) :

8	:	6,5
12	:	8
15	:	10

La membrane la plus grande rayonne à l'extérieur, tandis que la plus petite relie les deux cavités.

E (epsilon), c'est le rapport entre le volume de la cavité qui charge le haut-parleur de graves et le volume global :

$$E = \frac{V_1}{V_b}$$

4.7.7 Emploi du tableau numérique 4.4

À l'inverse des tableaux concernant les enceintes *bass-reflex* ou à radiateurs passifs, le tableau 4.4 ne contient pas de compensation pour les pertes dues à des fuites. Pour rendre les choses plus aisées, les équations suivantes furent ajustées pour donner une valeur approximative de 0,7 au coefficient Q .

Volume de l'enceinte

$$V_b = V_1 + V_2 = \frac{V_{as}}{0,95 \alpha}$$

$$V_1 = V_b \cdot E$$

$$V_2 = V_b - V_1$$

Fréquence d'accord

$$f_B = 1,1 H \cdot f_s$$

Tableau 4.4

$Q_L = \text{infini}$ radiateurs passifs couplés QB_3 et C_4 $\Gamma = 1,67$ $E = 0,40$			
Q_{ts}	α	H	f_3/f_s
0,2000	3,20	1,75	1,85
0,2100	3,01	1,70	1,80
0,2200	2,81	1,65	1,75
0,2300	2,71	1,60	1,65
0,2400	2,42	1,55	1,55
0,2500	2,25	1,50	1,50
0,2600	2,03	1,49	1,49
0,2700	1,84	1,40	1,40
0,2800	1,64	1,35	1,38
0,2900	1,45	1,30	1,25
0,3000	1,25	1,20	1,15
0,3100	1,18	1,19	1,13
0,3200	1,10	1,18	1,11
0,3300	1,03	1,17	1,10
0,3400	0,96	1,15	1,05
0,3500	0,89	1,10	0,99
0,3600	0,81	1,02	0,95
0,3700	0,74	1,00	0,90
0,3800	0,67	0,95	0,85
0,3900	0,59	0,87	0,80
0,4000	0,52	0,80	0,75

Tableau 4.5 : Exemple d'application avec un haut-parleur de 20 cm (8")

Q_{ts}	Q_{es}	Q_{ms}	f_s	X_{max}	$S_d (m^2)$	$V_d (m^3)$	$V_{as} (ft^3)$	Γ	E	
0,26	0,28	3,95	32	3,5 mm	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	2,76	1,67	0,40	
AL	V_b ft^3	V_1 ft^3	V_2 ft^3	f_3 Hz	f_B Hz	$P_{ar(p)}$ watts	SPL	η_0 %	SPL	P_{er} watts
QB ₃	1,43	0,57	0,86	52	53	0,09	102dB	0,91	92 dB	9,9

Tableau 4.6 : Exemple d'application avec un haut-parleur de 25 cm (10")

Q_{ts}	Q_{es}	Q_{ms}	f_s	X_{max}	$S_d (m^2)$	$V_d (m^3)$	$V_{as} (ft^3)$	Γ	E	
0,25	0,29	2,05	22	3,5 mm	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$	7,51	1,67	0,40	
AL	V_b ft^3	V_1 ft^3	V_2 ft^3	f_3 Hz	f_B Hz	$P_{ar(p)}$ watts	SPL	η_0 %	SPL	P_{er} watts
QB ₃	3,67	1,47	2,2	36	36	0,048	99dB	0,72	90,6 dB	6,6

Fréquence de coupure à -3 dB

$$f_3 = 1,09 (f_3/f_s) \cdot f_s$$

4.7.8 Couplage entre haut-parleur de graves et radiateurs passifs couplés (APR)

Comme pour les radiateurs passifs standard.

4.7.9 Procédure pour accorder l'enceinte

Comme pour les radiateurs passifs standard.

4.8 Paramètres complémentaires

Les calculs de η_0 , $P_{ar(p)}$ et P_{er} se font de la même manière que pour les enceintes *bass-reflex* ou à radiateur passif. Notez que $P_{ar(p)}$ prend une valeur plus conventionnelle que dans les autres cas de figure.

4.8.1 Cas du volume V_{pr} dans les enceintes APR

Le volume de déplacement des radiateurs passifs est généralement le double de celui du haut-parleur de graves. Comme la surface des radiateurs passifs est égale à la somme des surfaces des deux membranes, la longueur de l'excursion requise pour cet ensemble ne devrait pas poser de problèmes avec la majorité des suspensions. Ne vous préoccupez pas de la compliance des radiateurs passifs, car elle est essentiellement déterminée par l'effet de ressort du volume d'air V_2 .

4.8.2 Exemples de calculs

Tableaux des résultats numériques 4.5 et 4.6 établis à partir des données des deux haut-parleurs utilisés dans le paragraphe 3.9.

Pour une valeur de $\Gamma = 1,67$ (haut-parleur de graves de 20 cm, 8") et un rapport $V_{pr}/V_d = 2$, un ensemble de radiateurs passifs, composé d'un cône de 20 cm (8") et d'un autre de 17 cm (6,5"), serait adéquat. Si les valeurs de P_{er} et de P_{ar} semblent faibles, il faut savoir que Clarke est d'avis que les résultats sont minorés d'un facteur 2 ou 3 (20 W à 30 W P_{er}).

Pour une valeur de $\Gamma = 1,67$ (haut-parleur de graves de 25 cm, 10") et un rapport $V_{pr}/V_d = 2$, un ensemble de radiateurs passifs, composé d'un cône de 25 cm (10") et d'un autre de 20 cm (8"), serait satisfaisant. Ici aussi, les résultats sont minorés d'un facteur 2 ou 3 pour P_{er} et P_{ar} (13 à 20 W P_{er}).

4.8.3 Altération de la réponse due à de mauvais alignements

Comme pour les enceintes *bass-reflex* et à radiateurs passifs.

4.8.4 Filtrage infra-sonore

Comme dans le paragraphe 3.12.

4.8.5 Amortissement

Appliquez juste le minimum d'amortissement nécessaire pour supprimer les ondes stationnaires de la cavité V_1 . La cavité V_2 ne requiert aucun amortissement, mais elle doit être étanche (comme V_1).

4.8.6 Configuration à deux haut-parleurs de graves

L'association du montage à deux haut-parleurs de graves (*woofer* en anglais, « boomer » dans le jargon) avec la configuration à radiateurs passifs couplés (APR) est certes complexe, mais toutes les applications étudiées au paragraphe 2.9 sont utilisables. En particulier, l'association d'une configuration APR avec celle d'un ensemble à deux haut-parleurs de graves jumelés est très intéressante. La combinaison des deux permet d'obtenir une enceinte qui, pour le même volume, affiche une fréquence de coupure grave f_3 plus basse. Si l'on arrive à un volume d'enceinte standard, c'est non seulement parce que le volume V_{as} de l'enceinte équipée des haut-parleurs de graves jumelés est réduit de moitié, mais encore parce que le coefficient alpha de la configuration APR est lui aussi réduit en gros de moitié, et enfin parce que (en termes de volume « normal » pour du *bass-reflex* ou du radiateur passif) le jumelage des haut-parleurs entraîne inévitablement une atténuation de leurs effets. Le dessin de la figure 4.17 illustre le schéma d'un montage APR à haut-parleurs de graves jumelés. En fonction des dimensions de

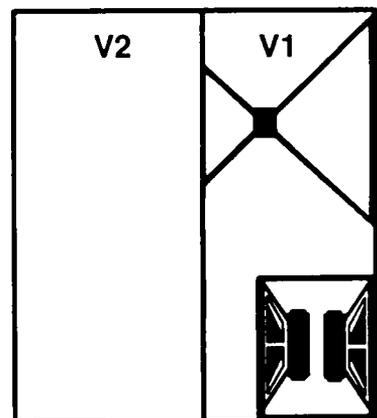


Figure 4.17

l'enceinte et du coefficient de surtension des haut-parleurs de graves (Q), vous pouvez être amené à fabriquer un tunnel compact pour les deux haut-parleurs de graves à partir d'un tube cylindrique (du type « Sonotube »).

Bibliographie

1. **H. Olson**, *Recent Developments in Direct Radiator High Fidelity Loudspeakers*, JAES, 10/54
2. **R. Small**, *Passive-Radiator Loudspeaker Systems*, JAES, 10-11/74
3. **D. B. Weems**, *How to Design and Build and Test Complete Loudspeaker Systems*, Tab Books No. 1064, 1978 (épuisé)
4. **G. R. Koonce**, *Find f_p for Passive Radiator Speakers*, *Speaker Builder*, 4/81
5. **Nomura and Kitamura**, *An Analysis of Design Conditions for a Phase Inverter Speaker System with a Drone Cone*, IEEE Transactions Audio and Electroacoustics, 10/73
6. **T. Clarke**, *Augmented Passive-Radiator Loudspeaker Systems*, JAES, 6-7/81

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that proper record-keeping is essential for the integrity of the financial system and for the ability to detect and prevent fraud. The text also mentions the need for regular audits and the role of independent auditors in ensuring the reliability of financial statements.

Conclusion

In conclusion, the document highlights the critical role of transparency and accountability in financial reporting. It calls for a commitment to high standards of ethical behavior and the implementation of robust internal controls. The text also notes that the financial community must work together to address the challenges posed by global financial markets and to ensure the stability and confidence of the financial system as a whole.

5 Enceintes acoustiques à ligne de transmission

5.1 Définition

Les enceintes acoustiques closes, *bass-reflex* ou à radiateur passif sont toutes des exemples d'enceintes, où différentes techniques sont mises en œuvre pour traiter la résonance fondamentale, qui est inhérente au haut-parleur électrodynamique à bobine mobile. Les enceintes à ligne de transmission (en anglais *Transmission Line, TL*) sont censées représenter une catégorie d'enceintes qui sont non-résonantes ou aperiodiques. Avec une ligne de transmission, l'ébénisterie fonctionne comme un filtre passe-bas avec une rotation de phase de 90 °, qui absorbe toute l'énergie rayonnée à l'arrière du haut-parleur de graves, sauf pour les fréquences inférieures à 75 Hz. Les lignes de transmission sont caractérisées par :

1. une fréquence de résonance basse du coffret ;
2. un rendu du grave profond assez puissant (en dessous de 50 Hz) ;
3. une bosse de la courbe d'impédance très amortie ;
4. un mouvement de membrane atténué dans la zone des 40 Hz, mais par contre amplifié pour les fréquences infra-sonores (comme pour les enceintes *bass-reflex*, à radiateur passif ou du type APR, ce problème est facilement résolu par l'adjonction d'un filtre approprié) ;
5. un faible niveau de coloration du registre grave moyen ;
6. une efficacité générale plutôt faible.

La ligne de transmission a obtenu un succès modéré aux États-Unis ; par contre en Grande-Bretagne, où ce principe a été mis au point, elle est très populaire. Une ligne de transmission britannique typique se caractérise par :

1. un haut-parleur de grave de la marque anglaise KEF ;
2. une ligne de transmission de section décroissante et amortie avec de la mousse alvéolée en polyuréthane ou de la laine naturelle en longues fibres ;
3. un traitement anti-vibratoire de l'intérieur des panneaux de l'enceinte ;
4. une construction de l'ébénisterie avec une technique de doubles parois (panneaux en sandwich) ;
5. un socle d'enceinte pour l'isoler du sol.

Certains professionnels de l'audio ne sont pas d'accord avec ce principe. Martin Colloms, fondateur en Angleterre de Monitor Audio, pense que les performances de la ligne de transmission ne sont pas supérieures à celles d'une enceinte *bass-reflex* bien conçue, et qu'il est difficile d'obtenir des performances uniformes dans le grave sans exciter des résonances de ligne de transmission, qui induisent des colorations dans le grave moyen. Cependant, l'engouement digne d'un culte, qui s'ensuivit aux États-Unis, vient contredire la relative impopularité initiale déjà mentionnée. (N'ai-je pas dit que la construction d'une enceinte acoustique relevait de l'art ?).

5.2 Historique

Le principe de la ligne de transmission puise ses racines dans celui du labyrinthe acoustique de Stromberg Carlson (vers 1930). Au début, la ligne de transmission était constituée d'un long tuyau (ouvert à une extrémité, le haut-parleur étant monté à l'autre), dont la section était en gros égale à la surface du haut-parleur. La ligne, dont la longueur fait environ 25% de la longueur d'onde de la fréquence de résonance du haut-parleur de graves (à l'air libre), était repliée sur elle-même afin de la réduire à un format acceptable. Dépourvue de tout amortissement interne par laine de verre ou autre matériau, la ligne de transmission amortit l'émission sonore à la résonance et renforce le niveau de grave sur environ une octave, pour les fréquences placées juste au-dessus de la résonance. Travaillant avec les mêmes concepts de base, au début des années soixante, A.R. Bailey expérimenta de nombreuses techniques et de nombreux matériaux amortissants avec des lignes repliées à labyrinthe [2,3,4]. Depuis, ces travaux tiennent lieu de Bible pour la plupart des constructeurs d'enceintes à ligne de transmission. À partir du critère de densité établi par Bailey, à savoir 8 kg/m^3 , A.T. Bradbury publia, en 1976, son étude qui décrit la modification de la vitesse de propagation du son pour différents matériaux amortissants (laine de verre et laine naturelle à fibres longues).

5.2.1 Coefficient de surtension du haut-parleur et réponse de l'enceinte

Devant l'absence générale d'un modèle mathématique formel, il semble qu'il n'y ait pas de consensus large, parmi les praticiens de la ligne de transmission, sur la valeur optimale du coefficient Q_s à choisir pour construire une ligne de transmission avec succès. De nombreuses réalisations furent réussies, les unes avec des haut-parleurs au

coefficient Q_s aussi faible que 0,2, les autres avec des valeurs aussi élevées que 0,6. Les comparaisons entre le principe de la ligne de transmission et celui des enceintes closes ou de type *bass-reflex* donnent lieu à des conclusions générales fort intéressantes. À ce jour, la meilleure tentative de modélisation par logiciel de la ligne de transmission a été faite au cours du 92^e congrès de l'AES, lors de la présentation par Juha Backman de son étude intitulée *A Computational Model of Transmission Line Loudspeakers* [6]. Après avoir développé un modèle mathématique pour la ligne de transmission, J.Backman écrivit un logiciel (malheureusement non disponible) capable de comparer les courbes de réponse, les excursions de membrane et les retards de groupe des enceintes closes, *bass-reflex* et à ligne de transmission, d'une manière analogue à celle du logiciel LinearX de LEAP. Les figures 5.1 et 5.2 montrent une comparaison de modèles synthétisés par ordinateur entre des enceintes closes, *bass-reflex* et à ligne de transmission. Ces courbes ont été obtenues avec le logiciel LEAP, qui ne modélise pas les enceintes à ligne de transmission ; les résultats sont néanmoins très semblables aux courbes publiées par J.Backman. La simulation de la ligne de transmission fut obtenue avec le logiciel LEAP en utilisant une enceinte close de très grand volume (du type baffle infini), car les courbes d'excursion de la membrane et de retard de groupe de cette simulation ressemblent de très près à celles qui furent publiées dans l'article 3326 de l'AES. La seule correction nécessaire fut la modification artificielle de la courbe de réponse en fréquence pour inclure les ondulations du registre grave moyen, caractéristique typique de la ligne de transmission. En partant du principe que le modèle mathématique de la publication de J.Backman est correct, (et il semble qu'il le soit), il est aisé de voir les différences et les similitudes entre les courbes des enceintes closes, *bass-reflex* et à ligne de transmission résultant de ces simulations. L'observation de la figure 5.1 montre à l'évidence que la réponse en fréquence de la ligne

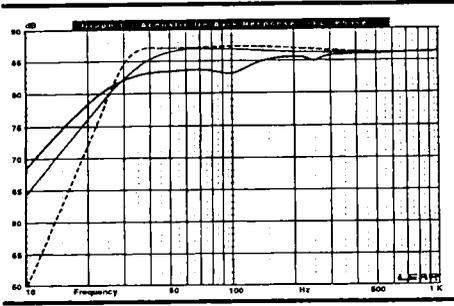


Figure 5.1

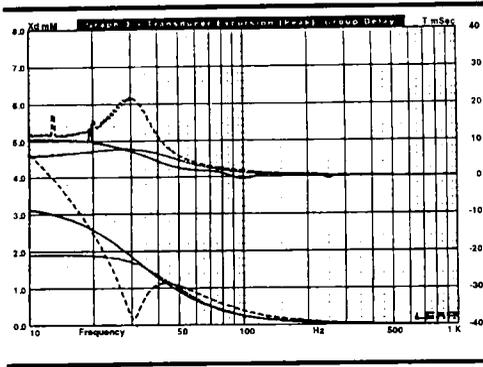


Figure 5.2

de transmission est similaire à celle d'une enceinte close. Toutefois, une pente d'atténuation plus douce dans le grave explique peut-être que les fanatiques de la ligne de transmission lui assignent la faculté de produire des graves très profonds. De même, on remarquera une dépression légère, et pourtant systématique, dans la zone du grave moyen. Il est possible de compenser, dans une certaine mesure, cette dépression. L'excursion de la membrane, dont la courbe est présentée en figure 5.2, ressemble également à celle d'une enceinte close, si ce n'est que l'excursion du cône continue de croître de plus en plus rapidement en dessous de la

fréquence f_3 pour la ligne de transmission. Cet accroissement de l'excursion en dessous de la fréquence f_3 n'est néanmoins pas aussi sévère, que celui qui a lieu en dessous de la fréquence d'accord de l'évent pour les enceintes *bass-reflex*. L'impression générale des concepteurs et des constructeurs d'enceintes à ligne de transmission est que la performance de ces enceintes en régime transitoire est subjectivement supérieure à celle d'une enceinte close ou à *bass-reflex*. La figure 5.2 reproduit les courbes de retard de groupe, et il est évident que pour cette caractéristique, qui mesure les performances transitoires, l'enceinte à ligne de transmission est très proche d'une enceinte close bien amortie ($Q_{tc} = 0,7$), et, avec celle-ci, est supérieure à une enceinte *bass-reflex*.

5.3 Longueur et amortissement de la ligne de transmission

Le critère fondamental définissant la longueur de la ligne de transmission est le même que celui de son ancêtre, le labyrinthe replié : 25% (ou juste un peu plus) de la longueur d'onde de la fréquence de résonance du haut-parleur. Pour la construction d'une ligne de transmission, les critères suivants sont standard et « effectivement confirmés par les résultats » :

1. Choisissez une ligne de longueur de 1,8 à 2,4 m (ce qui correspond à une ligne non amortie d'un quart de longueur d'onde, pour une fréquence de 35 à 45 Hz).
2. La section de la ligne démarrant juste derrière le haut-parleur de graves aura une surface d'au moins 25% plus grande que la surface d'émission S_d du haut-parleur de graves. Cette section de départ ira en s'amenuisant jusqu'à l'ouverture vers l'extérieur, nommée évent, dont la surface sera égale à S_d . Ceci concerne généralement les soixante

à quatre-vingt-dix derniers centimètres de la ligne. La surface de départ de la ligne peut varier de 1,25 à 2,5 fois la surface du haut-parleur S_d . Ceci définit un coefficient de rétrécissement, surface de départ de la ligne / S_d , qui aura un effet direct sur la qualité subjective du milieu et du bas du registre grave de la ligne de transmission. Les coefficients de faible valeur donnent habituellement ce son « peu profond » et « sec », qu'on associe aux enceintes à ligne de transmission. Quand ce coefficient augmente, après avoir dépassé la valeur de 1,4 à 1,5, le son est plus accentué dans la zone basse du grave et accompagné d'une meilleure restitution du registre moyen du grave. Ce critère dépend de l'amortissement critique de la ligne de transmission, et les résultats varieront en fonction à la fois du rétrécissement de la ligne et de la répartition du matériau amortissant le long de celle-ci. Dans le tableau 5.1, différentes valeurs des surfaces de départ de ligne sont données en fonction du diamètre du haut-parleur de graves.

Tableau 5.1

Surface de la section de la ligne de transmission en fonction du coefficient de rétrécissement			
diamètre	S_d	aire de la 1 ^{ère} section	aire de l'évent rétrécissement
pouces	m ²	in. ²	2,5-1,25
15	0,0855	133	333-166
12	0,0450	70	175-88
10	0,0330	52	130-65
8	0,0215	33	83-41
6,5	0,0158	25	63-31
5	0,0089	14	35-18

3. Matériau amortissant (par ordre de préférence) :

- Laine naturelle à fibres longues, lavée-main et traitée anti-mites (n'oubliez pas de munir la ligne de chevilles, clous ou

autres artifices tels des grillages pour éviter tout affaissement de la laine).

- Acousta-Stuff®, marque déposée de la société Mahogany Sound, est une bourre aérée de fibres polyamides (nylon), dont les extrémités sont trilobées au lieu d'être rondes. Ce produit peut très bien se substituer à la laine naturelle, car non seulement il est plus homogène (tous les moutons ne produisent pas exactement la même laine), mais encore il ne souffre pas d'affaissement et ses performances acoustiques sont très proches de celles de la laine naturelle.
- 50% de Dacron et 50% de laine naturelle (ce mélange n'a pas les mêmes caractéristiques de filtre passe-bas que la laine naturelle, mais présente les mêmes problèmes d'affaissement).
- Dacron.
- Laine de verre.

4. Le matériau amortissant doit être réparti le long de la ligne de transmission avec une densité qui commence aux environs de 8 g/l pour décroître progressivement, de telle sorte que les trente derniers centimètres de la ligne restent vides. La diminution de la quantité de matériau absorbant près de l'évent influe sur la qualité du registre moyen du grave. Notez que la répartition du matériau absorbant doit être faite, lors de la pose, de la manière la plus homogène possible, afin que sa densité reste constante (on y arrive habituellement en étirant les fibres).

L'enceinte acoustique à ligne de transmission est une enceinte dont l'ébénisterie, relativement complexe, nécessite plus de matériaux et d'attention que d'autres types d'enceintes. Si d'emblée vous vous lancez dans une telle construction, je vous recommande vivement de n'utiliser que de la laine naturelle ou un mélange de Dacron/laine naturelle. L'utilisation de Dacron ou de laine de verre est également possible, mais les résultats ne sont pas satisfaisants. J'ai déjà signalé que le

critère de quart d'onde de la fréquence de résonance du haut-parleur de graves est un reliquat de l'enceinte à labyrinthe. L'enceinte à labyrinthe avait, par contre, une ligne non amortie, car uniquement remplie d'air, où le son se propageait à la même vitesse qu'à l'air libre. La longueur adéquate de la ligne provoquait la rotation de phase appropriée de 90° et fonctionnait bien avec les anciens haut-parleurs de graves à faible compliance. Les lignes de transmission actuelles, amorties avec de la laine naturelle, font chuter la vitesse de propagation du son et modifient la longueur effective de la ligne. Le tableau 5.2 montre la différence due à la vitesse de propagation du son entre des lignes quart d'onde non-amorties et des lignes quart d'onde et trois quart d'onde amorties. Il est évident que d'autres critères auraient pu tout aussi bien être retenus. En prenant comme référence une ligne demi-onde (comme le suggère Hillman), une longueur de 2,40 m à 3,20 m correspondrait à une fréquence comprise entre 35 et 25 Hz. Les lignes de transmission en demi-onde et en trois quart d'onde sont toutes les deux basées sur les calculs de vitesse de propagation du son à l'intérieur d'une ligne amortie avec de la laine, calculs qui ont été faits par Bradbury. Tout changement de densité, de distribution ou de type de matériau absorbant, agit sur la vitesse de propagation du son dans la ligne de transmission. Par exemple, la ligne de transmission amortie avec du Dacron, et décrite par Hillman dans son article publié dans *Speaker Builder* (5/89), montre, à la mesure, une demi-onde à la fréquence de 37 Hz pour une ligne de 2,40 m de long, ce qui nous donne comme vitesse de propagation du son 180 m/s, au lieu des 123 m/s que Bradbury calcula pour une ligne amortie avec de la laine. Les matériaux amortissants ont des caractéristiques qui varient avec la fréquence, ce qui signifie que la vitesse de propagation du son ne sera pas exactement la même à toutes les fréquences. À la suite des travaux publiés par John Cockroft dans *Speaker Builder*, Larry Sharp publia une méthode empiri-

Tableau 5.2

Longueur de la ligne de transmission en fonction de la fréquence

freq.(Hz)	non amorti c = 1130' / S		amorti (laine naturelle 8 kg/m ²) c' = 405' / S	
	1/4 λ		1/4 λ	3/4 λ
20	14,1		5,1	15,2
25	11,3		4,1	12,3
30	9,4		3,4	10,1
35	8,1		2,9	8,7
40	7,1		2,5	7,6
45	6,3		2,2	6,7

λ = longueur d'ondes (en pieds)
 c = célérité du son dans l'air
 c' = célérité du son dans la laine à longues fibres
 P = densité du matériau fibreux 8 kg/m³
 P_a = densité de l'air = 1,18 kg/m³

$$c' = \frac{1130}{\left[1 + \frac{P}{P_a}\right]^{1/2}}$$

que différente, qui permet de calculer les lignes de transmission en tenant compte des variations de la longueur et de la densité du matériau d'amortissement et qui, de ce fait, s'applique à des haut-parleurs de graves qui ont différentes valeurs de coefficient Q_s [7]. Cette étude est basée sur l'utilisation du matériau amortissant Acousta Stuff, marque dont M. Sharp est le propriétaire, mais une laine naturelle ferait tout aussi bien l'affaire. La procédure décrite par M. Sharp commence par l'estimation de la surface moyenne (A_H) de la section de la ligne de transmission étudiée. Si vous optez pour une ligne à section constante, sa surface sera évidemment (A_H). Si la section de la ligne est décroissante, il faudra d'abord choisir une longueur totale (4 à 6 pieds), puis calculer des surfaces moyennes, qui correspondent aux différentes sections constantes de la ligne qui rétrécit par paliers (faites un dessin à l'échelle, il facilitera le travail), additionner les différentes surfaces et en diviser la somme par le nombre de sections. Par exemple, si l'enceinte proposée a, en

début de ligne de transmission, une surface de section égale à 1,25 fois celle du haut-parleur de graves S_d , qui se réduit au niveau de l'évent à seulement 0,75 fois celle du haut-parleur de graves S_d , la valeur moyenne de la surface des sections serait environ de $1 \times S_d$ ou S_d . Une fois la surface A_{tl} calculée, la densité requise peut-être calculée par :

$$D_s = \frac{(A_{tl} \times Q_{ts})^{0,5}}{S_d}$$

Où :

D_s = densité du bourrage en livres / pied³

A_{tl} = surface moyenne des sections de la ligne en pouces²

S_d = surface de la membrane en pouces²

La vitesse de propagation du son en pouces / seconde à partir du calcul de la densité de bourrage devient :

$$c' = \frac{13,560}{(1 + D_s)^{0,5}} \\ 0,0745$$

En utilisant la célérité du son, fonction de la densité de bourrage, et la fréquence de résonance du haut-parleur de graves comme fréquence de coupure, la longueur de la ligne de transmission en pouces devient :

$$T_{ll} = \frac{0,25c'}{F_s}$$

À partir de la longueur totale de la ligne et de sa surface moyenne, on détermine le volume total en pieds³ de la ligne par :

$$V_b = \frac{A_{tl} \times T_{ll}}{1,728}$$

Enfin, le produit du volume total de la ligne par la densité donnera la quantité totale de matériau amortissant (Acousta-Stuff ou laine naturelle) qu'il faudra répartir le long de la ligne de transmission.

5.4 Accord de la ligne de transmission

Le réglage d'une ligne de transmission est habituellement fait à l'oreille à partir d'un message musical. Il est également utile de relever la courbe d'impédance. Ajustez la longueur de la ligne de transmission pour obtenir une courbe d'impédance, dont les bosses soient aussi faibles et plates que possible, tout en conservant un son de qualité (figure 5.3).

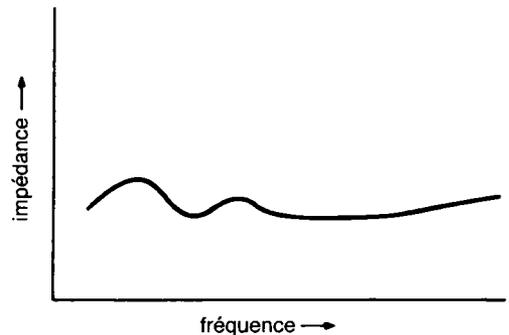


Figure 5.3 : Courbe d'impédance d'une enceinte à ligne de transmission.

5.5 Configuration de l'enceinte à ligne de transmission

Plusieurs approches, tant pour des applications commerciales que pour des réalisations d'amateurs, ont donné lieu à des configurations de repliement de ligne réussies. Six configurations des plus typiques sont représentées dans la figure 5.4.

5.6 Sélection du haut-parleur de graves

Les critères de sélection d'un haut-parleur de graves (*woofer* en anglais, « boomer » dans le jargon) pour une ligne de transmission restent imprécis. Il n'existe aucune méthodologie reconnue qui fonctionne de la même manière que celle de Thiele / Small pour les enceintes closes, *bass-reflex* ou à radiateur passif. La liste ci-dessous contient une série de haut-parleurs de graves, qui ont fait leurs preuves dans les enceintes à ligne de transmission :

KEF	Dynaudio	Focal
B 139	21W54	10K515
B 110	30W54	8K516
B 200s		8K011db

5.7 Publications sur la construction d'enceintes à ligne de transmission

Je suis certain que tous les amateurs de ligne de transmission seraient ravis de disposer du confort qu'offrent les tables de valeurs numériques dédiées au calcul des autres types d'enceintes ; peut-être qu'il en sera ainsi dans un futur plus que proche. À défaut de tables, il est toujours instructif de passer en revue différentes études effectuées sur ce type d'enceinte. Voici une liste d'articles traitant de la construction d'enceintes à ligne de transmission qui devrait vous être utile.

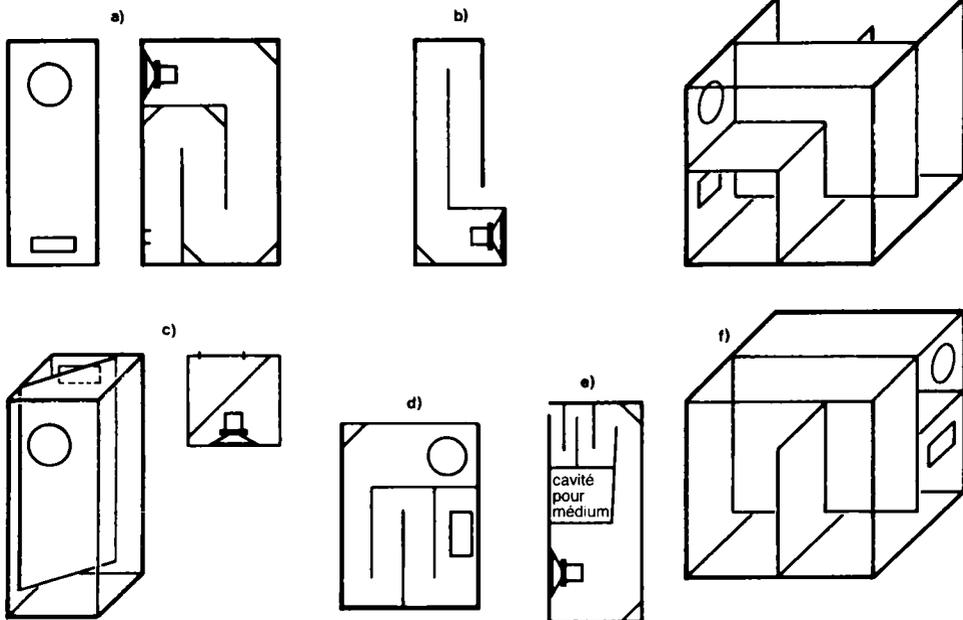


Figure 5.4 : Différents repliements de ligne de transmission.

Magazine : Speaker Builder

1. **R. Sanders**, *An Electrostatic Speaker System*, 2, 3, 4/80
2. **G. Galo**, *Transmission Line Loudspeakers*, 1, 2/82
3. **C. Cushing**, *A Compact Transmission Line Subwoofer*, 1/85
4. **T. Cox**, *An Experimental Transmission Line*, 4/85
5. **C. Bauza**, *The Modified Daline*, 4/85
6. **D. Weems**, *Experiments with Tapered Lines*, 2/87, p. 18
7. **J. Cockroft**, *The Octaline: A Small Transmission Line*, 3/87, p. 9
8. **J. Cockroft**, *The Shortline: A Hybrid Transmission Line*, 1/88, p. 18
9. **J. Cockroft**, *The Unline: Designing Shorter Transmission Lines*, 4/88, p. 28
10. **P. Hillman**, *Symmetrical Speaker System with Dual Transmission Lines*, 5/89, p. 10
11. **J. Cockroft**, *The Microline*, 5/89, p. 28
12. **G. DeMichele**, *Cylindrical Symmetric Guitar TLs*, 1/90, p. 22
13. **S. Ellis**, *An Apartment TL*, 1/91, p. 32
14. **C. Cushing**, *The Pipes*, 2/91, p. 18
15. **W. Wagaman**, *Octaline Meets D'Appolito*, 2/91, p. 38
16. **S. Wolf**, *Pipe and Ribbon Odyssey*, 3/91, p. 28
17. **R.J. Spear & A.F. Thornhill**, *Fibrous Tangle Effects on Acoustical TLs*, 5/91, p. 11
18. **R.J. Spear & A.F. Thornhill**, *Price-Winning Three-Way TL, Part I*, 4/92, p. 10, *Part II*, 5/92, p. 22
19. **J. Cockroft**, *The Simpline*, 1/93, p. 14
20. **D.K. Johns**, *A 15" Transmission Line Woofer*, 7/94, p. 10
21. **K.W. Ketler**, *The Achilles: A Two-Way Transmission Line*, 1/95, p. 22

Bibliographie

1. **M. Colloms**, *High Performance Loudspeakers*, Pentech Press 1978, 1986
2. **A. R. Bailey**, *A Non-Resonant Loudspeaker Enclosure Design*, *Wireless World*, 10/65
3. **T. Jastak**, *A Transmission Line Speaker*, *Audio Amateur*, 1/73
4. **A. R. Bailey**, *The Transmission Line Loudspeaker Enclosure*, *Wireless World*, 5/72
5. **A. J. Bradbury**, *The Use of Fibrous Materials in Loudspeaker Enclosures*, *JAES*, 4/76
6. **J. Backman**, *A Computational Model of Transmission Line Loudspeakers*, 92^e convention de l'AES, publication préliminaire n° 3326
7. **L.D. Sharp**, *Quick & Easy Transmission Line Speaker Design*, Mahogany Sound, 1995

*Audio Amateur—Loudspeaker Projects
1970-1979*

1. **T. Jastak**, *A Transmission Line Speaker*, p. 39
2. **T. Jastak**, *A Jolly TL Giant*, p. 42
3. **B. J. Webb**, *A Proven TL Loudspeaker*, p. 53
4. **D. Ruether**, *The Big Bass Box*, p. 126

6 Coffret : construction et amortissement des vibrations des parois

6.1 Forme du coffret et courbes de réponse

La majorité des enceintes acoustiques basses fréquences ont des coffrets de forme parallélépipédique. Cette forme géométrique, qui est la plus facile à réaliser pour l'amateur comme pour le professionnel, s'intègre harmonieusement au mobilier domestique. L'enceinte parallélépipédique est souvent jugée comme la forme la moins optimale quant au rayonnement des ondes du haut-parleur vers l'extérieur du coffret et pour le nombre des modes d'ondes stationnaires internes. L'ouvrage de référence, qui illustre les effets de différentes formes d'enceintes sur la diffraction du son, a été publié par Harry Olson en 1951 dans le *JAES*, sous le titre *Direct Radiator Loudspeaker Enclosures*. Cet article est une étude des effets de douze formes différentes de boîtier sur la courbe de réponse du haut-parleur. Les résultats se trouvent dans le tableau 6.1 (page 146).

Chaque enceinte a été mesurée en chambre anéchoïque (chambre sans échos, appelée communément chambre sourde), équipée d'un haut-parleur de 2,2 cm (7/8") de diamètre. Les courbes de réponse étaient très variées, de courbes presque linéaires à des courbes caractérisées par des ondulations de ± 5 dB.

À l'observation de ces données, il est évident que c'est la sphère qui possède la meilleure forme géométrique. La sphère est en général difficile à construire, même en série ; toutefois, plusieurs modèles furent commercialisés ces dernières années. Une variante de la forme sphérique, disponible sur le marché, est le boîtier de forme ovoïde, qui est produit par la société Focal America. Dans cette étude, il apparaît que la forme la meilleure,

après celle de la sphère, est la forme dont les côtés sont chanfreinés. Pour que cette forme soit efficace pour amoindrir les diffractions d'ondes, il faut que le chanfrein soit grand par rapport aux dimensions de la face avant. Beaucoup de modèles d'enceintes du commerce présentent un petit chanfrein, de l'ordre de 20 à 25 mm, qui n'a que peu d'effet sur la courbe de réponse et ne se compare pas aux résultats obtenus par Olson. Parmi les dernières formes géométriques du tableau 6.1, le cylindre est encore moins mauvais que l'habituel parallélépipède. Ces mesures, effectuées dans l'axe de l'enceinte (microphone perpendiculaire à la face avant de l'enceinte), en milieu anéchoïque, montrent l'effet des diffractions sur la courbe de réponse. Les perturbations de la courbe de réponse proviennent des réflexions occasionnées par la géométrie de la face avant ; celles-ci apparaissent surtout aux fréquences où la longueur d'onde approche des dimensions du baffle (face avant de l'enceinte). Effectivement, quand la fréquence augmente, on passe progressivement, au regard des dimensions de l'enceinte, d'une émission sphérique (4π stéradian) pour les basses fréquences (longueur d'onde très grande par rapport à la longueur des côtés du coffret), à une émission hémisphérique (2π stéradian) (longueur d'onde très petite par rapport à la longueur des côtés du coffret). Ceci provoque un «saut en amplitude» de 6 dB, dont la fréquence est fonction de la surface de la face avant [1]. Ce phénomène est à son apogée dans l'axe de l'enceinte, quand la face avant focalise le rayonnement acoustique, comme un projecteur d'automobile focalise le rayon lumineux. Hors de l'axe, la focalisation diminue [2]. Les diffractions dues au boîtier sont plus prononcées quand les haut-parleurs, montés au milieu de la face avant, sont équidistants des bords de l'enceinte [3]. Dans une pièce nor-

Tableau 6.1 : Variation de la courbe (dB) en fonction de la forme géométrique du coffret		
forme géométrique du coffret	variation du coffret	variation de la courbe
sphère	demi-sphère	+/- 0,5 dB
cône (haut-parleur monté au sommet)	double cône	
pyramide (haut-parleur monté au sommet)	double pyramide	
cube		+/- 5 dB
cube biseauté (biseau égal à la moitié d'un côté de l'enceinte)		+/- 1,5 dB
parallélépipède		+/- 3 dB
parallélépipède biseauté (biseau égal à la moitié du côté de l'enceinte)		+/- 1,5 dB
cylindre (HP monté au sommet)	HP monté sur la surface courbe	+/- 2 dB

male (en écoute domestique, par exemple), les effets de ces diffractions ont tendance à être couverts par le champ réverbéré et n'ont pas un effet aussi important que la mesure effectuée en champ libre (milieu anéchoïque) ne le laisserait penser. N'oublions pas que la plupart du temps, lors d'une écoute en milieu domestique, l'auditeur ne se trouve pas dans l'axe de l'enceinte. Deux écoles s'affrontent dans ce domaine : si les uns pensent que, dans une pièce d'écoute habituelle, les perturbations de la courbe de réponse causées par les diffractions, dues au boîtier, sont relativement insignifiantes, les autres soutiennent qu'elles jouent un rôle important quant à la qualité de l'image sonore produite par l'enceinte. Certes, les formes géométriques des coffrets et des faces avant ne perturbent pas beaucoup la réponse en fréquence d'une enceinte dans une pièce d'écoute, mais il y a pourtant trois règles de base pour réduire l'effet des diffractions sur la réponse en fréquence :

1. Placez les haut-parleurs en évitant qu'ils soient équidistants de deux côtés quelconques de la face avant.
2. Montez tous les haut-parleurs en les encastrant (en effleurement de la face avant).
3. Éliminez toutes les protubérances de la surface de la face avant.

Dans le numéro d'octobre 1990 de la revue *Voice Coil*, est présentée la comparaison entre une enceinte parallélépipédique et une enceinte cylindrique dont la face avant est constituée d'une section plane, voir les figure 6.1 et 6.2 (les haut-parleurs ne furent pas encastrés). Le coffret cylindrique, dont une face est plane, est construit par la société Cubicon, qui fabrique des formes géométriques en carton pour l'ameublement, les étales et les fabricants d'enceintes acoustiques. Les différences observées dans les courbes de réponse des figures 6.2 et 6.3, tant pour le haut-parleur d'aigus (aussi appelé *tweeter*) que pour le haut-parleur de graves, sont certes apparentes, mais pas très importantes pour autant. La courbe de réponse du haut-parleur de graves, en figure 6.2, a été relevée, l'enceinte étant vide de tout matériau amortissant ; de ce fait, une partie des différences observées provient des ondes stationnaires,

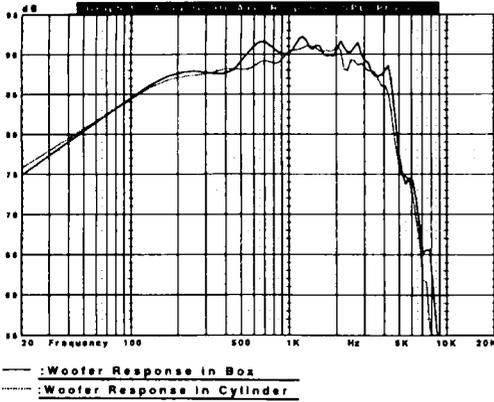


Figure 6.1

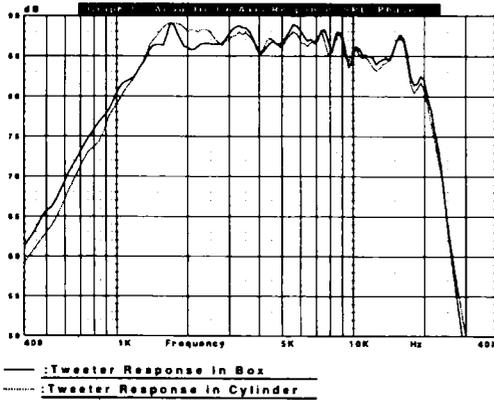


Figure 6.2

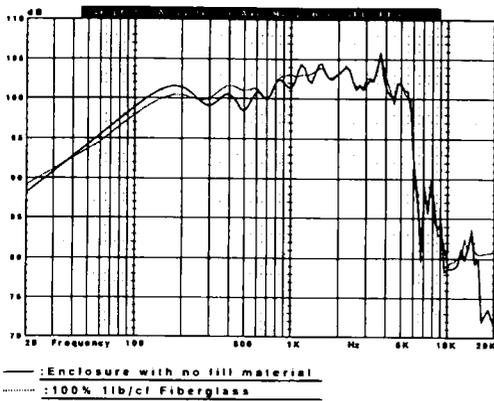


Figure 6.3

dont le niveau est au maximum dans le boîtier. La mesure a été faite avec l'analyseur MLSSA FFT, dont la fenêtre (temporelle) d'acquisition, réglée à 10 ms, nous met en situation de mesure quasi anéchoïque. Les données ont été transférées de l'analyseur MLSSA FFT vers le logiciel LEAP 4.0, pour obtenir l'impression sous *PostScript*.

Les résultats des mesures en milieu anéchoïque de ces deux enceintes de forme différente mais équipées des mêmes haut-parleurs sont si proches, qu'il faut s'attendre aux plus grandes difficultés pour départager à l'écoute les mérites de leur forme géométrique. Le jugement subjectif, porté en fin de compte sur toute enceinte, est certes influencé par la position des haut-parleurs sur la face avant, mais aussi par la manière dont interagissent les différents défauts du haut-parleur avec les diffractions dues à la géométrie du coffret (dans la mesure où ces défauts sont audibles dans une pièce d'écoute). Certaines formes exotiques d'enceintes semblent offrir intuitivement des solutions des plus intéressantes, mais la réalité démontre qu'elles sont bien moins bonnes, que ne le proclament certains fabricants. Pourtant, parmi les meilleurs tests et les plus grands succès commerciaux, on trouve des enceintes dont la forme est un simple parallélépipède.

6.2 Géométrie de coffret et ondes stationnaires

La présence d'ondes stationnaires dans l'enceinte parallélépipédique provoque des perturbations de la courbe de réponse du haut-parleur. Pour éviter en grande partie que les défauts dus aux ondes stationnaires n'altèrent le mouvement de la membrane du haut-parleur de graves, il est vivement recommandé d'utiliser des matériaux amortissants, comme ceux présentés au chapitre 2, paragraphe 2.8.2. La figure 6.3 illustre l'effet

sur la courbe de réponse du remplissage du volume interne de l'enceinte avec du matériau absorbant : on y compare l'enceinte parallélépipédique vide à l'enceinte remplie à 100% de matériau amortissant. La courbe de réponse en fréquence de l'enceinte remplie avec du matériau absorbant présente bien moins de perturbations en amplitude que celle de l'enceinte vide. L'emploi de ce type de matériau absorbant pour amortir les ondes stationnaires est si efficace, que toutes les considérations à propos des formes géométriques des coffrets ou des proportions des dimensions du boîtier deviennent secondaires. Ces considérations s'appliquent surtout aux enceintes closes, fréquemment remplies à 100% avec du matériau amortissant. Les enceintes *bass-reflex* en revanche, au taux de remplissage rarement supérieur à 50%, sont de ce fait plus sensibles aux ondes stationnaires. Le choix judicieux des coefficients, définis par les rapports entre les différentes cotes du coffret, permet en principe de réduire les ondes stationnaires des enceintes closes parallélépipédiques. Ces coefficients coïncident habituellement avec les coefficients choisis pour éliminer les ondes stationnaires dans les pièces d'écoute. Les coefficients les plus fréquemment appliqués sont ceux proposés par Thiele ; il semblerait qu'ils soient dérivés des coefficients de la règle d'or de l'architecture, qui remonte aux pyramides d'Égypte [4]. Les coefficients qui définissent les rapports hauteur/largeur/profondeur sont les suivants : 2,6/1,6/1. D'autres rapports ont été publiés, comme 2/1,44/1 [5] et 1,59/1,26/1 [6], mais toute amélioration dans la détermination des coefficients (qui définissent les rapports des dimensions du coffret) est secondaire, comparée à l'amélioration obtenue par un amortissement correctement effectué. L'utilisation de ces groupes de coefficients, qui définissent les proportions de l'enceinte (en tenant compte de la taille des haut-parleurs et de leur répartition sur la face avant), est conseillée, car elle évite de concevoir des coffrets trop étroits et trop allongés, qui produiraient des résonances du type

«tuyau» (résonances à briser, si on ne peut faire autrement, par l'implantation de panneaux internes en biais, qui jouent le rôle de déflecteurs). D'autres formes de coffrets, aux parois non parallèles, comme les enceintes pentagonales ou les enceintes dont la face avant est inclinée, auront des modes d'ondes stationnaires différents et probablement moins prononcés que ceux des enceintes parallélépipédiques, mais l'effet de séduction réside plus dans l'esthétique du boîtier que dans sa bonne performance acoustique. Pour une enceinte dont le volume interne est dépourvu de tout matériau amortissant, c'est la position du haut-parleur de graves sur la face avant qui jouera un rôle déterminant dans l'établissement des ondes stationnaires. D'après une autre étude, le positionnement du haut-parleur de grave, exactement au milieu de la face avant ou juste un peu en dessous, limitera le niveau des ondes stationnaires dans le sens de la hauteur et de la largeur de l'enceinte (mais pas dans le sens de la profondeur) [7]. Les formes d'enceintes cylindriques et semi-cylindriques diminuent les ondes stationnaires installées dans le sens de la profondeur, mais réduisent par contre l'amplitude de la courbe de niveau dans le grave, jusque vers 800 Hz environ. Une analyse, appliquant aux enceintes vides la théorie du calcul par éléments finis, a démontré ce phénomène, qui d'ailleurs s'amointrit notablement lorsque l'on ajoute du matériau absorbant. La différence entre la courbe de réponse de la forme parallélépipédique et celle de la forme cylindrique est minime, voir figure 6.2, bien que les deux enceintes soient vides de tout matériau absorbant. Généralement, ce n'est pas la suppression des ondes stationnaires et des diffractions qui est à l'origine du choix de ces différentes formes, mais plutôt le critère esthétique. Toutefois, on notera que pour la forme cylindrique, et à épaisseur égale, l'amortissement du tube en carton Cubicon est de bien meilleure qualité que celui du panneau en MDF (panneau de fibres de densité moyenne), utilisé pour les coffrets parallélépipédiques de qualité.

6.3 Amortissement des parois de l'enceinte acoustique

Il est bien établi qu'une ébénisterie plaquée bois et construite en panneaux de particules ou en MDF résonne en « symbiose » avec le haut-parleur de graves, et que, à certaines fréquences, le boîtier rayonne presque autant d'énergie acoustique que la membrane du haut-parleur [8]. C'est ainsi que le succès de l'enceinte Celestion SL-600 vient de son boîtier construit, grâce à la technique aéronautique, avec des panneaux sandwich en aluminium (structure en nid d'abeille), ce qui a pour effet d'éliminer la plupart des colorations, transmises à travers les parois en bois de la majorité des enceintes acoustiques. Plusieurs matériaux et de nombreuses techniques sont à notre disposition pour combattre la coloration due aux parois des coffrets. Citons entre autres : le matériau des parois, le produit amortissant les résonances des parois, les techniques de renforcement du coffret (entretoises), les techniques de montage des haut-parleurs, les techniques de découplage des haut-parleurs du sol.

A. Matériaux des parois

Pour le choix du matériau constitutif des parois de l'enceinte, il existe deux écoles fondamentales : la première conseille d'utiliser les grands moyens, c'est-à-dire de construire des parois épaisses avec des matériaux de forte densité, comme le panneau MDF de 25 mm d'épaisseur, accompagné de nombreux renforts de structure (entretoises), et parfois d'adjoindre un traitement interne antivibratoire. Des enceintes acoustiques, comme celles construites par Thiel Audio et Hale Audio, appliquent cette philosophie. La deuxième école propose d'utiliser, pour la construction des enceintes, des parois plus minces, faites de matériaux moins rigides et plus légers, comme le contre-plaqué marine de 12 mm à 19 mm, en association avec un important traitement antivibratoire, ce qui limitera le niveau des colorations dans la zone des 100 Hz à 500 Hz. L'enceinte acous-

tique Leak Sandwich, fabriquée vers la fin des années soixante, utilisait cette philosophie. Elle était construite en contre-plaqué de 12 mm, amorti avec d'épaisses couches de feutre bitumé. Ces deux philosophies donnent de bons résultats et sont amplement représentées sur le marché.

Une autre solution pour diminuer les vibrations des parois de l'enceinte est l'emploi de matériaux assemblés en multicouches (panneaux sandwich), par exemple : l'association de deux couches de panneaux MDF ou équivalents, avec, en sandwich, une couche de produit antivibratoire. Ce produit, très spécifique, n'est pas disponible habituellement pour le public. Une autre possibilité intéressante a été publiée dans un article de *Speaker Builder* 3/89 ; elle consiste à coller, avec une colle spéciale pour bâtiment, deux couches de plaques de pierre de 12 mm d'épaisseur entre deux couches de contre-plaqué de 6 mm d'épaisseur, revêtues de leur plaquage de finition [9]. Un autre exemple de multicouche fut publié dans un article de *Speaker Builder* 4/82, qui suggère d'utiliser des panneaux creux pour cloisons et de les remplir de sable (idée proposée à l'origine par G.A. Briggs, fondateur de la *British Wharfedale Company*) [10].

B. Matériaux antivibratoires pour parois d'enceintes

Si, par le choix de parois relativement fines et peu rigides ou par le choix de techniques de renforts (pose d'entretoises), les résonances des panneaux sont décalées vers des fréquences plus élevées, celles-ci peuvent être amorties par l'emploi systématique d'un enduit adéquat. Des exemples d'application de ce type de produit furent publiés dans d'anciens numéros de *Voice Coil* [11,12] ; ils concernaient, entre autres, deux matériaux particulièrement efficaces : l'Antiphon type 13 et l'EAR type CN-12. Le produit Antiphon Type A-13 est un composite antivibratoire bitumineux du type feutre/argile. Il est essentiellement utilisé dans l'industrie auto-

mobile pour amortir les résonances des toits de voiture. Il se présente en feuilles adhésives de 1,6 mm d'épaisseur. L'application de deux couches de ce matériau sur 50% ou plus de la surface des parois de l'enceinte est efficace. Le produit fabriqué par EAR est un polyvinyle chargé de graphite, utilisé par la marine américaine pour amortir les vibrations des coques des sous-marins nucléaires. Ces feuilles (d'une épaisseur de 1,6 mm à 6,3 mm) s'appliquent de la même manière que celles d'Anti-phon, et l'efficacité de ce matériau est tout aussi bonne. Ces produits ne sont pas encore disponibles pour les amateurs audio, mais cela ne saurait tarder. Leurs prix s'échelonnent de 1,60 \$ à 5\$/pied², pour un achat en grande quantité. Une solution plus économique consiste à agraffer plusieurs couches (4 à 6) de papier goudronné (ou de feutre bitumeux) pour toiture sur les parois internes de l'enceinte. La surface interne de chaque paroi, y compris celle de la face avant, doit être recouverte, dans une proportion de 50 à 70%, de ces couches multiples, agrafées dans les quatre coins et au milieu de chaque paroi. Parfois, des enduits liquides, qui servent à l'insonorisation des soubassements de voitures, ont été utilisés pour amortir les parois des enceintes. Mais les solvants, dégagés par ces produits, peuvent se révéler néfastes pour les suspensions périphériques, les mem-

branes et les colles utilisées dans les haut-parleurs. Il est possible également de faire un mélange avec 50% de sable et 50% de ciment pour revêtement de toiture, mais son application est pénible et demande beaucoup de temps.

C. Techniques de renforcement

La pose de tasseaux entraîne la séparation des parois en deux parties quasi indépendantes, qui ont chacune sa propre fréquence de résonance. Les trois principales techniques de renforcement sont présentées dans la figure 6.4. Les renforts horizontaux, situés sur le pourtour de l'enceinte, servent à casser les résonances du milieu des parois de l'enceinte. On utilise habituellement des tasseaux en bois de 20 mm × 50 mm, et rarement des cornières en fer. Les fabricants d'enceintes utilisent une variante appelée renfort de maître couple, qui est une combinaison de renforts horizontaux et de renforts croisés [13]. Le renfort de maître couple est en général constitué d'un panneau, fixé à trois ou quatre parois de l'enceinte, qui est largement ajouré pour laisser circuler l'air à l'intérieur de l'enceinte (figure 6.5). Les renforts d'angles augmentent le couplage entre les côtés adjacents, tout en dissipant une partie de l'énergie vibratoire. Les entretoises relient les parois placées face à face par une liaison gauche-droite et une liai-

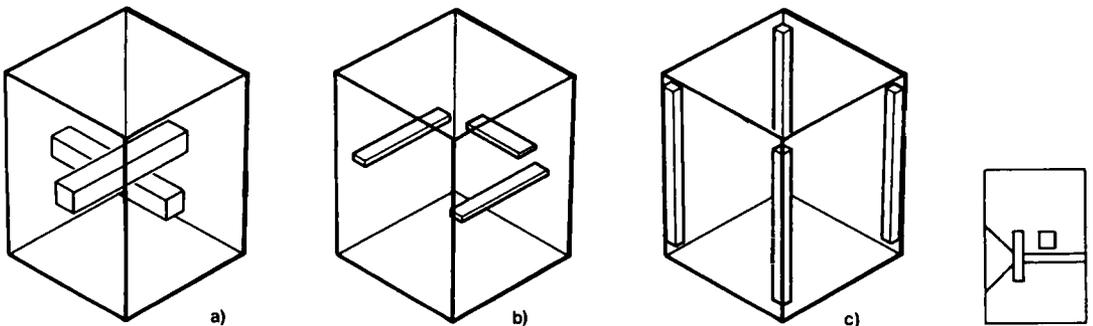


Figure 6.4 : Mesures antivibratoires et renforcement du boîtier.

son avant-arrière. Le renfort peut être un tasseau de 50 mm × 50 mm ou une entretoise de forte section (25 mm à 40 mm), suffisamment rigides et efficaces au regard du peu de volume qu'ils occupent dans l'enceinte. Le montage de renforts, placés au milieu des parois, et qui relient les côtés opposés, divise la fréquence de résonance par deux. Cependant, il est préférable de décaler ces renforts pour éviter que les fréquences de résonance des deux parois ne soient parfaitement identiques, car cela entraînerait une amplification de résonance par sommation à la même fréquence. Autres avantages : ce décalage répartit le spectre des résonances et en réduit l'amplitude globale [14].

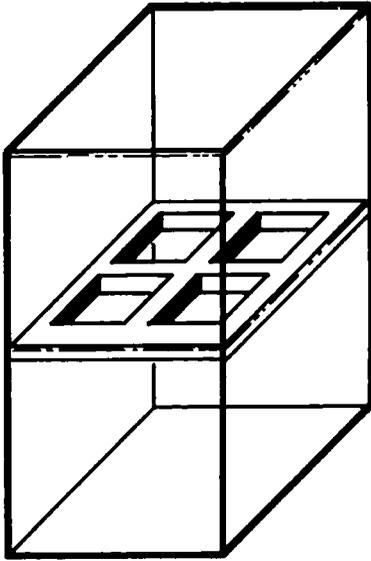


Figure 6.5 : Exemple de panneau intermédiaire ajouré.

D. Fixation des haut-parleurs

L'isolation des vibrations qui proviennent du châssis du haut-parleur, fixé sur la face avant de l'ébénisterie, s'est également révélée efficace dans la réduction du niveau des bruits parasites, émis par le coffret. Une excellente solution est la mise en place d'inserts de fixation du type Well-Nut. Le châssis est vissé sur un écrou en laiton noyé dans un support en

caoutchouc, lui-même serti dans le bois de la face avant de l'enceinte. Ce type de montage flottant est souvent utilisé pour amortir les vibrations des moteurs électriques, et il opère de la même manière pour les haut-parleurs. De plus, l'usure prématurée du filet dans le bois, causée par l'utilisation de vis à bois pour fixer les haut-parleurs, est éliminée. Des bagues de découplage en caoutchouc, fixées sur les boulons ou les écrous, ont également démontré leur efficacité [15]. En plus de ces précautions, un joint d'étanchéité en caoutchouc, en mousse synthétique ou en mastic, aidera à amortir et à isoler les vibrations du haut-parleur. Une autre solution consiste simplement, lors du montage du haut-parleur, à poser un joint aux silicones. Celui-ci aura la forme d'un cordon d'une épaisseur de 6 mm, qui, déposé sur le rebord du châssis du haut-parleur, fera un joint étanche et amortira les vibrations. Par contre, le démontage de ce haut-parleur se révélera délicat, s'il a été encastré dans le panneau de la face avant.

E. Découplage de l'enceinte acoustique du sol

Les enceintes acoustiques peuvent transmettre une grande partie des vibrations au sol sur lequel elles sont posées ; celui-ci, à son tour, les transmettra au volume d'air de la pièce d'écoute. La lubie de ces dernières années consiste à placer sous les enceintes des sortes de pointes métalliques (cônes) (habituellement trois), qui stabilisent le coffret et l'isolent du sol. Certes, ces pointes métalliques isolent quelque peu du sol par leur faible contact physique, mais leur efficacité peut être notablement accrue par l'adjonction d'une masse supplémentaire, posée au sol. Une nouvelle technique, apparue sur le marché, consiste à munir l'enceinte d'une sorte de socle qui sert de « puits » d'énergie. Cela consiste en une plaque très lourde, de pierre ou de marbre, qui en aucun cas ne peut vibrer, donc transmettre des vibrations au sol. La combinaison de plusieurs des techniques précitées peut se révéler particulièrement efficace pour limiter

la transmission des vibrations des enceintes acoustiques au sol. Les figures 6.6 et 6.7 montrent les courbes relevées avec un accéléromètre sur deux enceintes, l'une construite avec des panneaux de particules d'une épaisseur de 19 mm (figure 6.6), et l'autre construite avec des panneaux MDF de 25 mm, les parois raidies par des entretoises et dont l'intérieur est généreusement garni de matériau amortissant Antiphon Type 13 (figure 6.7). La mesure fut effectuée avec le générateur sinus de l'analyseur Audio Precision System 1 et un accéléromètre PVDF (polyvinylidène) [16]. L'accéléromètre PVDF n'est pas un exemplaire calibré, pourtant les différences sont évidentes. Malgré la persistance des fréquences élevées, le niveau situé en dessous de 150 Hz a été largement amorti. Certaines résonances ont dérivé vers des fréquences un peu plus élevées, sans pour autant en être d'avantage atténuées.

Bibliographie

1. **Ralph Gonzalez**, *An Introduction to Frequency Response and LMP, Part II: The Response Step*, *Speaker Builder*, 2 / 87, p. 42
2. **Robert C. Kral**, *Diffraction: The True Story*, *Speaker Builder*, 1 / 80, p. 28

3. **Bews & Hawksford**, *Application for the Geometric Theory of Diffraction (GTD) to Diffraction at the Edges of Loudspeaker Baffles*, *JAES*, 10 / 86
4. **David Weems**, *How to Build & Test Complete Speaker Systems*, Tab Books No. 1064 (épuisé)
5. Dans le menu "bibliothèque d'enceintes" du programme LEAP 4.0
6. **Lubos Palounek**, *Enclosure Shapes and Volumes*, *Speaker Builder*, 3 / 88, p. 22
7. **Shinichi Sakai**, *Acoustic Field in an Enclosure and Its Effect on Sound-Pressure Responses of a Loudspeaker*, *JAES*, 4 / 84
8. **J. K. Iverson**, *The Theory of Loudspeaker Cabinet Resonances*, *JAES*, 4 / 73
9. **Allan Millikan**, *Dynaudio Drivers and Sheetrock*, *Speaker Builder* 3 / 89, p. 15
10. **M. Lampton**, *A Three-Way Corner Loudspeaker System*, *Speaker Builder*, 4 / 82, p. 7
11. *Voice Coil*, 10 / 89
12. *Voice Coil*, 1 / 91
13. **Mike Chin**, *Cabinet Bracing*, *Speaker Builder*, 2 / 91, p. 71
14. **Peter Muxlow**, *Loudspeaker Cabinets*, *Speaker Builder*, 2 / 88, p. 24
15. **S. Linkwitz**, *A Three-Enclosure Loudspeaker System*, *Speaker Builder* 2 / 80, p. 12
16. *Voice Coil*, 2 / 91

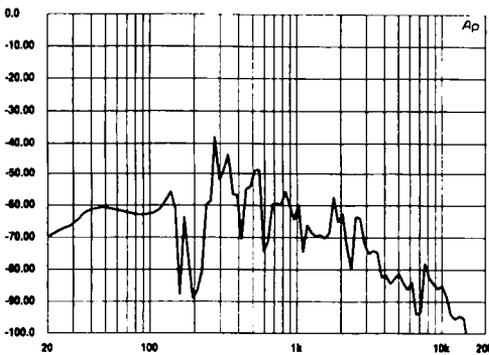


Figure 6.6 : Mesure effectuée par un accéléromètre d'un coffret non traité et constitué de panneaux de particules agglomérées de 19 mm d'épaisseur.

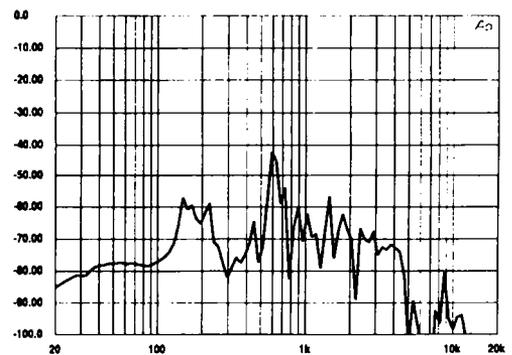


Figure 6.7 : Mesure effectuée par un accéléromètre d'un coffret aux parois renforcées et amorties, constituées de panneaux MDF de 25 mm d'épaisseur.

7 Haut-parleurs de registre médium et aigus : mise en œuvre et boîtiers

7.1 Introduction

Ce chapitre vous montre comment déterminer les bonnes fréquences de coupure des filtres en fonction de la bande passante, de la distance des murs autour de l'enceinte et du positionnement des haut-parleurs médium et aigus sur la face avant de l'ébénisterie.

7.1.1 Fréquence de coupure et bande passante

Les fréquences de coupure des filtres sont avant tout définies par la bande passante utile des haut-parleurs que vous avez choisis. La limite inférieure en fréquence, pour les haut-parleurs médium et aigus, est déterminée par la fréquence de résonance du haut-parleur. En d'autres mots, quand vous filtrez un haut-parleur, quel qu'il soit, c'est toujours à partir d'une fréquence située au moins une octave au-dessus de la fréquence de résonance de ce haut-parleur [1]. Si deux octaves au-dessus de la fréquence de résonance sont possibles pour la fréquence de coupure du filtre, n'hésitez pas. Ceci évitera les perturbations de phase dans la zone de coupure du filtre passe-haut du haut-parleur, phénomène exposé en détails dans le chapitre 8. Si vous n'êtes pas familiarisés avec les octaves, sachez que cette notion est simple : si vous doublez la fréquence, vous passez à l'octave supérieure ; si vous divisez la fréquence par deux, vous passez à l'octave inférieure. En résumé, un *tweeter* (haut-parleur d'aigus), dont la résonance est située à 1 kHz, ne devra pas être filtré à une fréquence de coupure inférieure à 2 kHz, 3 kHz à 4 kHz sont même préférables. Pour les haut-parleurs médium (et les haut-parleurs de graves), la limite supérieure en fréquence est définie par leur

Tableau 7.1

Détermination de la limite supérieure de la fréquence de coupure passe-bas du filtre en fonction de la directivité horizontale définie par le diamètre du haut-parleur

haut-parleur en pouces	fréquence	
	-3 dB/Hz	-6 dB/Hz
15	661	1043 Hz
12	912	1427 Hz
10	1065	1674 Hz
8	1302	2055 Hz
7	1540	2421 Hz
5	2051	3229 Hz
4	2687	4238 Hz

directivité, et se détermine plus précisément à partir de leur diagramme polaire horizontal. Quand la fréquence augmente, et que la longueur d'onde approche de la valeur du diamètre du haut-parleur, la directivité du rayonnement s'accroît. Deux critères bien établis vous serviront à déterminer la limite supérieure en fréquence, due à la directivité du haut-parleur. Ces critères se basent sur l'atténuation admissible du niveau de pression sonore pour un angle d'écoute de $\pm 45^\circ$. La valeur la plus fréquemment admise, pour l'atténuation sous un angle de 45° par rapport à l'axe, est au maximum de 6 dB. Dans la mesure où la largeur de bande de votre haut-parleur est assez étendue, un critère plus serré consiste à retenir, comme limite supérieure, une fréquence qui correspond à une atténuation de 3 dB pour une incidence de 45° (figure 7.1). Le tableau 7.1 décrit les fréquences de coupure, pour un filtre passe-bas d'un haut-parleur de graves, en fonction

de son diamètre, et utilisé conjointement avec un haut-parleur médium. Nous savons que le haut-parleur de registre supérieur comblera la chute de niveau en dehors de l'axe ; cette limite en fréquence pourra donc, sans perte de performances appréciable, être dépassée d'au moins 10%. À moins que la largeur de bande du haut-parleur de registre supérieur soit très grande, le critère de l'atténuation de 6 dB du niveau à 45° de l'axe sera tout à fait satisfaisant.

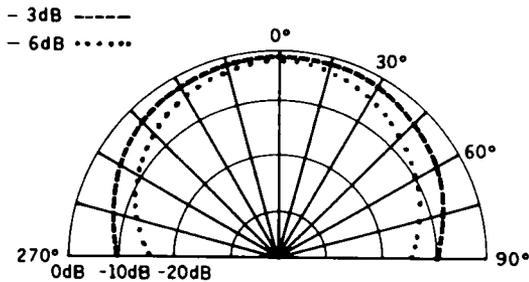


Figure 7.1 : Diagramme polaire horizontal montrant la directivité pour deux fréquences différentes.

7.1.2 Enceintes acoustiques à deux ou à trois voies

Au niveau de la qualité sonore, les enceintes acoustiques à deux voies ne sont pas intrinsèquement supérieures à celles à trois voies (ou plus) et réciproquement. On a vu, au fil des ans, toutes sortes de modèles couronnés de succès. Il est toutefois difficile de résister à la tentation d'affirmer : « la qualité est dans la simplicité ». Moins il y aura de haut-parleurs et de fréquences de coupure, moins il y aura de problèmes potentiels et de matière à erreur. Mais de toute évidence cela ne constitue pas un problème pour un constructeur expérimenté, comme Jon Dahlquist. Néanmoins, les configurations à trois voies supportent plus de puissance et distordent moins aux puissances élevées pour les haut-parleurs d'aigus.

7.2 Premières réflexions et fréquences de coupure

Si les haut-parleurs de votre enceinte sont proches des surfaces qui définissent les limites de votre pièce d'écoute (murs, sol et plafond), un trou profond apparaîtra sur la courbe de réponse en puissance de votre enceinte acoustique. Ce phénomène provient des interférences produites par les premières réflexions sur ces surfaces proches de l'enceinte. En fonction des différents délais de propagation du son, qui correspondent à la distance parcourue par le son pour effectuer les premières réflexions et se recombiner avec l'émission du haut-parleur, des interférences naissent et provoquent des creux et des bosses dans la courbe de réponse en puissance de l'enceinte. Ce n'est un problème que pour le registre des basses fréquences, où la distance entre le haut-parleur et les surfaces réfléchissantes (murs, sol et plafond) est inférieure à 0,75 fois la longueur d'onde (λ) [2]. Pour des haut-parleurs de grave ou de médium, distants de 0,4 à 0,6 m d'une surface quelconque de la pièce, le trou dans la courbe de réponse apparaîtra dans la zone des 120 Hz à 160 Hz [3]. L'amplitude de cette dépression peut atteindre 3 à 10 dB (par rapport à la valeur moyenne de la courbe de puissance), en fonction de votre pièce, de son aménagement, de la position exacte de l'enceinte, etc... Pour information, sachez qu'avec un haut-parleur, qui émet une impulsion brève, de l'ordre de 10 μ s par exemple, on verra le front d'onde de cette impulsion être suivi au bout de 2 ms de la première réflexion, qui provient fréquemment du sol [8]. Il y a plusieurs solutions pour remédier, au moins en partie, à ce problème. L'une d'entre elles, proposée par Colloms, est de limiter le choix de la fréquence de coupure du grave/médium à la zone des 200 à 300 Hz. Cela placera le trou de la courbe de réponse dans la pente d'atténuation de la coupure passe-haut du haut-parleur médium. Si vous utilisez un haut-parleur grave-médium, qui a une fréquence de résonance basse (environ

75 Hz dans une petite enceinte), la fréquence de coupure sera correctement située à au moins deux octaves au-dessus de la fréquence de résonance du haut-parleur.

Vous pouvez également combler ce trou de la courbe de réponse du haut-parleur de graves avec une égalisation active. Une autre solution, proposée par Allison, et appliquée pendant de nombreuses années par plusieurs fabricants (dont Acoustic Research et Allison Acoustics), est de placer l'enceinte contenant le haut-parleur de graves à l'intersection de deux surfaces de la pièce (par exemple le mur du fond et le sol) [2]. Dans ce cas, placez les haut-parleurs de médium et d'aigus à une distance égale à 0,75 fois la longueur d'onde de la fréquence de coupure de 300 Hz (1,15 m) de l'intersection des surfaces de réflexion. Le haut-parleur de grave, qui rayonne latéralement, aura une courbe de réponse en puissance pratiquement plate,

alors que le haut-parleur de médium sera à l'écart de ces perturbations (figure 7.2). La troisième solution, pour remédier aux problèmes posés par les premières réflexions et diffractions sur les surfaces de la pièce, est d'effectuer une compensation de la courbe de réponse par une égalisation active. Celle-ci peut être obtenue avec un égaliseur à fréquence ajustable ou par un simple filtre actif à circuit intégré, comme celui qui est présenté dans la figure 7.3. Ce sont plutôt des remèdes de cheval, mais l'expérience prouve qu'ils sont efficaces. De bons exemples d'application se trouvent dans les articles suivants :

1. S. Linkwitz, *A Three-Enclosure Loudspeaker System*, *Speaker Builder*, 4 / 80
2. J. D'Appolito, *A High-Power Satellite Speaker*, *Speaker Builder*, 4 / 84

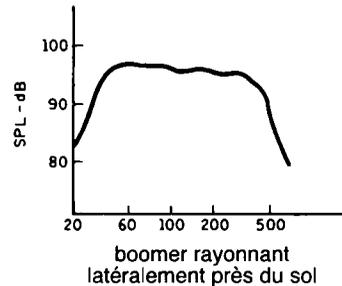
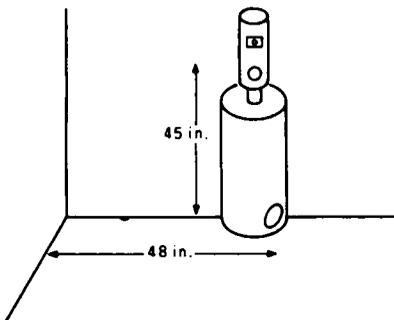


Figure 7.2 : Effet de la distance des murs, du sol et du plafond de la pièce d'écoute sur la réponse en basses fréquences d'un haut-parleur de graves.

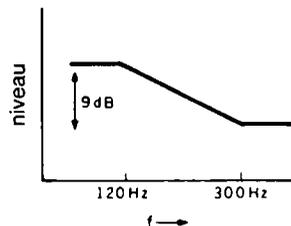
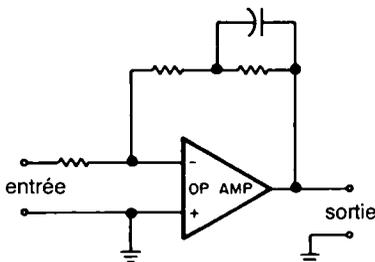


Figure 7.3 : Exemple d'égalisation active.

7.3 Directivité horizontale et distances entre les haut-parleurs

Dans la zone de recouvrement en fréquence, qui est, dans le cas d'une enceinte à plusieurs voies, au-dessus et en dessous de la fréquence de coupure du filtre, vous pouvez déterminer la pression sonore en faisant la somme des pressions émises par chacun des deux haut-parleurs (au-delà de cette zone de recouvrement, ne tenez compte, pour déterminer la pression sonore, que de l'émission du seul haut-parleur considéré). L'importance de la zone où s'opère le recouvrement variera en fonction des différentes pentes d'atténuation des filtres. Des filtres à faible pente d'atténuation, comme 6 dB/octave, ont des zones de fréquences où les signaux des deux haut-parleurs se recouvrent sur plus de deux octaves au-dessus et en dessous de la

fréquence de coupure, alors que des filtres à pente d'atténuation plus forte, comme 18 ou 24 dB/octave, ne se recouvrent que sur une octave de part et d'autre de la fréquence de coupure. Peu importe que le recouvrement s'opère sur une ou deux octaves, la résultante de la combinaison de deux sources rayonnantes sera toujours un ensemble d'interférences complexes, contenant des zones de renforcement et des zones de dépression du niveau sonore. Ces zones d'interférence seront d'autant plus complexes que la distance entre les sources (haut-parleurs) est grande (figure 7.4) [4]. Comme vous le constatez, la combinaison optimale des deux rayonnements est obtenue dans l'axe d'écoute (incidence normale à l'enceinte), quand la distance entre les deux haut-parleurs est inférieure ou égale à la longueur d'onde de la fréquence la plus élevée reproduite par les deux haut-parleurs.

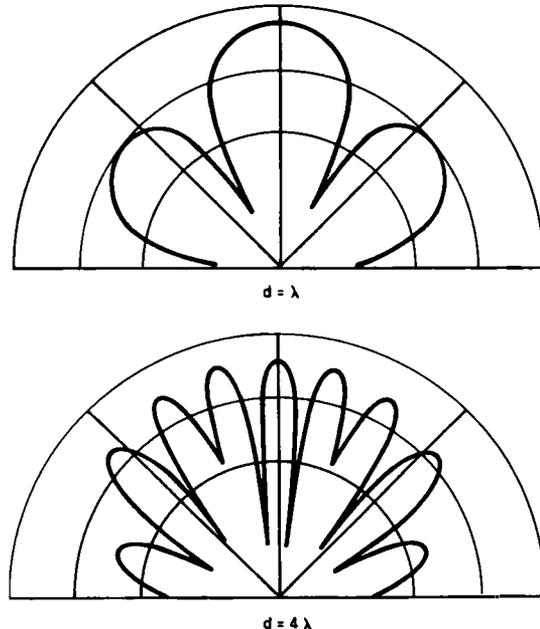


Figure 7.4 : Lobes de directivité résultant des interférences produites par deux haut-parleurs non-coïncidents et rayonnant à la même fréquence.

Pour des raisons pratiques, le choix se porte sur une distance égale à la longueur d'onde de la fréquence de coupure. Le tableau 7.2 donne, pour différentes fréquences, la longueur d'onde égale à la distance en pouces entre les deux haut-parleurs.

fréquence (Hz)	distance (en pouces)
5000	2,7
3000	4,5
1500	9,0
750	18,1
500	27,1
300	45,2
200	67,8
100	135,6

7.4 Enceintes pour haut-parleur médium

Lors du choix d'une enceinte pour haut-parleur médium, vous serez confronté à deux problèmes majeurs : premièrement, quel type d'enceinte retenir ? Deuxièmement, comment diminuer au maximum les réflexions internes ? La dimension de votre boîtier sera déterminée par la fréquence de coupure et la pente d'atténuation du filtre que vous avez retenues. Si la fréquence de coupure est au-dessus de 300 Hz, si la fréquence de résonance du haut-parleur est placée à une ou deux octaves en dessous de la fréquence de coupure (ce qui demande pour le coffret du médium une résonance située vers 75 Hz à 150 Hz), et si vous utilisez un filtre passe-bas du second ordre ou plus, dans ce cas, le haut-parleur de médium ne travaillera guère en « régime piston », et une simple enceinte close fera l'affaire. Si la fréquence de coupure est située entre 100 Hz à 300 Hz environ (ou est plus basse que 450 Hz, dans le cas où vous utilisez un filtre passe-bas du premier ordre), le haut-parleur de médium travaillera, au moins en partie, en régime piston et pourra donc profiter d'une enceinte optimisée en basse fréquence (figure 7.5). Si la fréquence de résonance de votre haut-parleur médium est au moins deux octaves en dessous de la fréquence de coupure, vous pouvez le monter

dans une enceinte *bass-reflex* ou dans une enceinte à ligne de transmission. Si la fréquence de résonance de l'enceinte de votre haut-parleur médium ne peut être distante que d'une octave, ou moins, de la fréquence de coupure du filtre, une enceinte close, avec sa pente d'atténuation douce, causera moins de variations de phase dans la zone de coupure du filtre passe-haut (région où se fait l'atténuation du filtre).

En d'autres mots, si vous ne pouvez pas obtenir, dans le cas d'un montage *bass-reflex* ou d'un montage à ligne de transmission, une fréquence de résonance d'enceinte qui soit inférieure au moins de deux octaves à la fréquence de coupure du filtre, choisissez un montage avec enceinte close. Voici, pour un haut-parleur médium, les avantages d'être chargé en *bass-reflex* ou par une ligne de transmission : moins de réflexion (dans le cas de la ligne de transmission) et moins d'excursion de membrane associée à moins de distorsion par effet Doppler (pour le montage *bass-reflex*). Tous les modèles de coffrets pour le registre médium, la ligne de transmission mise à part, profiteront de parois non parallèles, qui défavorisent les réflexions dans la bande de fréquence opérationnelle du haut-parleur. De plus, l'amortissement par des matériaux fibreux adéquats, tels la laine de verre, le Dacron ou la laine vierge en longues

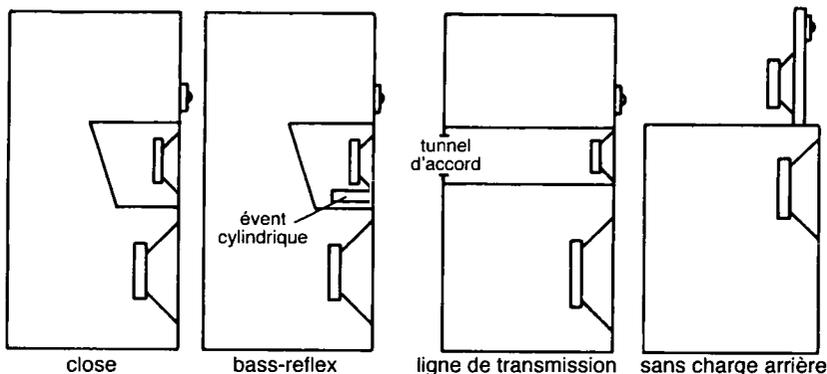


Figure 7.5 : Différents types d'enceintes pour haut-parleur médium.

fibres, sera très efficace pour un fonctionnement optimum du haut-parleur de médium. Les techniques d'amortissement des parois de l'ébénisterie, décrites dans le paragraphe 6.3, s'appliquent également aux coffrets de médium, quand ils sont distincts des coffrets des haut-parleurs de graves.

Comme dernière possibilité, citons le montage, fréquemment oublié, du haut-parleur médium avec absence totale de boîtier, nommé aussi « montage sans baffle » [5]. Le montage sans baffle le plus connu fut probablement l'enceinte Dahlquist DQ-10. Parmi les avantages de cette configuration, énumérons l'absence totale de réflexions internes de coffret (domaine critique pour les haut-parleurs médium) et un rayonnement bipolaire dans le registre médium. Vous seriez étonné de voir à quel point un haut-parleur de médium sans boîtier peut descendre en fréquence.

Avec un baffle plan d'une assez grande surface, soit 1 m^2 , un haut-parleur de grave-médium peut descendre correctement jusqu'à 100 Hz, puis la courbe suit une pente d'atténuation de 6 dB/octave jusqu'à la fréquence de résonance [6]. Comme dans cette configuration la tenue en puissance est diminuée, si le haut-parleur descend en dessous de 300 Hz, il est souhaitable d'appliquer une charge minimale en fixant une petite « couverture » sur l'arrière du haut-parleur. Celle-ci peut être constituée d'un produit fibreux absorbant ou de feutre du type de celui utilisé dans l'isolation acoustique des voitures.

7.4.1 Interaction de la face avant avec les haut-parleurs médium et aigus

Même dans les petites pièces, le champ réverbéré tend à masquer les effets des diffractions, lesquelles proviennent des nombreuses ruptures géométriques du coffret et de celles présentes sur la face avant des enceintes. Aussi est-il prudent de tout mettre en œuvre pour

éliminer ce problème, afin de produire une onde initiale aussi peu perturbée que possible par les diffractions. Plusieurs méthodes vous aideront à atténuer les effets de ces diffractions :

A. Si possible, choisissez, pour les faces avant des haut-parleurs de médium et d'aigus, des dimensions inférieures à la longueur d'onde de la fréquence de coupure du filtre [7]. Plusieurs réalisations commerciales, auxquelles on a attribué une excellente image sonore, avaient fréquemment, pour le médium et le *tweeter*, une enceinte séparée de celle du grave, qui satisfaisait au critère précédent.

B. Montez tous les haut-parleurs à ras du panneau de la face avant. Pour cela, il vous faut ou bien fraiser un évidement dans le panneau pour encastrer le haut-parleur, ou bien tapisser la surface extérieure du panneau avec de la mousse synthétique d'environ 6 mm d'épaisseur ou avec du feutre, sans oublier de pratiquer les découpes nécessaires au passage des haut-parleurs. Cette dernière technique amortit également les réflexions à la surface du panneau, mais l'effet de n'importe quel matériau amortissant de 6 mm d'épaisseur, quoique subjectivement « audible », reste minime.

C. Positionnez les haut-parleurs de telle manière qu'ils ne soient pas équidistants de deux côtés quelconques de la face avant. Ne placez pas les haut-parleurs dans l'axe de symétrie de la face avant (ne les centrez pas). Certaines enceintes acoustiques, dont les haut-parleurs sont montés asymétriquement sur la face avant, sont livrées par paire symétrique par rapport à un miroir, de telle sorte que l'enceinte de gauche présente des haut-parleurs décalés à droite, et réciproquement, l'enceinte de droite des haut-parleurs décalés à gauche.

D. Éliminez toute protubérance de la surface de la face avant, y compris les éléments de

visserie, les bordures de coffret qui dépassent et les cadres de tissu amovibles ou les grilles de façade, qui n'ont qu'une fonction esthétique dans la plupart des cas. Les réflexions, causées par ces éléments ou par toute autre protubérance de la face avant, peuvent provoquer des irrégularités dans la courbe de réponse, qui atteignent 4 dB et qui sont accompagnées de retards jusqu'à 0,5 ms [4,8]. N'oubliez pas que ces données proviennent de mesures effectuées dans l'axe, en milieu anéchoïque, et qu'elles ne représentent qu'un petit pourcentage des ondes sonores qui arrivent à vos oreilles dans une pièce d'écoute. Cependant, si vous recherchez la perfection, la seule face avant amovible, exempte de diffractions, est celle fabriquée en mousse réticulée autoporteuse, qui s'applique sur le panneau avant avec des fixations de type Velcro. Toute face avant en tissu altère plus ou moins le son, sans compter les perturbations mineures apportées par le cadre (de fixation, qui le sous-tend). Néanmoins, je crois que je n'ai encore jamais «entendu» une face avant, sous forme de grille ou de cadre tendu de tissu, détériorer nettement le son d'une enceinte acoustique (mais j'admets pourtant que l'on puisse enlever occasionnellement les faces avant pour écouter de la musique).

E. Évitez les angles et les bords trop prononcés. Les discontinuités trop brusques provoquent des diffractions. Les bords arrondis sont préférables, mais leur contribution n'est valable que si le rayon de courbure est assez grand.

Le rayon de courbure des bords arrondis de l'enceinte posée sur le cylindre Cubicon, décrit au chapitre 6, était proche de 50 mm et d'une efficacité plutôt faible comparée à celle d'une enceinte de forme parallélépipédique standard (en tout cas insuffisante pour que l'on puisse préconiser l'abandon de la forme parallélépipédique).

Bibliographie

1. **W. M. Leach, Jr.**, *Loudspeaker Driver Phase Response: The Neglected Factor in Crossover Design*, JAES, 6 / 80
2. **R. F. Allison**, *The Influence of Room Boundaries on Loudspeaker Power Output*, JAES, 6 / 74
3. **M. Colloms**, *High Performance Loudspeakers*, 1978, 1985, Pentech Press
4. **S. Linkwitz**, *A Three-Enclosure Loudspeaker System*, *Speaker Builder*, 2 / 80
5. **H. Olson**, *Gradient Loudspeakers*, JAES, 3 / 72
6. **R. J. Newman**, *Dipole Radiator Systems*, JAES, 1-2 / 80
7. **J. Kates**, *Loudspeaker Cabinet Reflection Effects*, JAES, 5 / 79
8. **Kantor & Koster**, *A Psychoacoustically Optimized Loudspeaker*, JAES, 12 / 86

8 Filtres passifs et filtres actifs

8.1 Filtres passifs

La conception des filtres passifs est plutôt complexe, car il faut tenir compte d'un grand nombre de paramètres. En fait, il serait tout à fait possible d'y consacrer un livre entier. Pour rester dans l'approche didactique de cet ouvrage, ce chapitre traitera essentiellement de méthodes et d'exemples qui ont fait leurs preuves dans la fabrication industrielle d'enceintes acoustiques. N'oubliez pas que votre choix final de combiner tel filtre à tel jeu de haut-parleurs dépendra non seulement de l'application de ces méthodes, mais également de nombreux tâtonnements ainsi que d'innombrables séances d'écoute de contrôle.

8.1.1 Historique

À l'apparition des enceintes acoustiques à plusieurs voies, vers les années trente, la conception des filtres était basée sur la théorie du filtre à "constante K" et du filtre à "dérivée de M" des ingénieurs G.A. Campell et O.J. Zobel, de la société Bell Telephone. L'une des premières publications dans ce domaine fut faite par John K. Hilliard et H.R. Kimball pour le compte du département son des studios Metro-Goldwyn-Mayer. Cet article, publié le 3 mars 1936 dans l'*Academy Research Council Technical Bulletin*, était intitulé *Dividing Networks for Loudspeaker Systems* (republié dans le JAES de novembre 1978). Hilliard publia une étude ultime expliquant la conception des filtres, dans la revue *Electronics* de janvier 1941. Cette étude contenait toutes les formules nécessaires au calcul des filtres séries ou parallèles de type Butterworth d'ordre un et trois. Vers les années cinquante, le type de filtre pour haut-parleur le plus populaire était celui de Butterworth, qui avait supplanté tous les autres.

Dans un article écrit pour la revue *Audio* de novembre 1956, C.P. Boegli décrit les effets dus au décalage des haut-parleurs dans des ensembles coaxiaux ou coplanaires, munis de filtres de type Butterworth de premier et de second ordre [1]. L'article étudiait le "trou" en niveau quand les haut-parleurs étaient en phase (pic en opposition de phase), provoqué par le filtre de type Butterworth de second degré ainsi que la détérioration de la réponse en fréquence produite par la séparation verticale des haut-parleurs.

Vers les années soixante, Ashley et Small décrivent les propriétés des filtres de type série ayant des caractéristiques de transfert à tension constante. Ceci introduisit la notion de filtre du "quasi-second degré" (ou d'ordre "quasi-deux"). Alors qu'ils offrent un peu plus d'atténuation que les filtres du premier degré, tout en ayant les mêmes caractéristiques de "cohérence de phase", ces filtres présentent un niveau d'atténuation malheureusement trop faible pour éviter la distorsion de modulation de la plupart des haut-parleurs. Ce fut le sujet de l'article *Crossover Networks and Modulation Distortion* de R. Small (JAES 1971), qui indiquait que les filtres de 12 dB/octave avaient la pente d'atténuation minimale pour éviter, aux forts niveaux sonores, une distorsion excessive à la fréquence de résonance du haut-parleur. À la même époque, Ashley et Henne prônaient la réponse linéaire en amplitude et la caractéristique passe-tout de la phase des filtres de type Butterworth d'ordre trois [2].

En 1976, Siegfried Linkwitz décrit la réponse polaire dans l'axe vertical de plusieurs types de filtres, et il en conclut que les filtres passe-tout d'ordre deux et quatre (nommés également filtres de type Linkwitz-Riley ou de type Butterworth à la puissance deux) avaient pour avantage une réponse

symétrique dans l'axe vertical [3]. Un peu plus tard, Peter Garde compila tous les travaux antérieurs et y adjoignit sa description de toute la famille des filtres passe-tout et de leurs dérivés [4]. À partir de certaines de ces idées, Dennis Fink, qui travaillait avec Ed Long sur l'enceinte de contrôle de studio (*studio monitor*) à compensation des temps de propagation de la marque Urei, continua à développer la méthode de compensation des décalages horizontaux des haut-parleurs à l'aide de lignes à retard [13].

La contribution majeure suivante vint de Marshall Leach [5] et de Robert Bullock [6], qui démontrèrent la nécessité, pour les constructeurs d'enceintes acoustiques, de tenir compte de la résonance des haut-parleurs et de la distance horizontale et verticale entre les haut-parleurs, dans la détermination du type et de l'ordre du filtre qui donnera les meilleurs résultats. En continuant son excellent travail sur les filtres d'enceintes acoustiques, Bullock décrivit la bonne décomposition des filtres symétriques à trois voies, où il montrait que les filtres à trois voies n'étaient pas seulement des combinaisons de filtres à deux voies (comme beaucoup d'entre nous le pensaient) [7].

Parmi les contributions plus récentes et dignes d'intérêt figurent les séries d'articles de Stanley Lipshitz et John Vanderkooy, qui présentent différentes possibilités, d'ailleurs

pas forcément réalisables, pour concevoir des filtres à réponse de phase minimum. Le progrès le plus grand de ces dernières années provient, sans aucun doute, de l'apparition de logiciels de calculs et d'optimisation des filtres. Ces logiciels ouvrent de nouvelles voies dans l'expérimentation et la rationalisation de la conception des filtres. Les anciennes méthodes de réalisation empiriques, qui s'étaient révélées pénibles, terriblement chronophages, voire irréalisables, sont devenues caduques. Aujourd'hui, grâce à des logiciels comme XOPT, CACD, CALSOD, Filter Design et LEAP 4.0, la conception des filtres relève plus de la science que de la "magie noire".

8.2 Bases du filtrage

Il y a deux types fondamentaux de configuration pour les filtres : le filtre série et le filtre parallèle (figure 8.1). De ces deux configurations, c'est le filtre parallèle qui est de loin le plus répandu dans l'industrie audio. Il a l'avantage de traiter séparément chaque haut-parleur dans une enceinte à plusieurs voies. Dans le cas d'un filtre série, la variation de la valeur d'un seul composant peut affecter à la fois les performances du haut-parleur passe-haut et celles du haut-parleur passe-bas [11]. Comme le filtre parallèle semble plus flexible

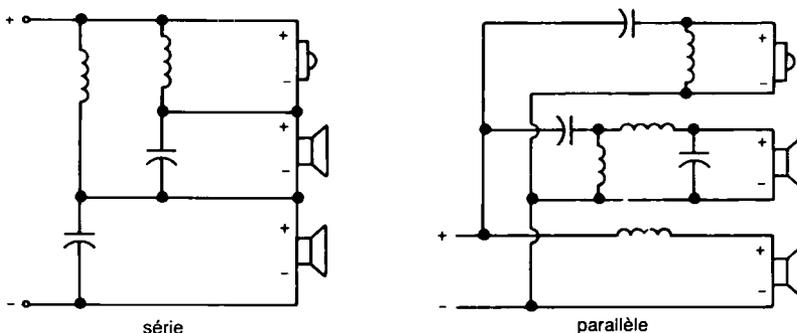


Figure 8.1 : Filtre série et filtre parallèle

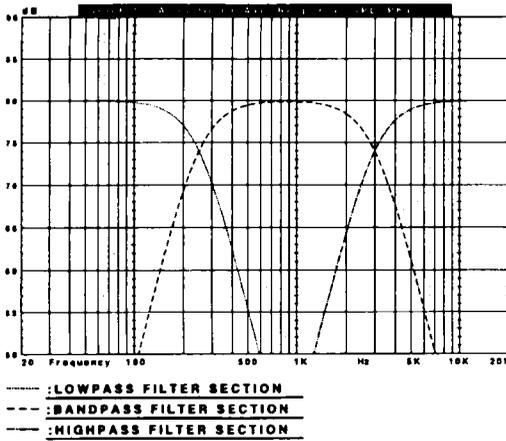


Figure 8.2

et qu'il convient mieux aux applications décrites dans ce chapitre, ce sera la seule configuration retenue. On trouvera plus d'informations sur le filtre série dans l'article de R. Small *Constant Voltage Crossover Network Design*, publié dans le *JAES* de janvier 1971.

Les filtres pour haut-parleurs sont constitués de sections comportant des éléments L (selfs) et C (condensateurs). Pour les filtres parallèles, il y a trois configurations de base. La réponse en fréquence de ces filtres est illustrée en figure 8.2. Ces trois configurations sont les suivantes :

1. Les filtres passe-bas, qui coupent progressivement les fréquences élevées, sont généralement utilisés avec les haut-parleurs de graves.
2. Les filtres passe-haut, qui coupent progressivement les fréquences basses du haut-parleur, sont essentiellement utilisés avec les haut-parleurs d'aigus.
3. Les filtres passe-bande, qui coupent progressivement aussi bien les fréquences élevées que les fréquences basses, sont utilisés pour filtrer les haut-parleurs de registre médium.

Les différents filtres élémentaires (passe-bas, passe-haut et passe-bande), constitués de composants L (selfs) et C (condensateurs),

sont combinés, lorsqu'on les conçoit pour les enceintes acoustiques, en un ensemble nommé filtre répartiteur de fréquences (souvent appelé en abrégé simplement filtre). Cet ensemble de circuits de filtrage, quel qu'il soit, produit fondamentalement des atténuations en fonction de la fréquence, grâce à la réactance des selfs et des condensateurs. Cette propriété des composants, qui dépend de la fréquence, est décrite, en fonction de la réactance (qui, en courant alternatif, est synonyme de résistance), par les formules suivantes :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_L = 2\pi f L$$

Les relations décrites par ces formules sont évidentes. La capacitance (réactance des condensateurs) est inversement proportionnelle à la fréquence, et leur résistance en courant alternatif augmente, quand la fréquence décroît (ils deviennent plus réactifs). L'inductance des selfs est directement proportionnelle à la fréquence et leur résistance en courant alternatif augmente avec la fréquence (elles deviennent plus réactives).

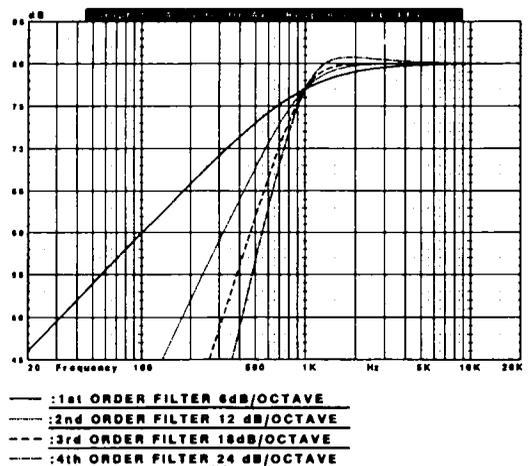


Figure 8.3

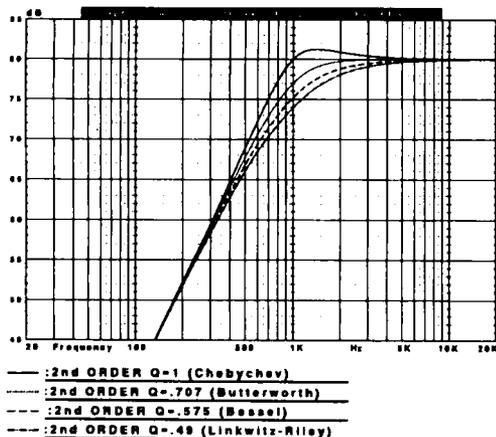


Figure 8.4

Les filtres se caractérisent habituellement par trois propriétés principales : la pente d'atténuation à la fréquence de coupure, la résonance du filtre et le coefficient Q. La pente d'atténuation, dans la zone des fréquences de coupure, s'exprime communément en chute de niveau par octave ou dB/octave. En fonction de la configuration du circuit, c'est-à-dire de la manière dont les composants L et C sont interconnectés, la pente d'atténuation du filtre en fonction de la fréquence sera de 6, 12, 18 ou 24 dB/octave, voir figure 8.3. Bien que cela soit peu fréquent, la pente d'atténuation d'un filtre peut même être supérieure à 24 dB/octave. On classe progressivement ces atténuations par octave en "ordre" de pente ; premier ordre pour 6 dB/octave, deuxième ordre pour 12 dB/octave, troisième ordre pour 18 dB/octave et quatrième ordre pour 24 dB/octave.

La fréquence de résonance du filtre, notion qui s'applique à des filtres d'ordre supérieur à 1, est la fréquence où les réactances des composants sont égales et cette fréquence définit la fréquence de coupure du filtre. La fréquence de résonance d'un filtre élémentaire de second ordre est donnée par :

$$f = \frac{1}{2\pi(LC)^{1/2}}$$

Le produit de L par C ($L \cdot C$), ou parfois le rapport L/C , est une notion importante, car on obtiendra la même fréquence de résonance si les valeurs de L ou de C varient, alors que le produit ($L \cdot C$), ou le rapport L/C , reste constant.

La notion de coefficient Q fait appel aux mêmes notions que celles qui ont servi à définir les coefficients Q pour les haut-parleurs et les combinaisons de haut-parleurs/enceintes. Le paramètre Q, qui est aussi appelé facteur de qualité, est un coefficient obtenu par calcul, qui décrit la résonance. Sa formule est la suivante :

$$Q = 2 \cdot \frac{\text{énergie emmagasinée à la fréquence de résonance}}{\text{énergie dissipée à la fréquence de résonance}}$$

Pour un circuit L/C du deuxième ordre, la formule du coefficient Q est la suivante :

$$Q = [(R^2 C) / L]^{1/2}$$

Les différentes valeurs du coefficient Q correspondent à des "coudes" des courbes d'atténuation en fonction de la fréquence, comme illustré dans la figure 8.4. Dans cette figure, les formes des courbes, qui correspondent aux différents coefficients Q, sont identiques à celles décrites pour les ensembles haut-parleur de graves/enceintes closes dans le chapitre 2. Dans le cas d'un filtre d'ordre deux, le coefficient Q, et par conséquent la forme de la réponse en fréquence, est dicté par le rapport L/C des composants. Les différents coefficients Q des filtres, illustrés en figure 8.4, ont des propriétés différentes, et ils portent généralement le nom de l'ingénieur qui le premier en décrit, sous forme mathématique, les caractéristiques de la réponse en fréquence, comme Butterworth ($Q = 0,707$), Bessel ($Q = 0,58$), ou Linkwitz-Riley ($Q = 0,49$).

Remarquez que la courbe de ces filtres correspond à des fonctions de transfert qui

relèvent du domaine électrique et non du domaine acoustique des haut-parleurs.

8.2.1 Combinaison des réponses des filtres à deux voies : sommation passe-haut et passe-bas

L'objectif de toute conception d'un filtre répartiteur de fréquences consiste à obtenir, lors de la combinaison de deux haut-parleurs de bandes de fréquences différentes, une courbe de réponse à la transition qui soit plate, afin que l'enceinte acoustique ait une largeur de bande qui couvre tout le spectre sonore. La tâche du concepteur est de combi-

ner deux sources sonores indépendantes, dont les bandes de fréquences se recouvrent de telle manière qu'il n'apparaisse ni nouveau trou ni nouvelle bosse dans la zone de transition. La manière dont les deux sources de signal indépendantes vont se combiner dépend étroitement de leur relation de phase. Les signaux ne se combinent pas de la même manière suivant qu'ils sont en phase ou non. La figure 8.5 illustre l'addition acoustique de deux sources sonores corrélées (qui sont en phase) et de deux sources sonores non corrélées (qui ne sont pas en phase). Quand deux sources sonores indépendantes sont corrélées, leur combinaison s'effectue comme celle de deux grandeurs scalaires. Dans la

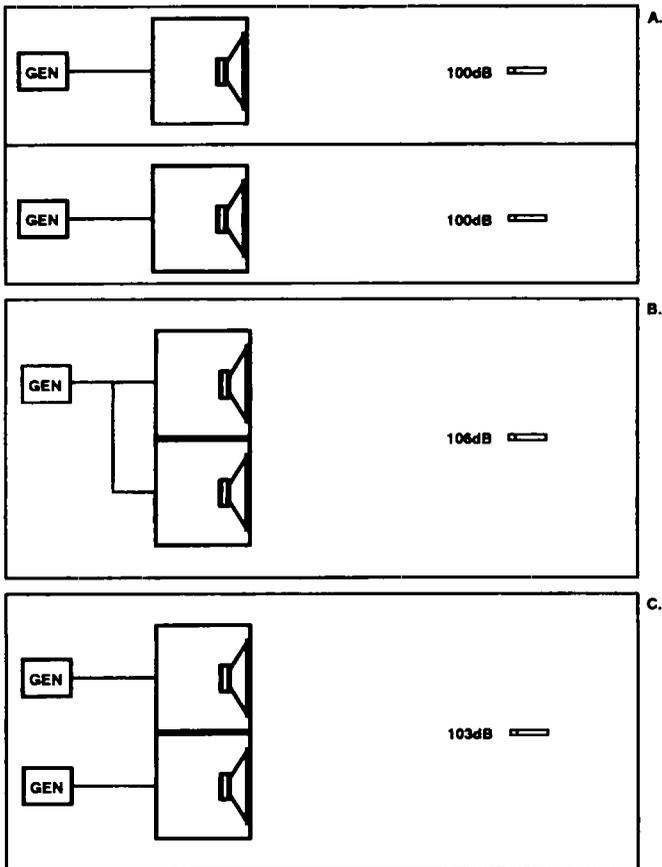


Figure 8.5 : La sommation des ondes acoustiques.

figure 8.5B, les deux haut-parleurs, alimentés par la même source de signal, sont corrélés en phase : de ce fait, leur somme délivre un niveau supérieur de 6 dB au niveau de sortie d'un seul des deux haut-parleurs. Quand deux sources de signaux sonores indépendantes ne sont pas corrélées, le niveau sonore total est égal à la moyenne quadratique des deux signaux (*Root Mean Square RMS*). La figure 8.5C montre que le niveau de la somme des signaux de deux haut-parleurs, alimentés par deux sources différentes et donc non corrélées, est supérieur de 3 dB à celui d'un seul des haut-parleurs.

La somme électrique ou la somme des tensions des filtres s'effectue de la même manière que ci-dessus. Les filtres utilisés dans les enceintes acoustiques sont classés en fonction de leur relation de phase (phase corrélée ou non) en deux groupes, et ce aussi bien dans les sections passe-haut que dans les sections passe-bas. La phase, qui est fonction de la pente d'atténuation du filtre, sera étudiée plus en détail dans le chapitre 9. Les filtres qui diffèrent par leur coefficient Q et leur pente ont des caractéristiques de phase différentes. Les filtres impairs de type Butterworth présentent un décalage systématique de la phase de 90° entre la section passe-bas et la section passe-haut, phénomène appelé quadrature de phase. Un signal décalé par rapport à un autre signal de 90° à toutes les fréquences, est un signal dont la phase peut-être considérée comme non corrélée ; de ce fait, si le niveau des deux sections du filtre est à -3 dB à la fréquence de coupure, les deux sections de filtre s'additionneront avec une courbe de réponse plate.

Tous les filtres pairs de types Butterworth, Bessel, Linkwitz-Riley ou Chebychev, qu'ils soient d'ordre deux ou d'ordre quatre, sont en phase entre les sections passe-haut et passe-bas. Plus précisément, les filtres d'ordre deux sont décalés de 180° , mais en inversant la polarité de branchement, on annule ce décalage. Les filtres d'ordre quatre ont un

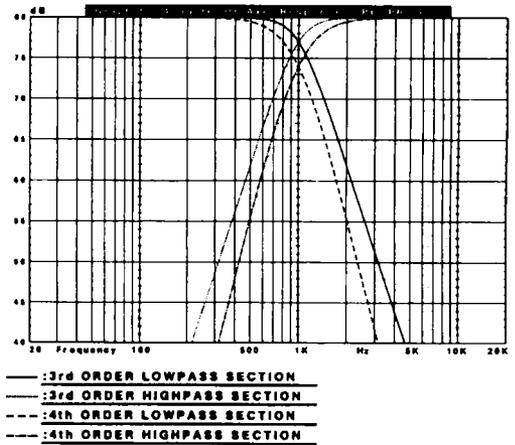


Figure 8.6

décalage de 360° , ce qui équivaut à une absence de déphasage. Quand on combine des sections de filtre d'ordre pair, la phase est corrélée, et les deux sections du filtre s'additionnent en produisant une courbe de réponse en niveau plate, si le niveau de chaque section est à -6 dB à la fréquence de filtrage. Dans la figure 8.6, on compare la somme d'un filtre à deux voies d'ordre trois de type Butterworth avec un filtre à deux voies d'ordre quatre de type Linkwitz-Riley.

Ce qui suit semble contraire aux règles établies concernant la nature des filtres d'ordre pair de type Butterworth, mais n'en est pas moins vrai. Lors du calcul de filtres pairs passe-bas et passe-haut de type Butterworth, on constate que leur phase est coïncidente, et que les deux sections passe-bas et passe-haut sont à -3 dB à la fréquence de filtrage (la forme de la courbe est due à la valeur du coefficient Q du filtre). De ce fait, le niveau de la somme des signaux, qui proviennent des deux sections du filtre, est de $+3$ dB, car comme les deux sources sont corrélées, elles ont un gain de 6 dB ($+3$ dB moins -3 dB est égal à $+6$ dB). Si la contrainte de coïncidence de phase est moins rigoureuse, et les fréquences du filtre décalées par un certain facteur (environ 1,3 pour des filtres de type

Butterworth d'ordre deux), le filtre aura une somme pratiquement plate en amplitude, quand les deux sections passe-haut et passe-bas sont à -6 dB pour la fréquence de filtrage.

8.2.2 Factirs passe-tout et factirs linéaires en phase

Il y a trois types de factirs répartiteurs de fréquences : les factirs à phase linéaire (nommés également factirs à phase minimum), les factirs passe-tout et les factirs «non passe-tout». Un seul type de filtre satisfait au critère de phase minimum, c'est le filtre de premier ordre de type Butterworth. Le filtre d'ordre un ne présente pas de déphasage (différence de phase nulle) à la fréquence de filtrage pour le signal somme, sa courbe de phase est plate pour toutes les fréquences ainsi que sa courbe d'amplitude [9]. Bien que le filtre de premier ordre soit cohérent en phase et ne produise pas, théoriquement, de distorsion de phase, il ne procure généralement pas assez d'atténuation pour la plupart des haut-parleurs passe-haut (haut-parleurs de registre médium et de registre aigu).

Les factirs passe-tout ont des caractéristiques de phase passe-tout, ce qui signifie qu'ils présentent un déphasage, et leur courbe de réponse en amplitude est plate. Quatre factirs passe-tout sont fréquemment utilisés dans les factirs pour enceintes acoustiques [4]. Ce sont les factirs de type Butterworth d'ordre un et trois ainsi que les factirs de type Linkwitz-Riley d'ordre deux et quatre. Bien que le filtre de premier ordre soit à phase minimum, il est néanmoins inclus dans cette catégorie. Ces factirs sont les plus fréquemment utilisés dans les enceintes acoustiques, car leur réponse en amplitude est plate et, sauf pour le premier ordre, ils produisent assez d'atténuation pour empêcher les haut-parleurs de médium et d'aigus de distordre.

La catégorie des factirs non passe-tout comporte tous les autres factirs utilisés dans les enceintes acoustiques. Ces factirs ont des caractéristiques passe-tout pour la phase. La somme des signaux provenant des deux sections d'un filtre n'est pas une courbe linéaire en amplitude. Cette catégorie comporte les factirs de type Butterworth d'ordre deux et quatre, de type Bessel d'ordre deux et quatre, le groupe des factirs asymétriques (à pôles non-circulaires) d'ordre quatre, les factirs de

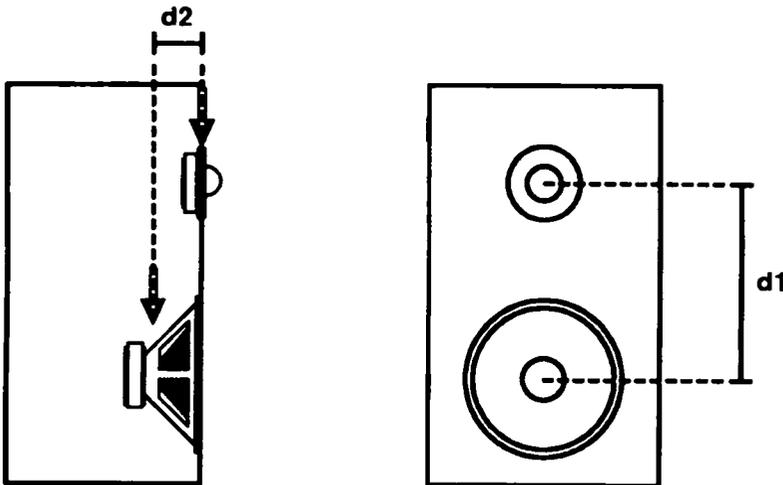


Figure 8.7 : Distances entre deux haut-parleurs non concentriques.

type Legendre, de type Gauss et les filtres d'ordre quatre à phase linéaire. Cependant, comme nous le verrons ultérieurement, si nous sommes moins sévères quant au critère de phase lors de la combinaison des deux signaux, nous pouvons obtenir de ces filtres, pour le signal de sommation, des résultats pratiquement linéaires pour la courbe en amplitude.

**8.2.3 Somme acoustique :
centre d'émission acoustique
des haut-parleurs et
plan zéro des retards**

Notre exposé sur les formes classiques de filtres, en usage dans les filtres répartiteurs de fréquences pour enceintes acoustiques, concerne la réponse électrique de ces filtres (leur fonction de transfert), leur somme est de nature électrique (c'est une somme qui s'effectue en tension). Afin que les mêmes

caractéristiques électriques de phase et d'amplitude soient conservées en acoustique, ce qui est notre but, il nous sera nécessaire de poser certains postulats. Le postulat le plus important est que le rayonnement des deux haut-parleurs doit être coïncident. Ce qui signifie que ces deux sources sont considérées comme parfaitement ponctuelles et synchrones. Ce qui est bien entendu théorique et ne rend pas compte de la réalité physique des dimensions des haut-parleurs.

La seule catégorie de haut-parleurs, constituée d'éléments passe-haut et passe-bas qui rayonnent à partir du même point dans l'espace, sont les haut-parleurs du type coaxiaux. D'habitude, ils sont constitués d'un haut-parleur de graves avec un haut-parleur d'aigus à dôme monté sur le dessus de la plaque de champ avant (c'est-à-dire sur la pièce polaire ou noyau central), de telle sorte que les positions des sources de rayonnement soient pratiquement confondues (à la

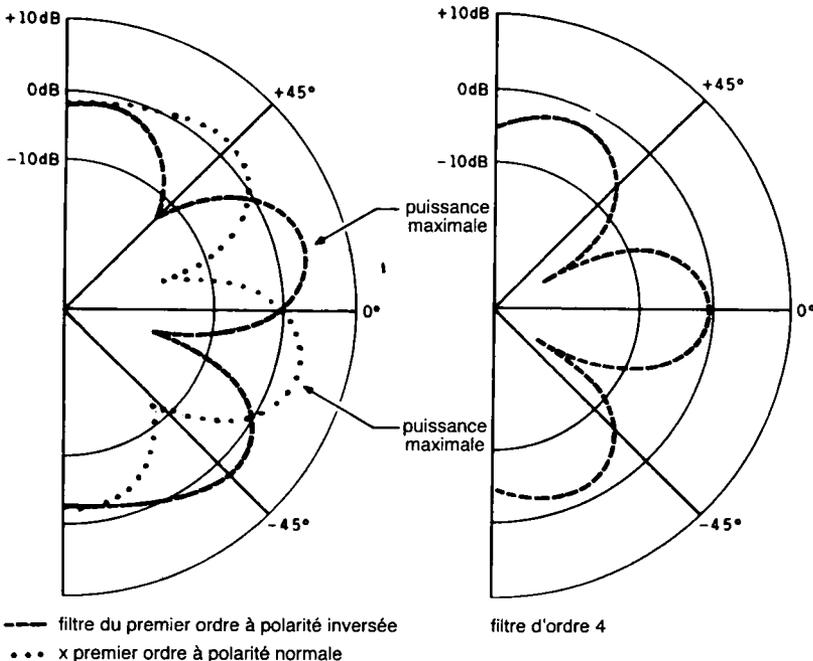


Figure 8.8 : Asymétrie et inclinaison de l'axe de la directivité du haut-parleur dans le plan vertical.

différence de certains haut-parleurs de graves équipés d'un haut-parleur d'aigus à pavillon, dont la bobine mobile est située à une certaine distance, bien en arrière de la bobine mobile du haut-parleur de graves). La résurgence actuelle de ce type de fabrication dans les haut-parleurs haut de gamme (entre autres ceux de KEF et de Tannoy) ne changera rien au fait que la majorité des enceintes acoustiques (comme celle de la figure 8.7) ont des haut-parleurs non coïncidents, séparés par une certaine distance aussi bien sur le plan vertical (d_1) que sur le plan horizontal (d_2).

Quand des haut-parleurs non coïncidents sont utilisés pour des bandes de fréquence différentes, leurs sources de rayonnement respectives sont séparées aussi bien sur le plan horizontal que sur le plan vertical. La séparation verticale entraîne un nombre de conséquences bien documentées [3,6]. En ce qui concerne la directivité, le problème le plus important est la présence de lobes dans le diagramme polaire (reportez-vous à la figure 7.4 du chapitre 7). Les lobes seront d'autant plus importants que les haut-parleurs seront plus distants l'un de l'autre. La seule solution est de réduire au maximum la distance entre les haut-parleurs et de s'assurer qu'aucune combinaison de haut-parleurs passe-bas/passe-haut n'a, entre les centres des haut-parleurs, une distance supérieure à la longueur d'onde de la fréquence de filtrage.

Suivant le modèle de filtre utilisé, la séparation des haut-parleurs sur le plan vertical peut également perturber la directivité de l'enceinte. Les filtres passe-tout de type Butterworth d'ordre un et trois provoquent des perturbations dans la directivité relevée sur le plan vertical, comme illustré dans la figure 8.8. Dans la mesure où il n'y a pas de décalage horizontal entre les haut-parleurs et que la séparation verticale est inférieure à une longueur d'onde de la fréquence de filtrage, pour un filtre de premier ordre, le lobe de niveau le plus élevé, observé dans le diagramme polaire du plan vertical (qui est asy-

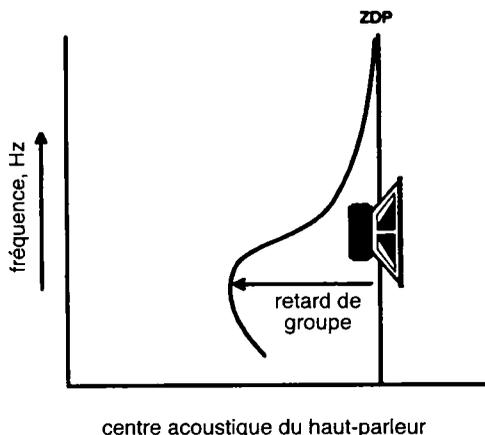


Figure 8.9 : Plan des origines temporelles.

métrique), est incliné vers le bas selon un angle de -15° par rapport à l'horizontale, si les deux haut-parleurs sont branchés en phase, et vers le haut selon un angle de $+15^\circ$, si le branchement est en opposition de phase (pour un filtre d'ordre trois, les angles sont inversés). L'inclinaison du lobe de niveau le plus élevé provient de la différence de phase de 90° entre les sections passe-haut et passe-bas du filtre de l'enceinte. Tous les filtres qui sont en phase, ce qui inclut tous les filtres d'ordre pair, n'ont pas une inclinaison du lobe principal dans le diagramme polaire vertical, qui dépend de la fréquence, et, sous réserve qu'il n'y ait pas de décalage horizontal, ils possèdent un diagramme polaire symétrique dans le plan vertical.

S'il y a un décalage horizontal de la position des deux haut-parleurs, les lobes du diagramme polaire vertical seront également inclinés. L'angle d'inclinaison β varie avec le rapport entre la distance du décalage vertical et la distance du décalage horizontal et se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\beta = \arctan \frac{d_1}{d_2} \text{ en degrés}$$

Cette inclinaison de l'axe principal du diagramme polaire par rapport à l'axe de rayonnement se combinera à toute perturbation provenant de filtres d'ordre impair, dont la variation de phase, qui dépend de la fréquence, développera des lobes supplémentaires. De même, les filtres qui sont en phase verront également leur symétrie de rayonnement perturbée.

La position exacte de la source de rayonnement du haut-parleur, nommée plan des origines temporelles (*Zero Delay Plane*, ZDP, peut sembler quelque peu mystérieuse. Lors de la mise au point de filtres, lorsque l'on calcule le décalage horizontal (ou le décalage temporel nécessaire pour compenser ce retard), la seule chose importante à retenir est la quantité relative de décalage et non pas le centre de rayonnement acoustique des haut-parleurs. Selon la fréquence, le centre acoustique d'un haut-parleur varie, c'est par définition une fonction naturelle de la phase du haut-parleur que de varier avec la fréquence [12,13]. Le dessin de la figure 8.9 illustre la relation entre le centre acoustique du haut-parleur et le retard de groupe. Aux fréquences basses, où le retard de groupe (dérivé de l'enveloppe de la courbe de phase du haut-parleur) est le plus grand, le centre acoustique du haut-parleur peut-être éloigné d'une grande distance du plan des origines temporelles du haut-parleur (ZDP). En termes de conception de filtres, quand les réponses des haut-parleurs sont modifiées de façon à s'harmoniser avec la fonction de transfert du filtre, c'est qu'on aura tenu compte de la réponse en phase du haut-parleur, et les changements en fonction de la fréquence de la position du centre acoustique sont alors secondaires.

Dans la plupart des cas, comme lors du calcul de l'inclinaison des lobes de directivité dans le plan vertical, causée par un décalage horizontal des haut-parleurs, on estime que le centre d'émission acoustique est le centre de la bobine mobile, que ce soit pour un haut-

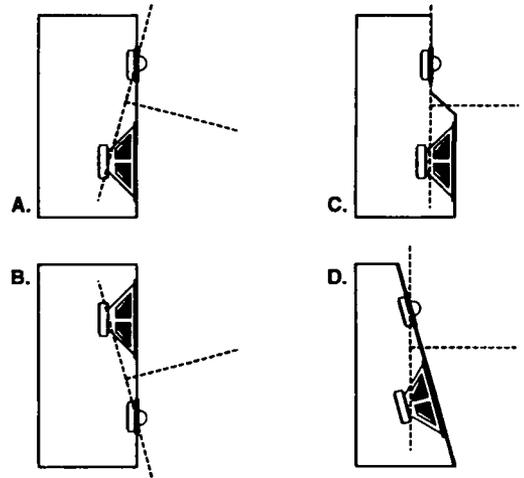


Figure 8.10 : Exemples d'axe normal au plan des origines temporelles.

parleur à cône ou à dôme. La position du centre de la bobine mobile, pour quelque haut-parleur que ce soit, sera toujours le milieu de la plaque de champ avant. Le milieu de la bobine mobile est une référence qui est opérationnelle et qui servira à distinguer la différence des plans des origines temporelles (ZDP) entre les deux haut-parleurs. La position exacte du centre acoustique du plan des origines temporelles (ZDP), qui varie avec le type de construction, peut différer quelque peu de la position prévue. Cette incertitude ne pourra être levée sans la mise en œuvre d'appareils de mesure complexes. Par exemple, dans le cas des haut-parleurs à cône, on observe souvent une tendance à rayonner à partir d'un point situé juste en face du sommet de leur cône. L'analyse impulsionnelle, plus particulièrement la méthode basée sur la mesure des temps de montée et de décroissance du signal de réponse du haut-parleur (ETC : *Energy-Time-Curve*), s'applique aux deux haut-parleurs pour déterminer la distance relative, qui les sépare, par la mesure de leur décalage temporel. Une méthode plus simple est de mesurer, à l'aide d'un microphone, la différence du temps de propagation de l'impulsion émise par deux haut-parleurs

soumis au même signal. Une autre méthode consiste à utiliser un générateur qui injecte des trains d'ondes d'enveloppe définie à la fréquence de filtrage, et on observe le signal du microphone à l'oscilloscope tout en déplaçant les haut-parleurs sur le plan horizontal [14]. L'opération terminée, on note la distance géométrique, nommée décalage, qui compense le retard temporel. Fréquemment, les distances établies avec les techniques les plus sophistiquées sont très proches des distances mesurées simplement à partir du milieu de l'entrefer du haut-parleur.

La figure 8.10 montre l'effet, sur l'axe de référence de l'enceinte, du décalage horizontal entre les deux haut-parleurs. Les dessins montrent les différentes manières dont sont affectés les axes de référence (compensés en temps de propagation) par les différentes dispositions spatiales entre les deux haut-parleurs [15]. La configuration de type "A", avec le haut-parleur d'aigus monté au-dessus du haut-parleur de graves, est de loin la plus commune pour les enceintes à deux voies. Pour cette configuration, l'axe du plan des origines temporelles (ZDP) n'est plus l'axe normal de l'enceinte, mais il plonge vers le sol (angle négatif par rapport à l'horizontale).

Les différences de temps de propagation, dues à des haut-parleurs dont les plans des origines temporelles (ZDP) ne sont pas alignés, provoqueront, dans la zone de filtrage, des perturbations dans la courbe de réponse en fréquence, si les mesures sont faites à incidence normale (0°), ce qui correspond généralement à l'axe d'écoute [16]. Si la distance est suffisante, comparée à la longueur d'onde de la fréquence de filtrage, une atténuation totale aura lieu à cette fréquence. Par exemple, pour une enceinte à deux voies dont les haut-parleurs ont la polarité de leur branchement inversée (les haut-parleurs sont montés en opposition de phase), un filtre de type Butterworth à 3 kHz d'ordre deux provoquera une sommation d'amplitude nulle, si les haut-parleurs sont distants de 57 mm. Cette

distance, que le son parcourt en 166 μs , est précisément égale à une demi-longueur d'onde à la fréquence de 3 kHz. Si les deux haut-parleurs sont coïncidents, le branchement en opposition de phase donnera une réponse plate en fréquence. Les différentes sensibilités aux ajustements dépendent du type de filtre et de sa pente. Une étude détaillée pour chaque type de filtre se trouve dans le paragraphe 8.3.

Dans la partie A de la figure 8.10, il suffirait de retarder d'une durée précise le signal qui arrive aux bornes du haut-parleur d'aigus, pour que l'axe du plan des origines temporelles (ZDP) rejoigne l'axe d'écoute à incidence normale (0°). Si la distance horizontale entre les deux haut-parleurs est de 76 mm, le délai nécessaire pour que ces deux haut-parleurs rayonnent à nouveau à partir d'un même plan sera de :

$$t_g = \frac{d_2}{C}$$

où C représente la célérité du son : 344 m/s ; d_2 la distance en mètres et t_g le temps en secondes.

Dans le cas présent ($7,6 / 344$) = 221 μs .

Les experts recommandent souvent d'inverser la position respective des deux haut-parleurs (comme en B de la figure 8.10), lors de l'emploi de filtres d'ordre impair (branchement en phase pour l'ordre un et en opposition de phase pour l'ordre trois). Ceci compense l'inclinaison vers le bas de l'axe de référence (révélée dans un diagramme polaire dans le plan vertical), provoquée par la différence de phase entre la section passe-haut et la section passe-bas. L'inclinaison de $+15^\circ$ de l'axe de rayonnement, due à la position des haut-parleurs, est annulée par l'inclinaison de -15° provenant des filtres d'ordre impair, la combinaison des deux effets aboutissant à un axe de référence du plan des origines temporelles (ZDP = zero delay plane) de 0° (en tenant correctement compte des distances d_1 et d_2).

Le dessin D de la figure 8.10 montre une autre méthode que certains utilisent pour faire coïncider l'axe du plan des origines temporelles (ZDP) avec l'axe d'écoute à 0° . Ici, pour être confondu avec l'axe d'écoute, l'axe du plan des origines temporelles (ZDP) a été dirigé vers le haut en inclinant la face avant de l'enceinte. Toutefois, quoique l'on ait changé l'inclinaison de l'axe du plan des origines temporelles (ZDP) en inclinant la face avant de l'enceinte, le résultat n'est pas le même que si les deux haut-parleurs avaient leurs plans d'émission alignés comme en C, ou que si l'on appliquait un retard électronique pour corriger l'absence de décalage du haut-parleur d'aigus pour les configurations A et B.

Afin de démontrer cette différence, j'ai mesuré deux haut-parleurs identiques de deux manières différentes (avec l'analyseur MLSSA et le microphone ACO) : premièrement, en compensant électroniquement le décalage géométrique par un retard, deuxièmement, en effectuant la mesure en dehors de l'axe de référence normal pour simuler une face avant inclinée. La distance horizontale de séparation était de 102 mm, et la séparation verticale de 267 mm. En appliquant l'une des formules précédentes, le plan des origines temporelles (ZDP) serait à environ 20° de l'axe 0° ($\arctan 10/27$) pour les deux haut-parleurs montés sur le même baffle. Le filtre actif, simulé à l'aide du logiciel LEAP, est du type Linkwitz-Riley d'ordre 4 dont la fréquence de coupure est de 1,2 kHz. Afin que les résultats des mesures soient plus faciles à interpréter, j'ai utilisé le même haut-parleur aussi bien pour les mesures passe-haut que passe-bas (en le commutant) ; ainsi, la somme des deux réponses, pour être exacte, devra être identique à la réponse d'un seul haut-parleur. La figure 8.11 montre les résultats des mesures sous incidence normale (axe à 0°) des deux haut-parleurs non coïncidents, le haut-parleur passe-bas avec un décalage de 102 mm, et le haut-parleur passe-haut corrigé avec un retard de 295 μ s. Sur le

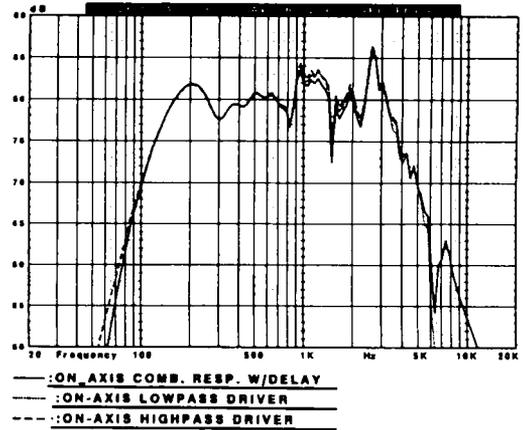


Figure 8.11

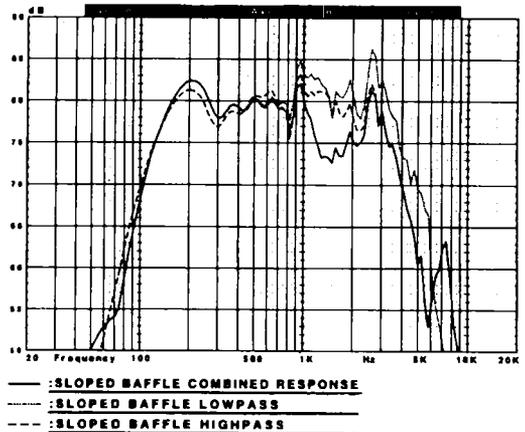


Figure 8.12

même graphe, sont comparées la courbe de réponse obtenue des deux haut-parleurs filtrés et la courbe de réponse de chaque haut-parleur non filtré, prise individuellement en position passe-haut et passe-bas. La courbe de réponse résultante de la somme de l'ensemble des deux haut-parleurs, muni d'une compensation par retard électronique, est pratiquement identique à la courbe de réponse de chaque haut-parleur mesuré seul.

La figure 8.12 montre la mesure obtenue pour le même ensemble de deux haut-parleurs,

sans retard électronique, et avec le même filtre actif d'ordre quatre, sous un angle de 20° par rapport à l'axe précédent. La courbe de l'ensemble des deux haut-parleurs filtrés est comparée à celles des haut-parleurs pris individuellement. Il est évident que les relations de phase ne sont pas exactement les mêmes à 20° de l'axe, comparées à celles sous incidence normale mais utilisant un décalage temporel pour compenser l'absence de décalage géométrique. De ce fait, ces deux méthodes de compensation des différences à l'origine des temps de propagation des haut-parleurs ne donneront pas des résultats équivalents.

L'inclinaison de l'axe de rayonnement et les décalages de phase qui en résultent pour des haut-parleurs non coïncidents, ne sont en général à considérer qu'à partir d'une fréquence de filtrage supérieure à 700 Hz. À des fréquences plus élevées, le décalage géométrique (en relation avec la dimension des haut-parleurs) provoquera un changement de phase, qui sera suffisamment élevé pour ne plus pouvoir être ignoré, au regard de la longueur d'onde de la fréquence de filtrage. Par exemple, un décalage de 51 mm à la fréquence de 500 Hz ne produira qu'une variation de phase de 7 %, chose négligeable. Par contre, à la fréquence de 3 kHz, le même décalage de 51 mm provoquera un changement de 44 % de la phase, ce qui porte à conséquence.

8.2.4 Réponse en puissance du filtre

La réponse en puissance d'une enceinte acoustique est approximativement la même que sa réponse hors de l'axe normal. Si, par hypothèse, vous ne tenez pas compte de la directivité de l'enceinte, pour ce cas de figure, la réponse en puissance pourrait être obtenue en intégrant une multitude de mesures hors axe, effectuées en champ libre. Si vous combinez absolument tous les points des mesures

hors axe, puis si vous en faites la moyenne, vous aurez calculé la réponse en puissance.

L'opinion conventionnelle veut que la réponse en puissance d'une enceinte multivoies, équipée d'un filtre, soit différente de sa réponse dans l'axe [4,6,15,17-19]. Ce qui signifie que toutes les sorties des filtres dans l'axe s'ajoutent, comme des quantités scalaires dont la phase est corrélée, tandis que la réponse en puissance hors axe est calculée comme une moyenne quadratique (quantité RMS), comme si la phase était non corrélée. Certes, il y a quelques différences quant à l'importance, si importance il y a, qu'on doit donner à la réponse en puissance entre les filtres pairs et les filtres impairs, toujours est-il que la méthodologie reste spécifique. La conséquence principale de cette idée de mesurer la réponse en puissance au niveau des fréquences de coupure du filtre a été la définition d'une nouvelle classe de filtres, nommée filtres CPC (*Constant Power Circuit*). Les filtres CPC sont, par exemple, les filtres de type Butterworth d'ordre pair, qui, comme mentionné auparavant, donnent +3 dB dans l'axe, si leurs sections passe-haut et passe-bas sont en phase. Si la réponse en puissance est la somme de signaux non corrélés, c'est-à-dire 3 dB de moins que si les signaux étaient corrélés, cela implique que la réponse en puissance d'un filtre d'ordre pair de type Butterworth est plate, vu que ses deux sections sont à -3 dB à la fréquence de coupure du filtre (-3 dB + 3 dB = 0 dB). Ceci implique également que les filtres du type Linkwitz-Riley d'ordre pair, dont la sommation est plate à la fréquence de coupure du filtre, quand les sections passe-haut et passe-bas sont chacune à -6 dB, n'aient pas une réponse en puissance plate, mais un trou de 3 dB. Les filtres d'ordre impair du type Butterworth, qui sont non corrélés en phase dans l'axe, correspondent bien à cette idée et sont donc également considérés comme des filtres CPC avec une réponse en puissance plate.

Il n'est pas bien vu d'aller à l'encontre des idées établies, dans quelque domaine que ce soit, mais cette manière d'expliquer la réponse en puissance est tout simplement incorrecte. La réalité est bien plus simple. Les sections des différents filtres, qu'elles soient passe-bas, passe-haut, en phase (ou en opposition de phase) s'additionnent comme des quantités scalaires, que ce soit dans l'axe normal ou hors de l'axe. Des sections passe-haut et passe-bas de filtres, qui sont en quadrature de phase, s'additionnent comme une quantité égale à la moyenne quadratique (RMS), que ce soit dans l'axe ou en dehors de l'axe. À mon avis, il est erroné de faire le calcul de la réponse en puissance d'un filtre en pensant que les signaux ne sont pas corrélés. Par exemple, si vous faites la somme des signaux de deux enceintes acoustiques, situées de part et d'autre de la scène d'une salle de spectacle, considérer que leur phase n'est pas corrélée dans le domaine de la puissance est non seulement justifié, mais même correct. Mais, si deux haut-parleurs, montés sur le même baffle, rayonnent pratiquement à partir du même plan et reçoivent le même signal d'entrée, alors il n'y a pas d'autre façon de considérer les deux signaux que comme étant corrélés en phase. Ces signaux sont corrélés en phase dans l'axe et dans le domaine de la puissance. Il n'y a aucune différence entre la réponse en puissance due à un filtre quel qu'il soit et la réponse dans l'axe. Il n'existe pas de catégories spéciales de filtres, comme les fil-

tres du type CPC, qui soient plus indiquées dans des situations où le champ réverbérant est dominant, que dans celles où c'est le champ direct qui prédomine.

8.3 Caractéristiques des filtres à deux voies

On distingue douze types différents de filtres à deux voies pour enceintes acoustiques : le filtre de type Butterworth d'ordre un et d'ordre deux, le filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre deux, le filtre de type Bessel d'ordre deux, le filtre de type Chebychev d'ordre deux, le filtre de type Butterworth d'ordre trois et quatre, le filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre quatre, le filtre de type Bessel d'ordre quatre, le filtre de type Legendre d'ordre quatre, le filtre de type Gauss d'ordre quatre et le filtre à phase linéaire d'ordre quatre. Chaque type de filtre diffère par ses réponses en amplitude, en phase et en retard de groupe, tout en réagissant, avec un niveau de sensibilité propre, à un décalage horizontal entre les deux haut-parleurs. Les descriptions suivantes du fonctionnement des différentes parties de ces filtres se font systématiquement pour une fréquence de 1 kHz. Les effets du décalage horizontal des haut-parleurs sont relevés à une distance de 25,4 mm (1") et de 50,8 mm (2"), ce qui correspond à des temps

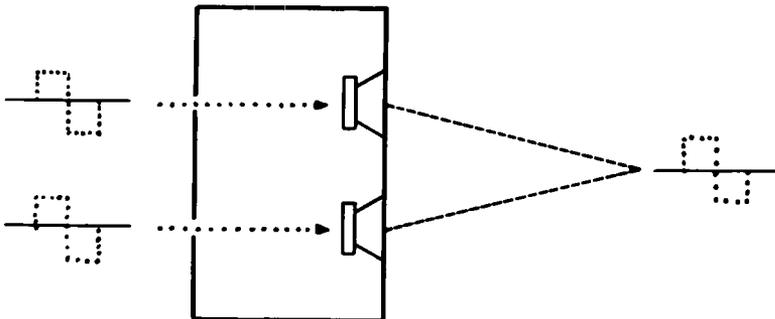


Figure 8.13 : Filtre de premier ordre à variation minimale de phase.

de propagation respectifs de 74 μ s et 147 μ s. Les résultats seraient exactement les mêmes à d'autres fréquences, si ce n'est que le décalage horizontal varierait proportionnellement. Le tableau ci-dessous montre la relation entre la fréquence et les différents décalages :

Fréquence	Décalage horizontal		
0,5 kHz	25,4 mm (1")	50,8 mm (2")	101,6 mm (4")
1 kHz	12,7 mm (0,5")	25,4 mm (1")	50,8 mm (2")
3 kHz	4,3 mm (0,17")	8,4 mm (0,33")	17 mm (0,67")
5 kHz	2,5 mm (0,1")	5,1 mm (0,2")	10,2 mm (0,4")

En d'autres mots, ce qui est vrai dans la description des caractères opérationnels du filtre à 1 kHz avec un décalage horizontal de 25,4 mm (1") entre les deux haut-parleurs, le sera également à 3 kHz avec un décalage de 8,4 mm (0,33") et à 5 kHz avec 5,1 mm (0,2") de décalage, etc...

1. Filtre de type Butterworth d'ordre un

Le filtre de type Butterworth du premier degré, le branchement étant fait en polarité normale, est du type passe-tout, et c'est le seul filtre connu dont la variation de la phase avec la fréquence soit minimale. Cela signifie que la somme des deux signaux de sortie du filtre a la même amplitude et la même phase que le signal d'entrée, et cela satisfait tous les critères pour un filtre à tension constante [20]. Lors de l'emploi de filtres de premier ordre, la somme des signaux issus des deux haut-parleurs ne présente aucune distorsion de phase, si la distance parcourue par l'onde provenant de chaque haut-parleur est identique (figure 8.13). Nous venons de décrire les conditions opérationnelles qui correspondent généralement à l'appellation : "à phase linéaire", ou "cohérent en phase". Comme le montre la figure 8.14, ce filtre donne, à la fréquence de coupure, un signal, résultant de la somme à -3 dB des sections passe-haut et passe-bas, qui est plat (dans le sens d'une courbe de réponse en fonction de la fréquence qui est plate en amplitude). Cette

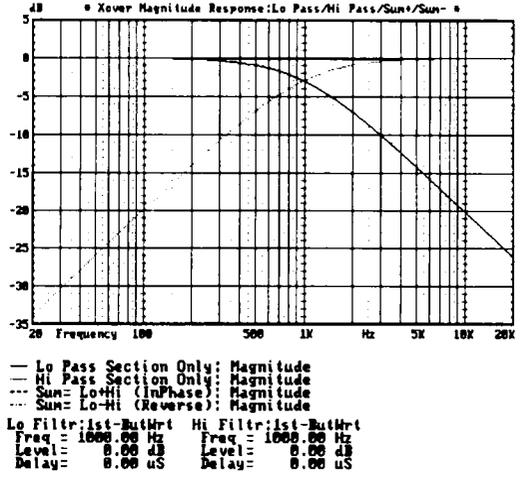


Figure 8.14

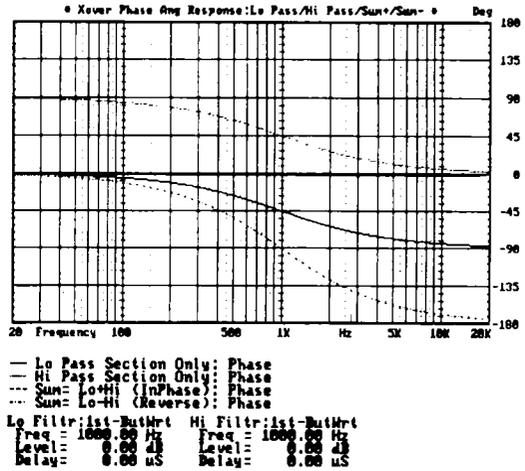


Figure 8.15

somme est plate quelle que soit la polarité du branchement. Dans la figure 8.15, la phase est décalée de 90° pour chaque section et, à la fréquence de sommation, l'amplitude est plate. À cause de la différence de phase de 90°, une inclinaison de -15° apparaît dans la réponse polaire verticale, si la distance qui sépare le haut-parleur passe-haut du haut-

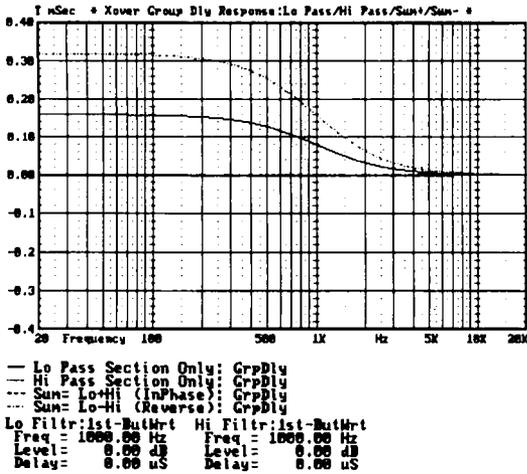


Figure 8.16

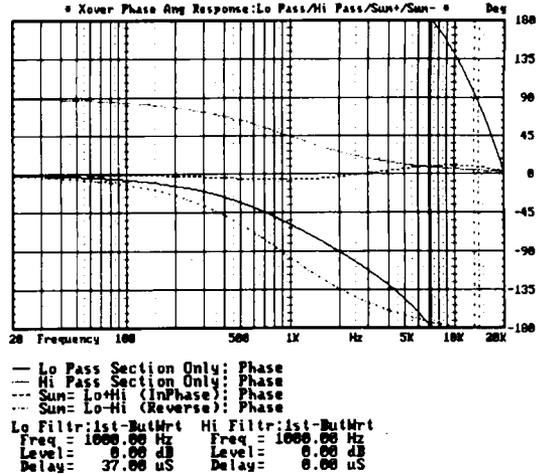


Figure 8.18

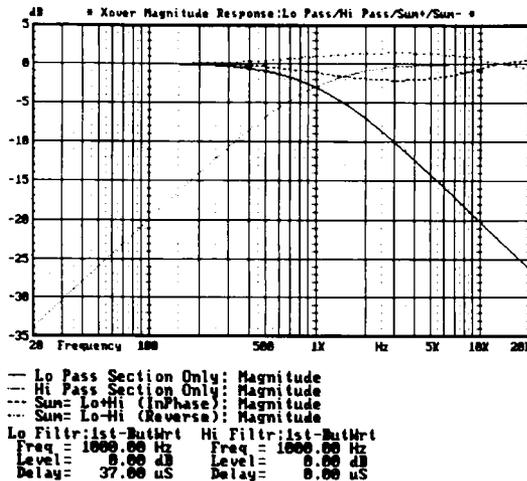


Figure 8.17

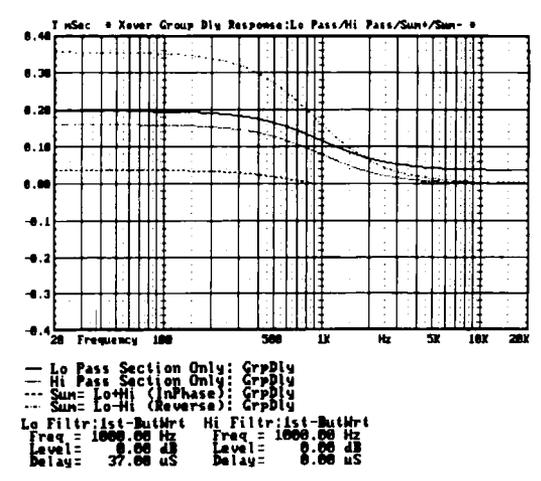


Figure 8.19

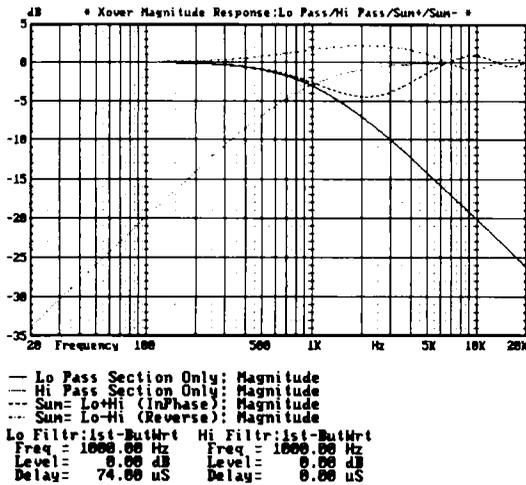


Figure 8.20

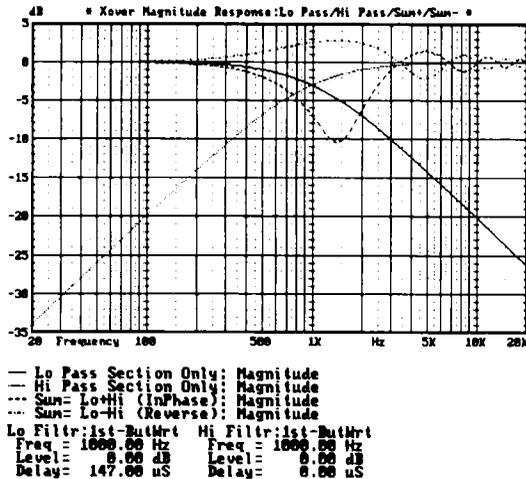


Figure 8.21

parleur passe-bas correspond à une longueur d'onde de la fréquence de coupure du filtre (+15° pour l'inversion de polarité). Cette configuration en polarité inversée est du type passe-tout en ce qui concerne la phase de la somme des deux signaux, mais n'est pas du type phase minimale comme c'est le cas pour la polarité normale. La figure 8.16 montre la courbe de retard de groupe, référencée à zéro, de la somme des deux signaux en sortie de filtre, le branchement étant en polarité normale, les sections passe-haut et passe-bas sont décalées de 0,16 µs. Le retard de groupe pour le branchement à polarité inversée n'est pas de zéro comme le branchement à polarité normale, mais d'environ 0,32 µs.

La caractéristique de variation minimale de phase du filtre de type Butterworth d'ordre un n'existe que dans une zone étroite, qui exige un alignement précis des haut-parleurs. Les courbes de réponse en amplitude, celles de phase et celles de retard de groupe des figures 8.17 à 8.19, correspondent à un décalage de 12,7 mm (0,5"). Les courbes de retard de groupe et celles de phase ne sont plus du type à phase minimale et la courbe de niveau accuse une large dépression de presque 2,5 dB. Les figures 8.20 et 8.21, qui correspondent à des décalages de 2,54 mm (1") et 50,8 mm (2"), montrent des dépressions de plus de 10 dB dans la courbe de réponse en fréquence, réparties sur plus de six octaves. Il est évident que le filtre de type Butterworth d'ordre un est très sensible à l'alignement des deux haut-parleurs.

Le filtre de type Butterworth d'ordre un est aussi très sensible aux résonances des haut-parleurs, dans la mesure où ces résonances sont situées dans la zone de recouvrement en fréquence du filtre [5]. Ce défaut, tout comme l'atténuation généralement insuffisante du filtre pour éviter la distorsion du haut-parleur, et la directivité qui, en fonction de la fréquence, accuse des lobes, fait que ce filtre, à l'évidence, est un choix sans grand intérêt pour les enceintes acoustiques. Cependant, ce

type de filtre a été populaire au point de devenir l'objet d'un véritable culte dans certains cercles "d'audiophiles". Cette préférence est loin de faire l'unanimité, et il n'est pas évident que la caractéristique de phase minimale soit effectivement supérieure à l'écoute ; le choix de ce type de filtre ne pourra donc être que subjectif. C'est ce que certains appellent "l'art de construire des enceintes acoustiques".

2. Filtre de type Butterworth d'ordre deux

Ce type de filtre, privilégié pendant un temps par les fabricants d'enceintes acoustiques, a été détrôné depuis par les filtres du type passe-tout. La réponse en amplitude du filtre, sa phase et son retard de groupe, sans décalage entre les deux haut-parleurs, sont illustrés dans les figures 8.22 à 8.24. Pour la configuration à polarité normale, le déphasage est de 180° et provoque un nul virtuel dans la courbe de réponse en amplitude, tandis que la configuration, branchée en polarité inversée, est en phase et la somme des signaux des filtres s'effectue avec une amplitude de +3 dB. La plupart des auteurs recommandent le branchement en polarité inversée, toutefois cela dépendra de l'alignement géométrique des haut-parleurs. Le coefficient de surtension du filtre est de 0,707 et la courbe de retard de groupe accuse une petite montée, juste en dessous de la fréquence de coupure du filtre (le retard de groupe est identique pour la section passe-haut, passe-bas et le signal somme, peu importe la polarité du branchement).

Les filtres du second degré, sans exception, sont moins sensibles à l'alignement horizontal des haut-parleurs que les filtres du premier degré. Les figures 8.25 et 8.26 illustrent la différence dans la courbe de réponse entre la configuration avec un décalage de 25,4 mm (1") et celle avec un décalage de 50,8 mm (2"). Le décalage de 25,4 mm (1") ne produit pratiquement pas de changements, et celui de 50,8 mm (2") à peine plus. Si le décalage est égal à la moitié de la longueur d'onde de la

fréquence de coupure du filtre, qui est de 172,2 mm (6,78") à 1 kHz, la phase est inversée, et le branchement en polarité normale se met en phase au lieu de produire un "trou" en niveau (c'est la polarité inverse qui produirait maintenant un "trou" en niveau).

Comme observé auparavant, les filtres de type Butterworth d'ordre pair somment, d'une manière presque plate, leurs sections passe-bas et passe-haut, si celles-ci sont à -6 dB. La figure 8.27 montre la modification apportée par la multiplication de la fréquence de coupure de la section passe-haut du filtre par un facteur de 1,3 et par un facteur de 0,7692 ($1,3^{-1}$) pour la fréquence de coupure de la section passe-bas : nous obtenons une courbe de réponse pratiquement plate (sans décalage horizontal des haut-parleurs).

Une autre observation importante, c'est que les altérations de la réponse en fréquence, qui proviennent du décalage horizontal des haut-parleurs, peuvent être corrigées dans une certaine mesure en modifiant, de la même manière que ci-dessus, les fréquences de coupure des éléments passe-haut et passe-bas, afin que la sommation des deux sections du filtre de type Butterworth soit plate. La figure 8.28 montre, sur un décalage de 50,8 mm (2") analysé en figure 8.26, l'effet d'une correction par glissement de la fréquence de coupure, multipliée par un facteur de 1,1, afin d'obtenir une réponse plus plate. Même si l'utilisation de cette technique ne donnera jamais une courbe de réponse absolument plate, c'est l'une des méthodes qui permet de compenser les perturbations en niveau, provoquées par le décalage des haut-parleurs, sans avoir à mettre en œuvre un décalage géométrique ou temporel (électronique).

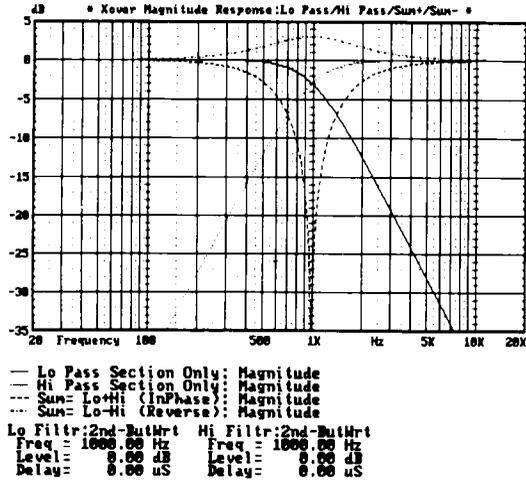


Figure 8.22

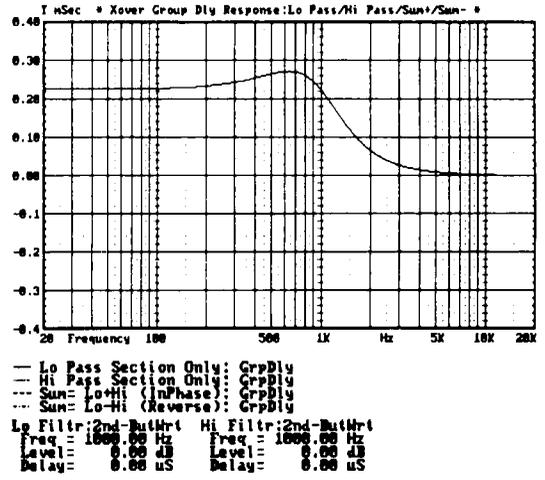


Figure 8.24

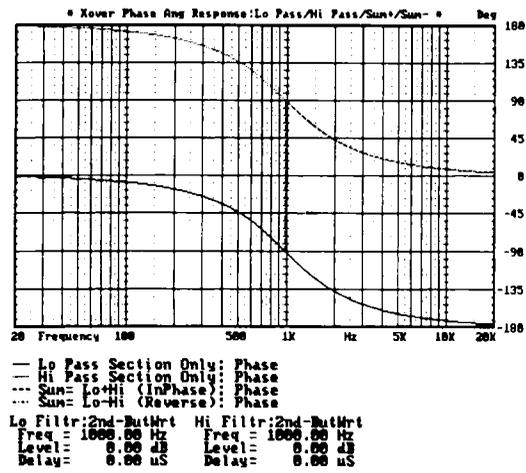


Figure 8.23

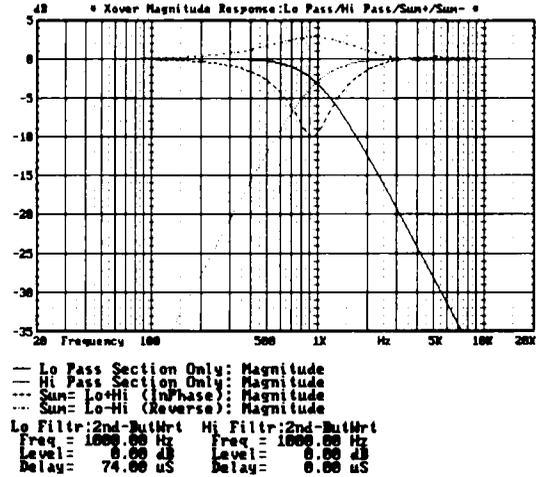


Figure 8.25

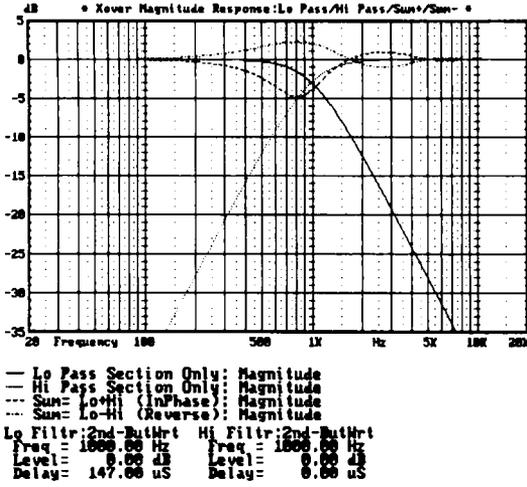


Figure 8.26

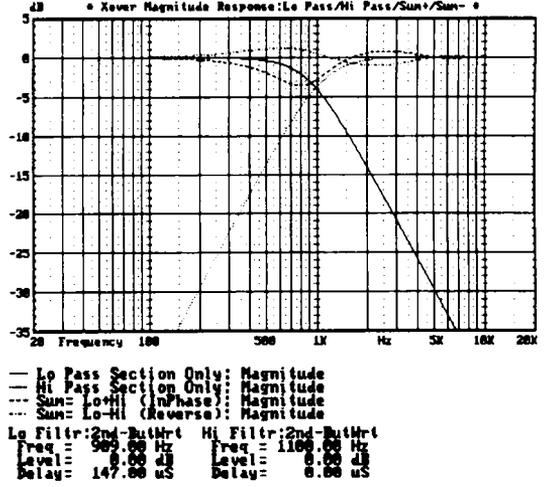


Figure 8.28

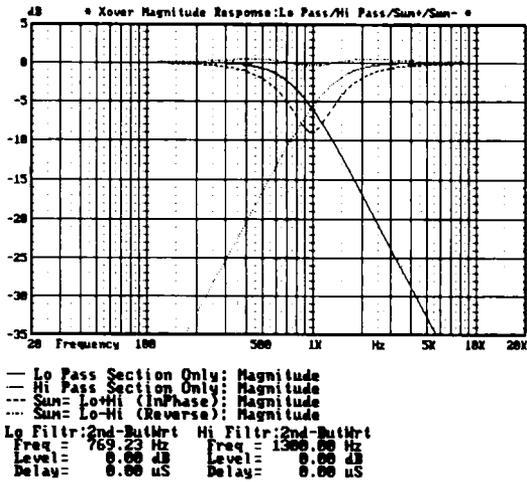


Figure 8.27

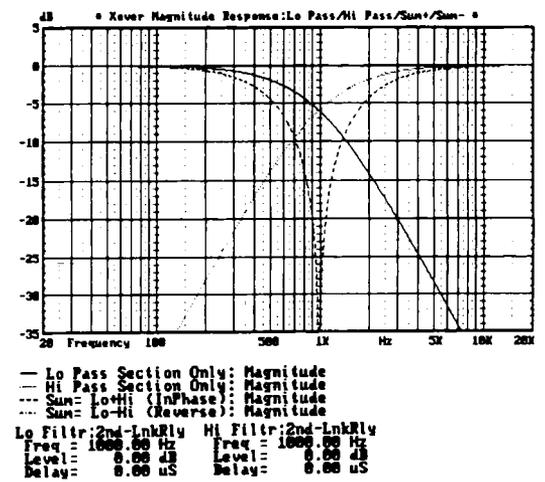


Figure 8.29

3. Filtre de type Linkwitz-Riley de second ordre

Le filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre deux est un filtre passe-tout dont la sommation est plate, si ses deux sections passe-haut et passe-bas ont un niveau de -6 dB à la fréquence de coupure. La réponse en fonction de la fréquence, du niveau, de la phase et du retard de groupe est présentée dans les figures 8.29 à 8.31 (sans décalage). Les relations entre la phase et la polarité du branchement sont les mêmes pour tous les types de filtre du second degré, ainsi, ce qui est vrai pour le filtre de type Butterworth d'ordre deux l'est également pour le filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre deux. Le coefficient de surtension Q du filtre de Linkwitz-Riley est de 0,49 (c'est le carré du coefficient Q du filtre de type Butterworth) et la courbe de retard de groupe, qui démarre à 0,32 ms, reste régulière (le retard de groupe est le même pour le signal de l'élément passe-haut, passe-bas et pour la somme, et ce, quelle que soit la polarité).

La sensibilité au décalage des haut-parleurs est identique pour tous les filtres du second degré. Les figures 8.32 et 8.33 montrent les changements dans la courbe de réponse provoqués par des décalages de 25,4 mm (1") et de 50,8 mm (2"). La réponse en niveau plate, la faible sensibilité au décalage entre les haut-parleurs, ainsi que la faible sensibilité aux résonances des haut-parleurs présente dans les pentes d'atténuation des filtres, font du filtre de type Linkwitz-Riley l'un des plus utilisés par les fabricants d'enceintes acoustiques.

4. Filtre de type Bessel du second ordre

Le filtre de type Bessel de second degré est similaire à celui du type Linkwitz-Riley, si ce n'est que son coefficient de surtension Q est légèrement supérieur à 0,58, et que le signal de sommation n'est pas plat en niveau, aussi ne s'agit-il pas d'un filtre passe-tout. Les courbes de réponse en niveau, celles de phase et celles de retard de groupe (sans décalage) seront consultées dans les figures 8.34 à 8.36. La réponse en niveau affiche $+1$ dB pour la

configuration en polarité inverse. La phase est la même que pour les autres filtres du second degré. La courbe de retard de groupe de la sommation est plate, comme celle du filtre du type Linkwitz-Riley, mais avec une amplitude un peu plus faible.

Comme on le constate dans la figure 8.37 pour une distance de 25,4 mm (1") et dans la figure 8.38 pour la distance de 50,8 mm (2"), la sensibilité au décalage des haut-parleurs est la même que pour les autres filtres du second degré. Ce filtre a une sommation qui sera plate, si la fréquence de coupure des sections passe-haut et passe-bas du filtre est décalée par un facteur multiplicatif de 1,1, voir figure 8.39. Après cette correction, on obtient une courbe de réponse en niveau qui est plate, mais la courbe de retard de groupe associée n'est pas meilleure que celle obtenue avec un filtre du type Linkwitz-Riley.

5. Filtre de type Chebychev du second ordre

Le filtre de type Chebychev d'ordre deux n'est pas utilisé très souvent, à moins que son coefficient de surtension, qui, dans notre exemple, est égal à 1, ne serve à compenser un autre coefficient Q de faible valeur provenant d'un haut-parleur, afin que l'ensemble corresponde à l'objectif fixé initialement. Les figures 8.40 à 8.42 illustrent les courbes de réponse en niveau, les courbes de phase ainsi que celles de retard de groupe (sans décalage). La réponse en niveau culmine à $+6$ dB et la courbe de retard de groupe de la somme fait un "coude" prononcé, ce qui indique un faible amortissement. La sensibilité au décalage est typiquement celle des filtres du second degré, elle ne sera pas étudiée ici. En effectuant, par un facteur multiplicatif de 1,5, un glissement des fréquences de coupure des sections passe-haut et passe-bas du filtre, la linéarité en niveau de la sommation tient dans un canal de ± 2 dB, voir figure 8.43 (sans décalage).

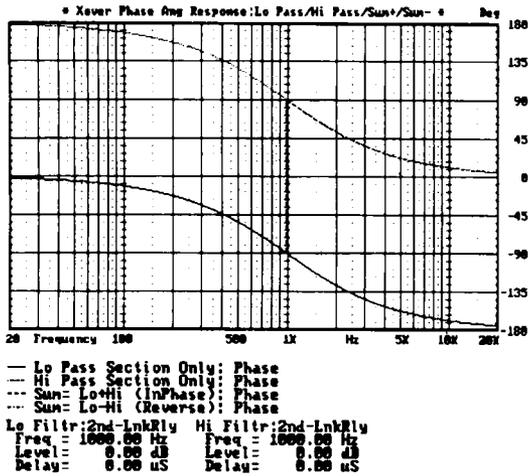


Figure 8.30

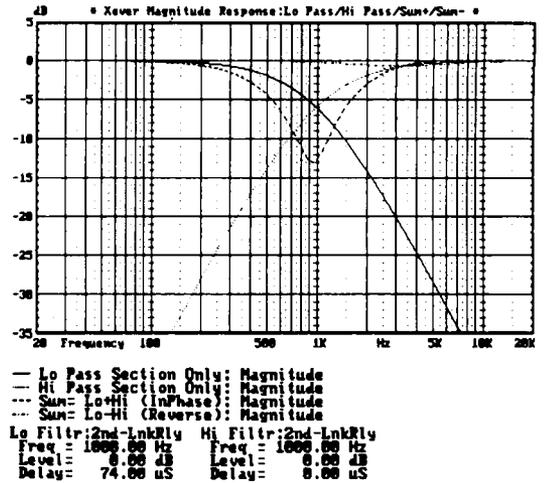


Figure 8.32

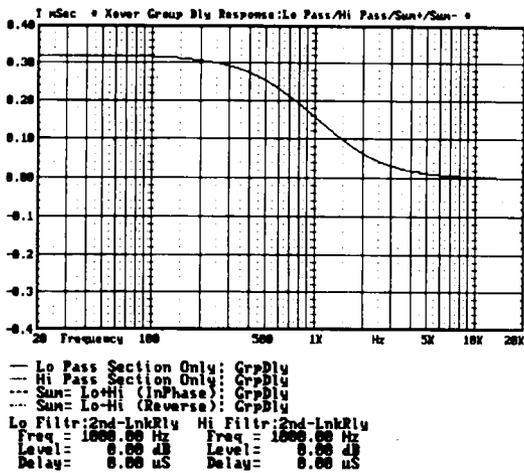


Figure 8.31

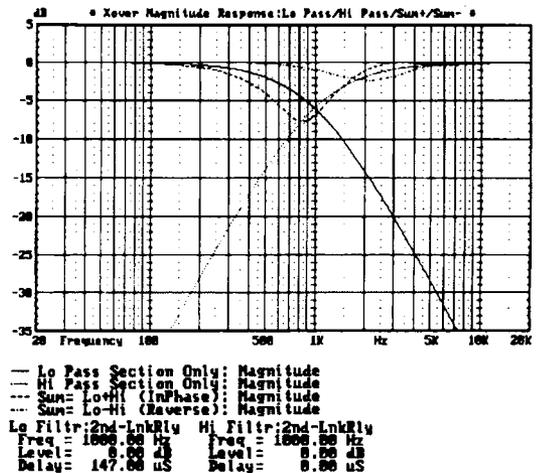


Figure 8.33

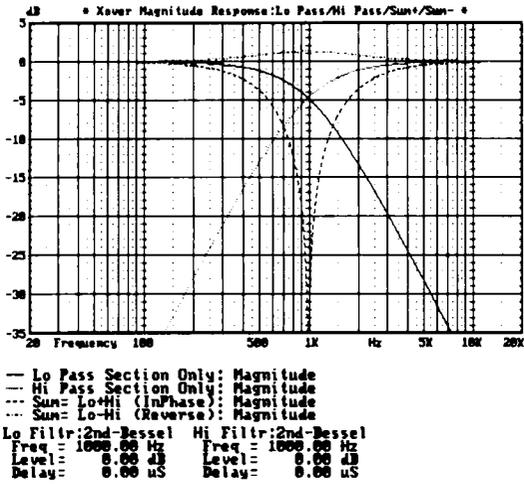


Figure 8.34

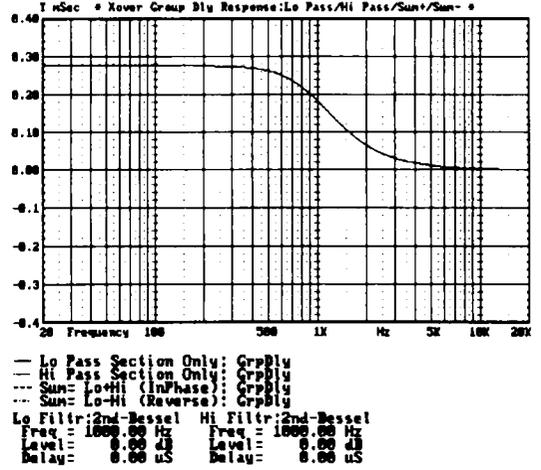


Figure 8.36

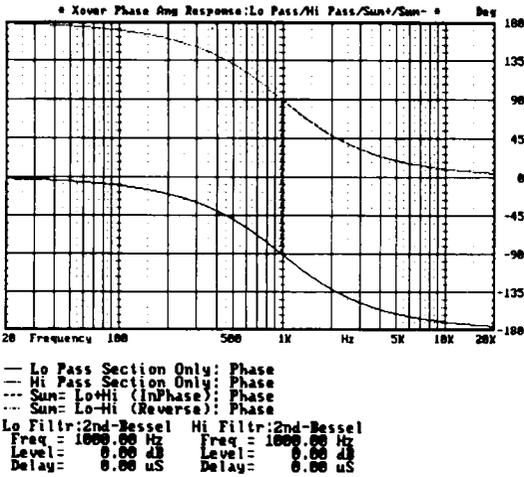


Figure 8.35

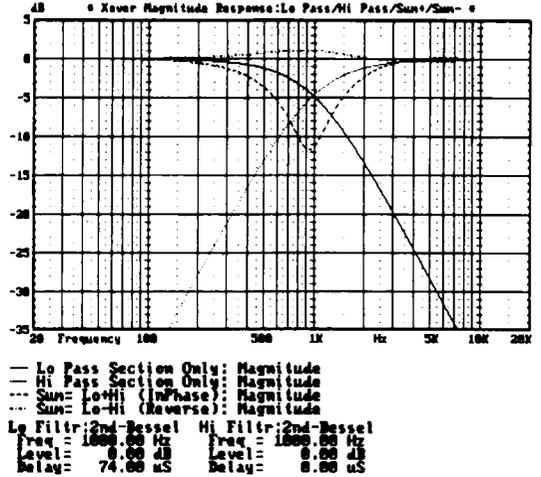


Figure 8.37

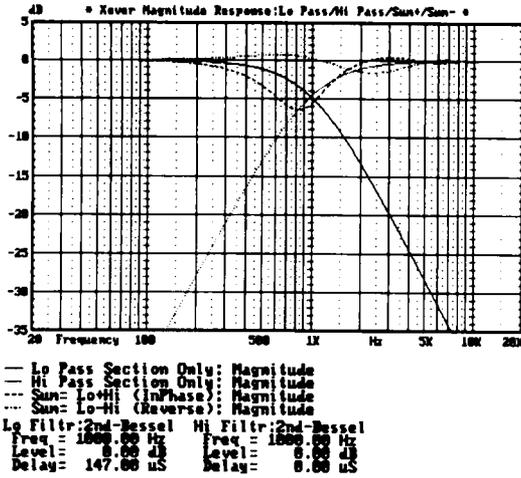


Figure 8.38

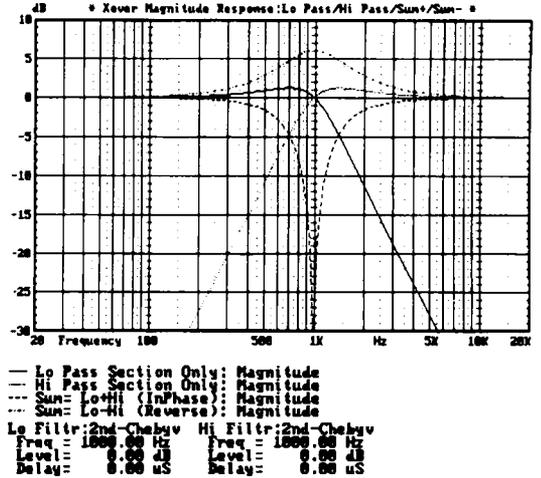


Figure 8.40

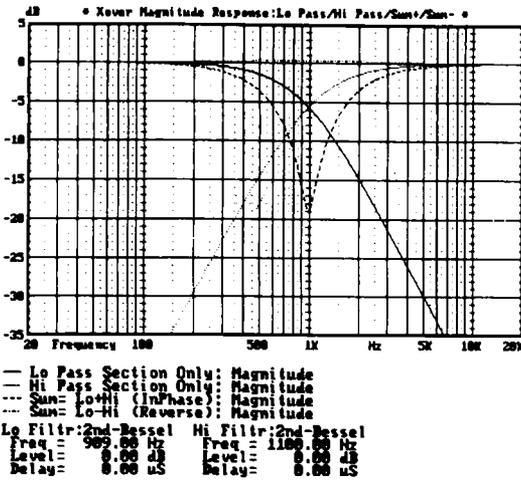


Figure 8.39

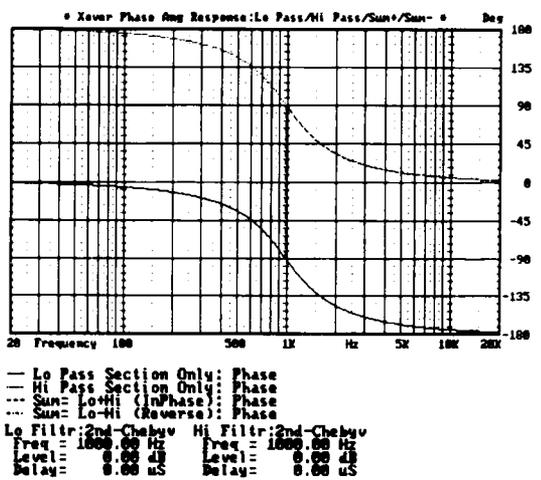


Figure 8.41

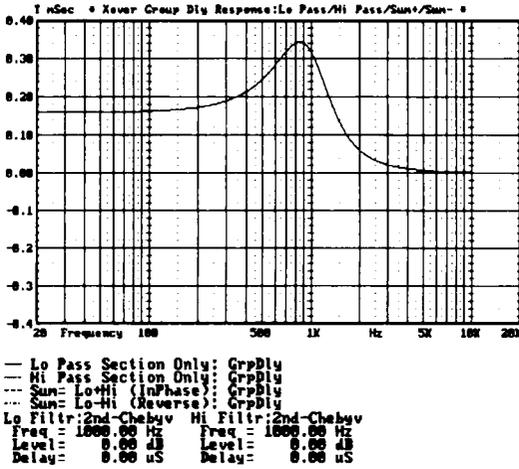


Figure 8.42

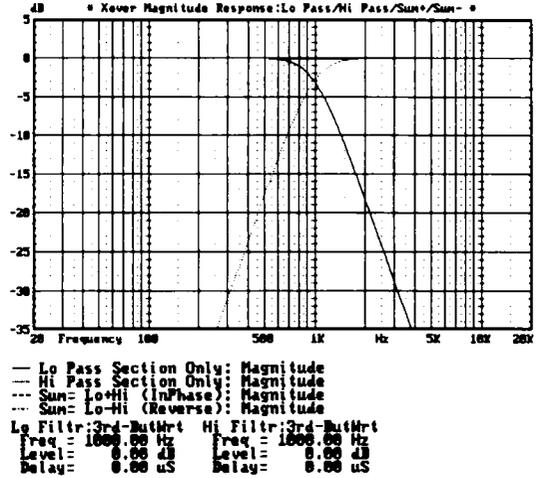


Figure 8.44

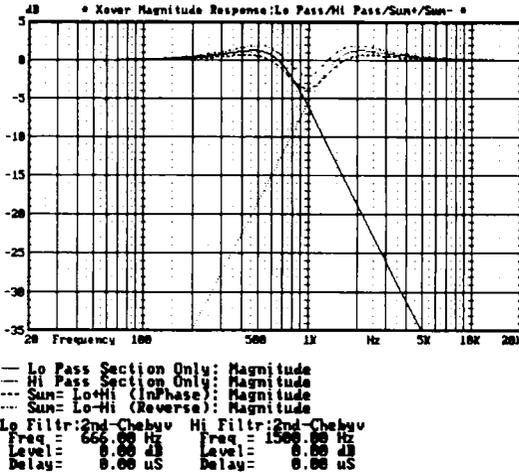


Figure 8.43

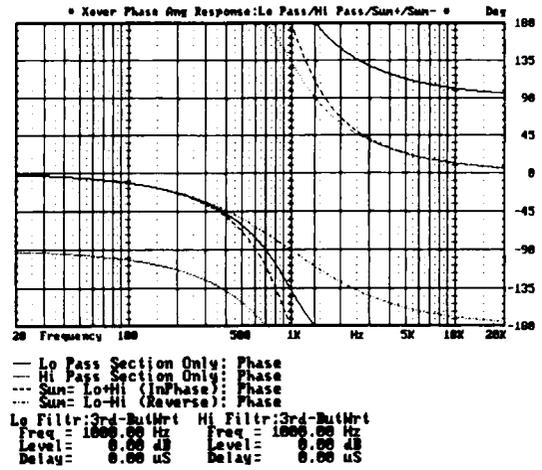


Figure 8.45

6. Filtre de type Butterworth d'ordre trois

Comme le filtre de type Butterworth d'ordre un, celui d'ordre trois a une sommation qui est plate, quand chaque section est à -3 dB à la fréquence de coupure du filtre, c'est un filtre passe-tout. Pour observer les courbes de réponse en niveau, en phase et du retard de groupe, se reporter aux figures 8.44 à 8.46 (sans décalage). La réponse en niveau est plate, quelle que soit la polarité de branchement ; cependant, pour la configuration à polarité inversée, la courbe de retard de groupe du signal somme est plate, mais avec une amplitude relativement faible, et présente un "coude" d'amplitude plus prononcé, quand la polarité est normale. La configuration à polarité inversée est généralement préférée, car son retard de groupe est meilleur. Comme sa version du premier degré, le filtre de type Butterworth d'ordre trois provoque une inclinaison d'axe de $+15^\circ$, comme l'indique le diagramme polaire dans le plan vertical, et qui provient de la différence de phase de 90° entre les sections passe-haut et passe-bas. L'inclinaison est de $+15^\circ$ pour la polarité de branchement normale et -15° pour la polarité inversée.

Les filtres du type Butterworth d'ordre trois sont peu sensibles au décalage des haut-parleurs, comme on le constate dans la figure 8.47 pour le décalage de 25,4 mm (1") et dans la figure 8.48 pour le décalage de 50,8 mm (2"). L'effet du glissement de la fréquence de coupure, obtenu en multipliant cette fréquence par 1,2, avec un décalage entre les haut-parleurs de 50,8 mm (2"), est montré en figure 8.49. La courbe de réponse est largement nivelée et devient pratiquement plate.

Le filtre du type Butterworth de troisième ordre a gagné en popularité depuis son utilisation par Joe D'Appolito dans un montage de haut-parleurs à configuration M-T-M (*medium-tweeter-medium* pour médium-aigus-médium). La combinaison de filtres du troisième ordre, avec une disposition géomé-

trique adéquate des haut-parleurs, aboutit à une assez belle réponse polaire dans l'axe vertical, exempte de directivité trop marquée, cf. figure 8.50. L'idée de départ était de supprimer les lobes produits par les filtres d'ordre pair, quand les haut-parleurs n'étaient pas coïncidents. Toutefois ces lobes sont difficilement décelables à l'écoute, et, dans les versions ultérieures de la configuration de Joe D'Appolito, la position des haut-parleurs ne fut pas modifiée, mais on fit appel à des filtres du type Linkwitz-Riley, dont les pentes d'atténuation, haut-parleurs en fonction, atteignirent 24 dB SPL/octave à la mesure [22]. La forte pente d'atténuation, conjuguée au décalage horizontal des haut-parleurs dans la configuration M-T-M, a ses avantages : entre autres, elle évite l'habituelle rotation de l'axe de référence. Dans ce cas, les haut-parleurs n'ont pas besoin de décalage nul pour garantir une réponse polaire qui conserve l'axe de référence à 0° , et une courbe de réponse en niveau plate peut être obtenue par le choix judicieux de la fréquence de filtrage. Dans la recherche d'une reproduction sonore de haute qualité, le décalage horizontal des haut-parleurs est moins important qu'une courbe de réponse plate et une absence de directivité marquée dans la réponse polaire. Au mieux, le décalage des haut-parleurs pour compenser la différence des temps de propagation facilitera la prévision des réponses polaires et quelque peu l'obtention d'une courbe de réponse plate. Le principal avantage de la configuration M-T-M est de rendre le concepteur maître des caractéristiques relevant des réponses polaires dans le plan vertical.

7. Filtre de type Butterworth d'ordre quatre

Pour obtenir un filtre de type Butterworth d'ordre quatre, nous avons simplement fait suivre deux filtres d'ordre deux. Comme les coefficients de surtension des sections d'ordre deux du filtre de type Butterworth d'ordre quatre sont respectivement de 1,307 et 0,541, le coefficient Q total sera de 0,707. Les figures 8.51 à 8.53 décrivent, pour un filtre de

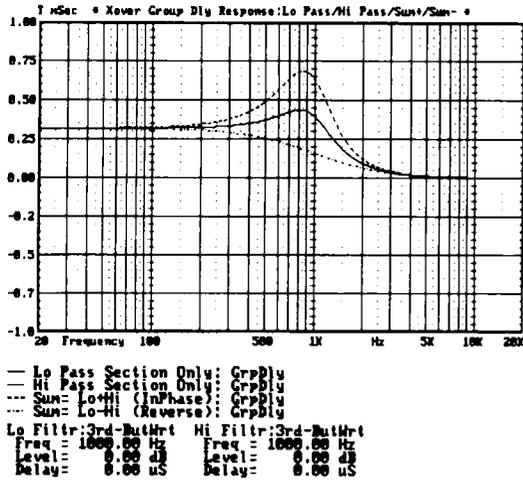


Figure 8.46

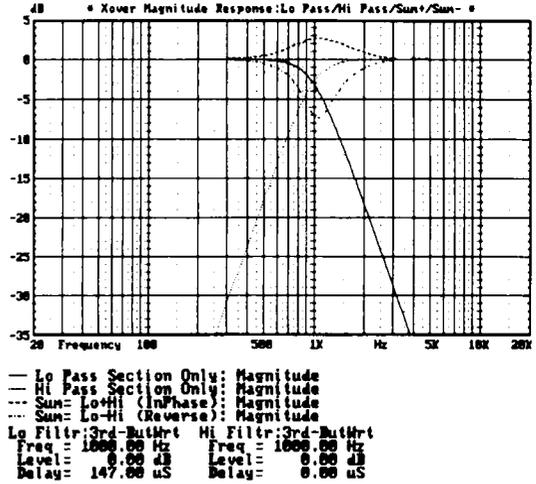


Figure 8.48

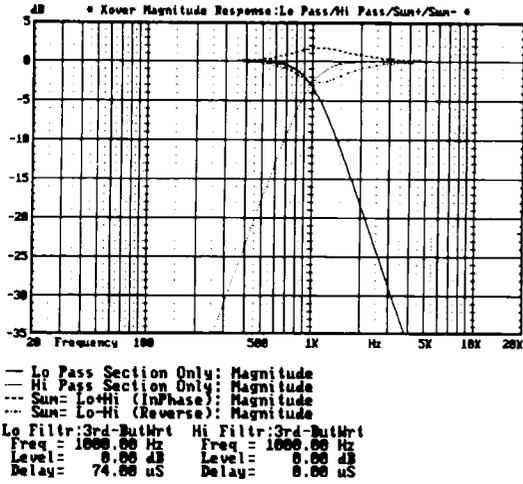


Figure 8.47

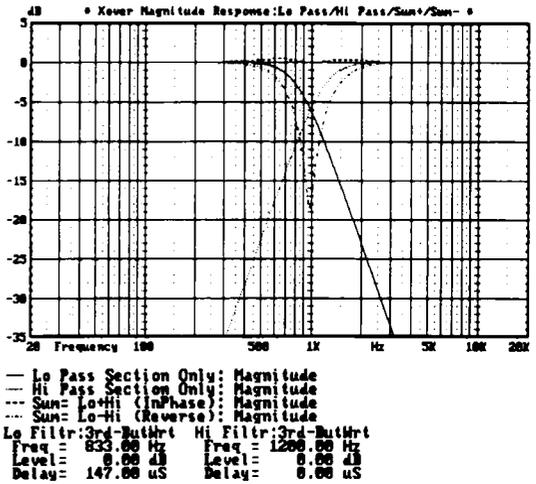


Figure 8.49

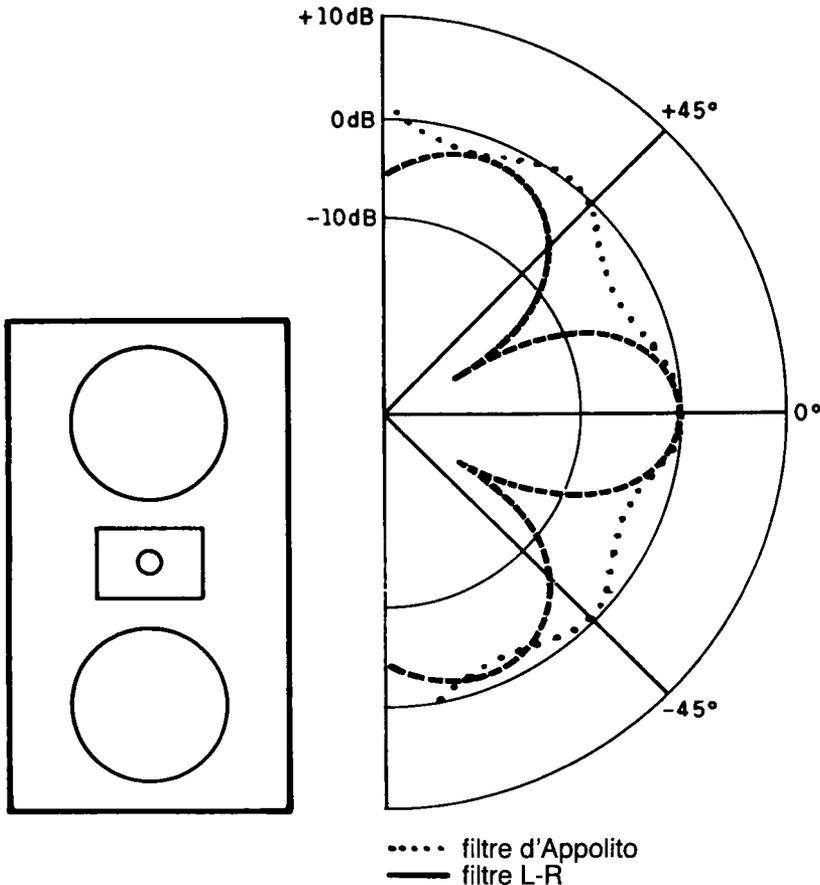


Figure 8.50 : Directivité verticale symétrique pour deux filtres différents.

type Butterworth d'ordre quatre, les courbes de réponse, en niveau, de phase et de retard de groupe en fonction de la fréquence (sans décalage). Comme pour la version d'ordre deux, quand la phase est coincidente, la somme des deux sections à -3 dB provoque une bosse de $+3$ dB à la fréquence de coupure du filtre, mais cette fois-ci avec un branchement en polarité normale (et pas inversée comme pour la version d'ordre deux). Pour les filtres du quatrième ordre, l'annulation par différence de phase s'effectue quand le branchement est en opposition de phase. La courbe de retard de groupe du signal somme

du filtre accuse un "coude" ou un "pic" juste en dessous de la fréquence de filtrage. Les filtres d'ordre quatre ont en gros les mêmes caractéristiques que ceux d'ordre deux, sauf l'atténuation bien plus importante qui diminue la distorsion des haut-parleurs. De même, la zone de recouvrement en fréquence étant plus faible, les interférences dues aux combinaisons des émissions des différents haut-parleurs seront moins prononcées. Le seul inconvénient est la perte de rendement éventuelle due à la résistance des deux selfs présentes dans chaque section du filtre (résistance mesurée en courant continu).

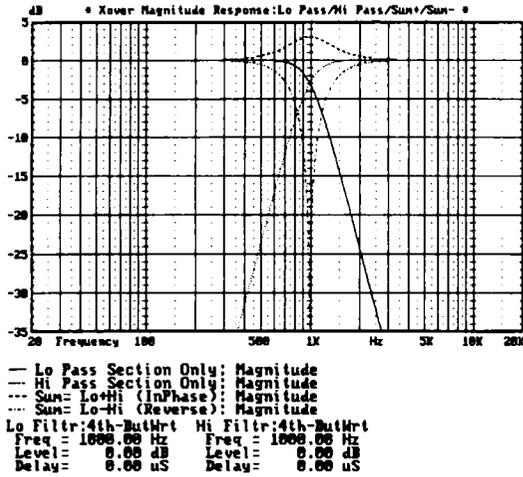


Figure 8.51

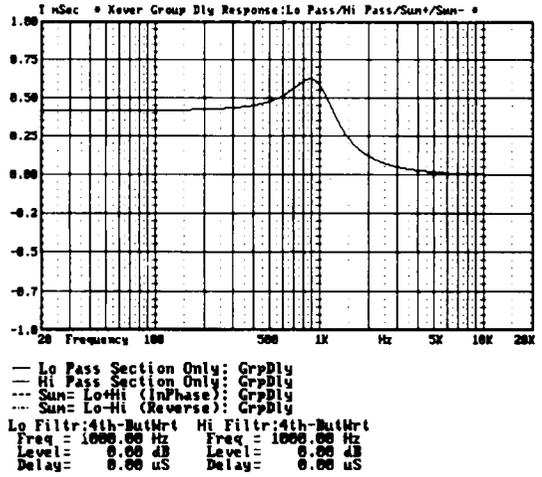


Figure 8.53

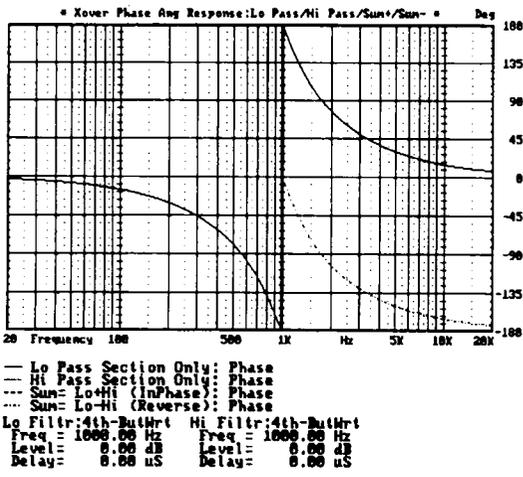


Figure 8.52

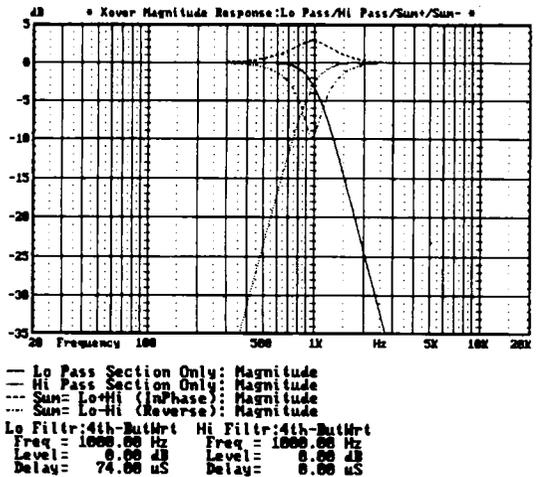


Figure 8.54

À cause de l'étroitesse de leur zone de recouvrement, les filtres d'ordre quatre sont moins sensibles au décalage des haut-parleurs que les filtres d'ordre deux. Les figures 8.54 et 8.55 illustrent, pour un décalage de 25,4 mm (1") et 50,8 mm (2"), les altérations de la courbe de réponse, qui sont très faibles dans les deux cas. Le filtre de type Butterworth d'ordre quatre aura une somme pratiquement plate, si ses sections passe-haut et passe-bas se recoupent à -6 dB. Cette condition se réalise lorsque l'on décale la fréquence de filtrage de chaque section d'un facteur de 1,13, comme illustré en figure 8.56. En tenant compte du décalage géométrique des haut-parleurs, on peut ajuster le décalage des fréquences de filtrage jusqu'à obtenir une courbe de réponse plate. La figure 8.57 montre le cas d'un décalage de 50,8 mm (2") compensé par un glissement des fréquences de filtrage par un facteur de 1,05.

8. Filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre quatre

Le filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre quatre appartient à la catégorie des filtres passe-tout : la somme de ses signaux a une réponse plate. Chacune de ses sections d'ordre deux a un coefficient de surtension Q égal à 0,707, le coefficient global ayant une valeur de 0,49, c'est pourquoi ce filtre est parfois appelé Butterworth au carré. Les figures 8.58 à 8.60 montrent les courbes de réponse, en niveau, en phase et de retard de groupe pour ce type de filtre. La courbe de retard de groupe de la somme montre juste un petit pic sous la fréquence de coupure du filtre.

La sensibilité au décalage des haut-parleurs est faible comme pour les autres filtres d'ordre quatre. Les figures 8.61 et 8.62 montrent les variations de niveau dans la courbe de réponse pour un décalage de 25,4 mm (1") et de 50,8 mm (2"), dans les deux cas, ces variations sont minimales. Ce type de filtre, dont la courbe de réponse est plate, la pente d'atténuation forte et qui est peu sensible à un mauvais décalage, est certainement le meilleur filtre pour haut-parleur d'aigus.

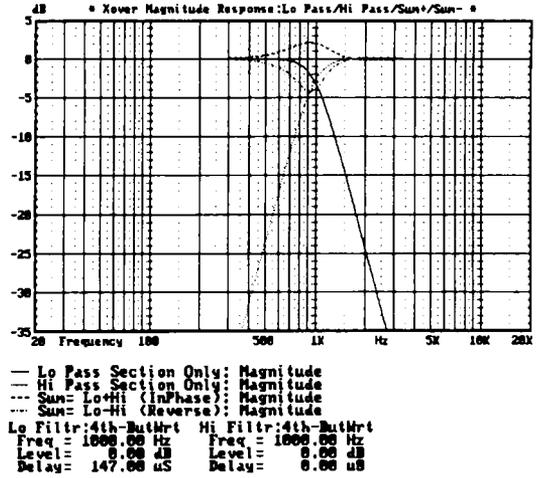


Figure 8.55

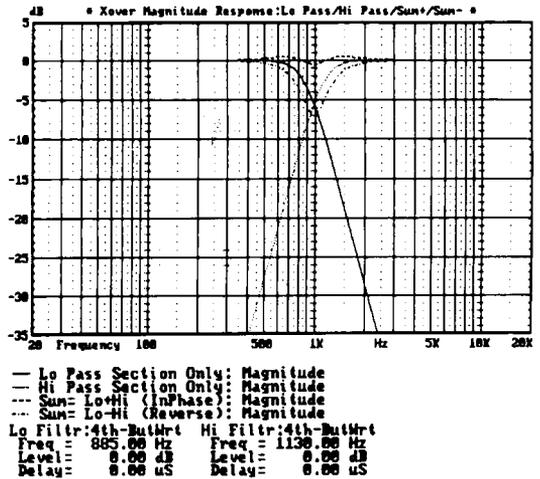


Figure 8.56

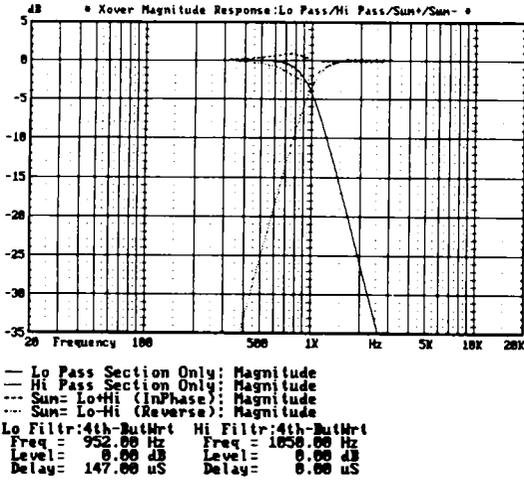


Figure 8.57

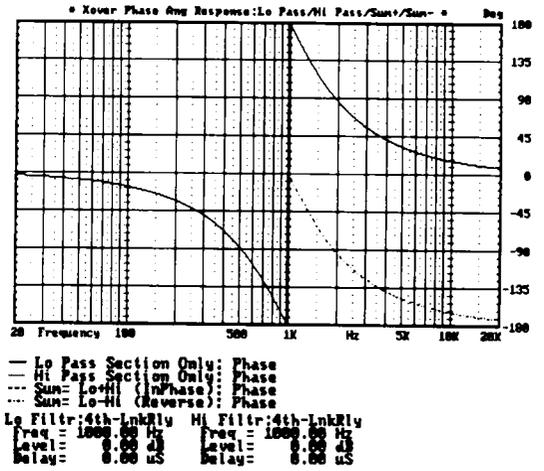


Figure 8.59

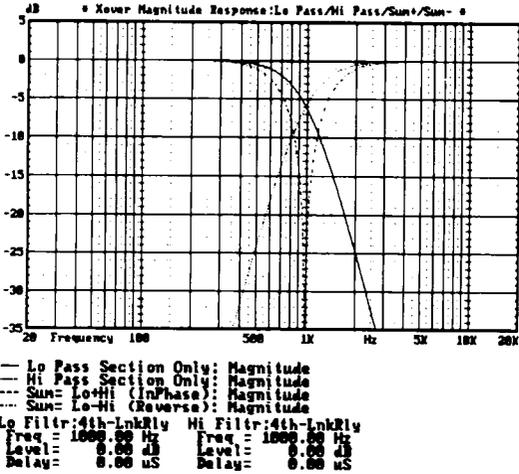


Figure 8.58

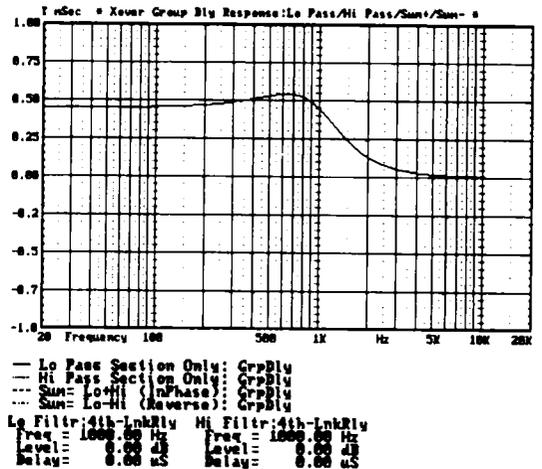


Figure 8.60

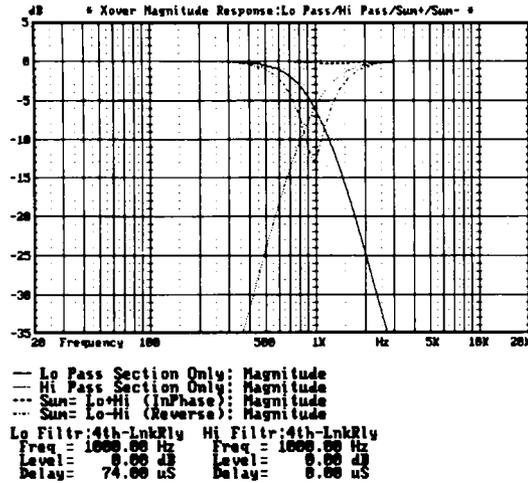


Figure 8.61

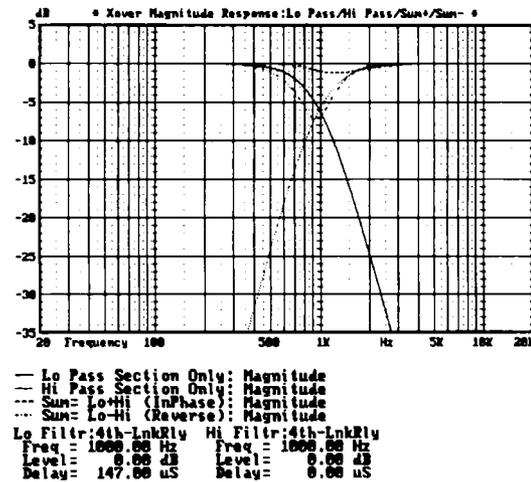


Figure 8.62

9. Filtre de type Bessel d'ordre quatre

À la fréquence de coupure, ce type de filtre n'a pas une somme qui donne une courbe de réponse plate, car ce n'est pas un filtre passe-tout. Les figures 8.63 à 8.65 montrent, dans le cas des haut-parleurs non décalés, les courbes de réponse, en niveau, en phase et de retard de groupe pour ce type de filtre. La courbe de niveau accuse une chute d'environ 1,5 dB à la fréquence de coupure pour le signal de somme, alors que sa courbe de retard de groupe est plate.

Comme le confirme la figure 8.66, le filtre de type Bessel d'ordre quatre peut être rendu quasiment plat pour le signal de somme si l'on modifie d'un facteur de 0,9 la fréquence de filtrage de la section passe-haut et passe-bas (ce qui revient à se faire chevaucher partiellement les zones de coupure du filtre). La courbe de retard de groupe du signal de somme de la figure 8.67 est en gros la même que celle du filtre de type Linkwitz-Riley d'ordre quatre.

La sensibilité au décalage horizontal des haut-parleurs est faible, comme on le constate dans la figure 8.68 pour une distance de 25,4 mm (1") et en figure 8.69 pour une distance de 50,8 mm (2").

Les trois prochains filtres d'ordre quatre sont une catégorie à part, celle des filtres asymétriques. Ils sont de construction asymétrique. Ils n'ont pas de "pôles circulaires" comme les filtres précédents (saufs ceux du type Chebyshev dont les pôles sont situés sur un plan elliptique), mais plutôt un plan "dérivé" qui facilite le calcul de leur dérivée. Les filtres d'ordre quatre du type Butterworth, Linkwitz-Riley et Bessel sont tous formés de deux sections qui ont le même coefficient Q et la même fréquence de coupure, puis associés en cascade. Ces trois filtres asymétriques d'ordre quatre ont des sections de second degré dont non seulement les coefficients Q mais aussi les fréquences de coupure ne sont

pas identiques. Ce qui explique pourquoi il n'y a pas de filtre de ce type du second degré.

Bien que certains aient montré quelque intérêt à vouloir utiliser ces filtres dans les enceintes acoustiques, je pense que ce type de filtre n'a aucun avantage, comparé à un filtre du type Linkwitz-Riley d'ordre quatre, mais au contraire, fait preuve d'une grande sensibilité aux variations des paramètres, ce qui est tout à son désavantage. En d'autres mots, ils ne sont intéressants ni pour les professionnels ni pour les amateurs. Je les ai inclus dans cet exposé, suite à l'intérêt exprimé par certains, et pour clarifier toute chose quant à leur fonctionnement.

10. Filtre de type Legendre d'ordre quatre

Ce type de filtre a une réponse proche de celui du type Chebychev. Reportez-vous aux figures 8.70 à 8.72 pour voir les courbes de réponse, en niveau, en phase et du retard de groupe. La nature asymétrique de ce type de filtre est évidente si l'on observe la courbe de phase, qui montre la partie de la section passe-bas déformée par celle de la section passe-haut. La courbe de retard de groupe du signal de somme est proche de celle d'un filtre de type Chebychev, et montre un "pic" conséquent. La courbe de niveau du signal de somme du filtre fait une bosse de +5 dB pour la configuration "en phase". Le filtre du type Legendre peut être linéarisé, quant à sa réponse en amplitude, si l'on décale les fréquences de filtrage des sections passe-haut et passe-bas en appliquant un facteur de 1,15, comme illustré dans la figure 8.73. La sensibilité au décalage des haut-parleurs est faible comme avec tous les filtres d'ordre quatre.

11. Filtre de type Gaussien d'ordre quatre

Pour les filtres de type Gaussien d'ordre quatre, les courbes de réponse, en niveau, en phase et de retard de groupe pour la somme des signaux sont représentées dans les figures 8.74 à 8.76 (sans décalage). La courbe de niveau du signal de somme est pratiquement plate à la fréquence de coupure pour un

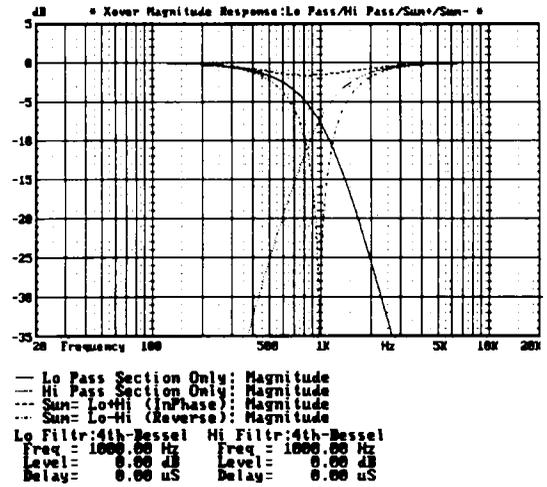


Figure 8.63

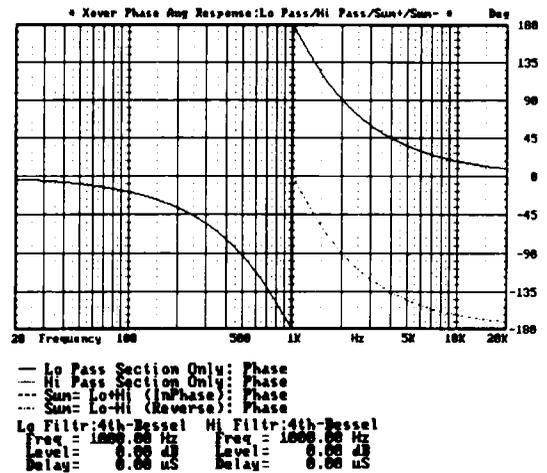


Figure 8.64

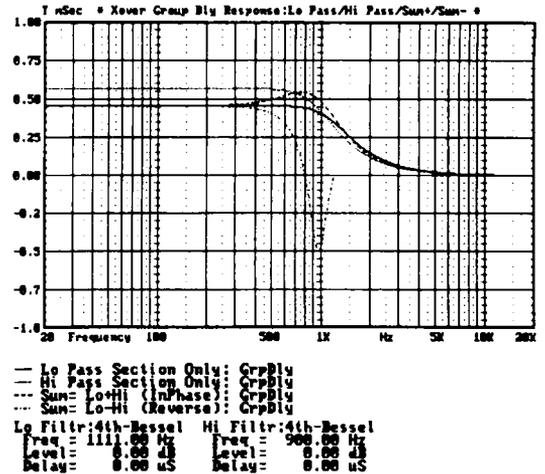
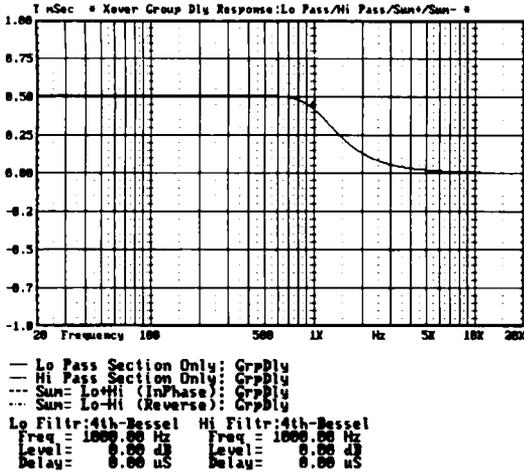


Figure 8.65

Figure 8.67

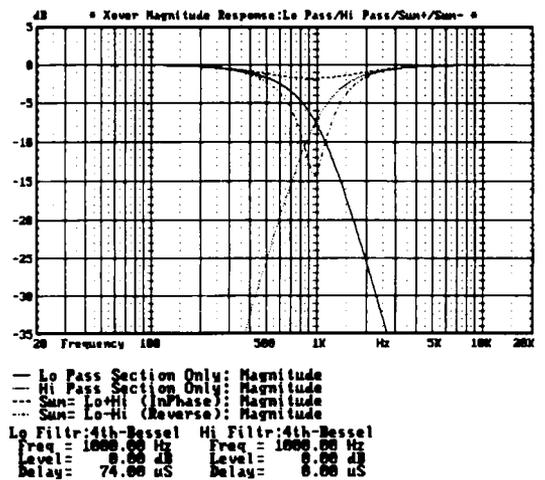
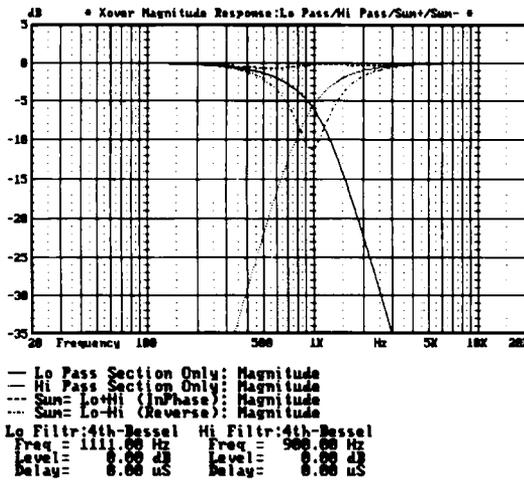


Figure 8.66

Figure 8.68

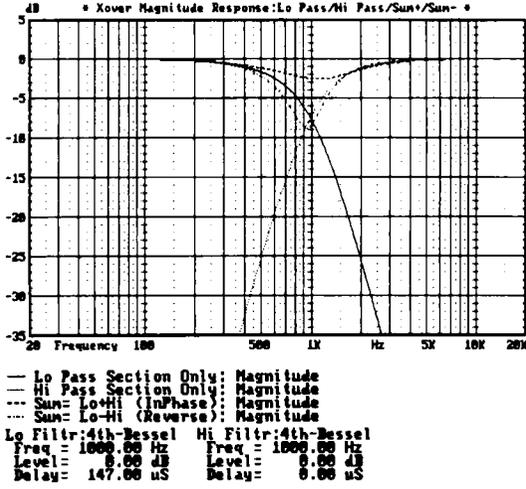


Figure 8.69

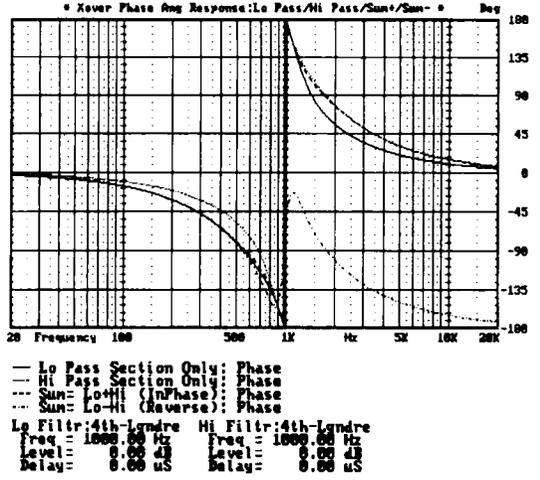


Figure 8.71

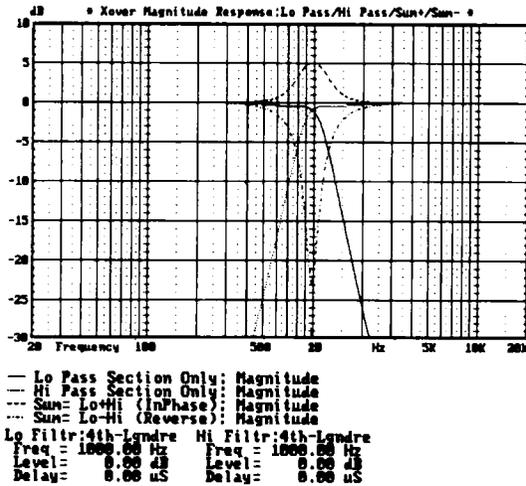


Figure 8.70

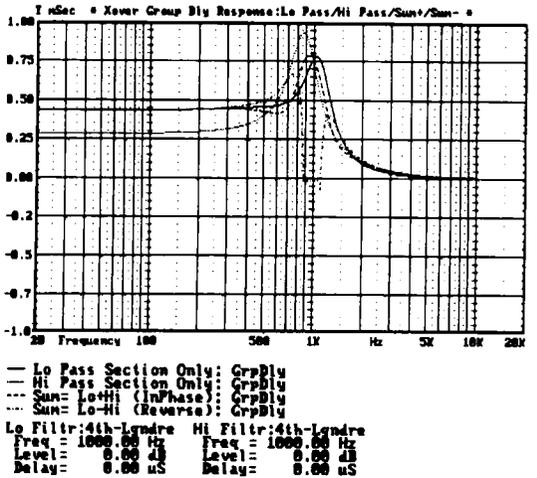


Figure 8.72

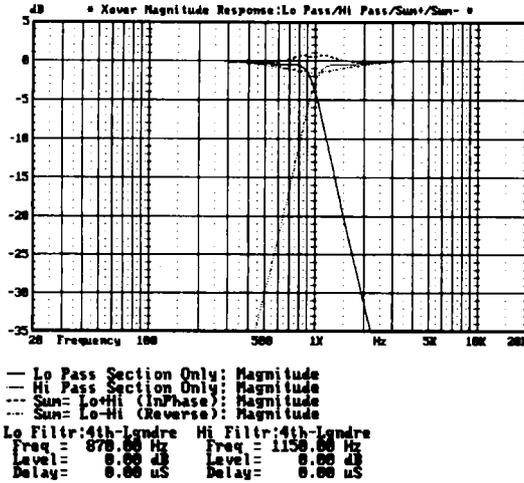


Figure 8.73

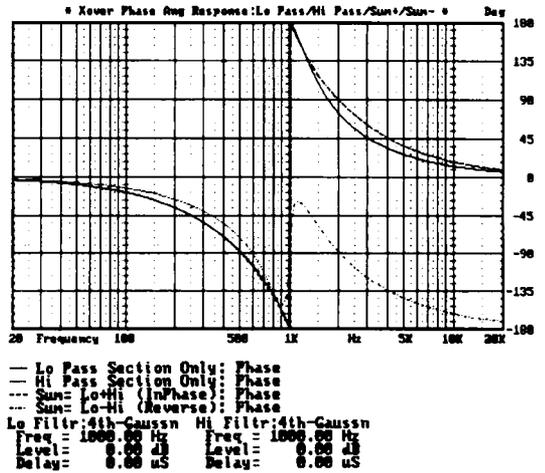


Figure 8.75

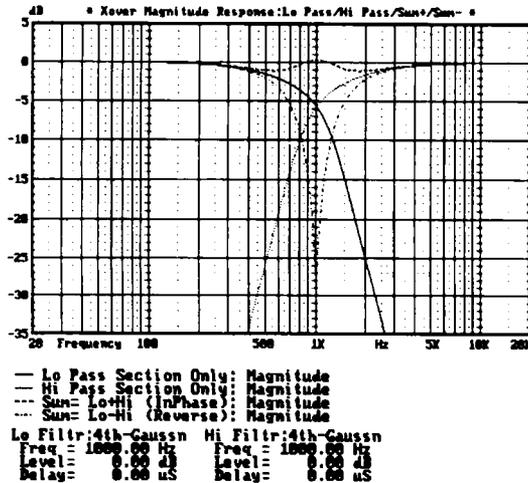


Figure 8.74

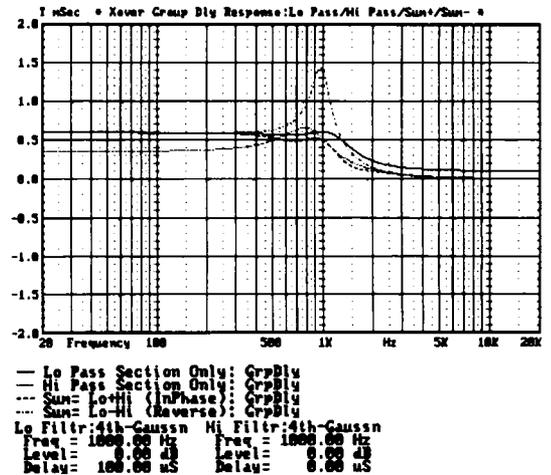


Figure 8.76

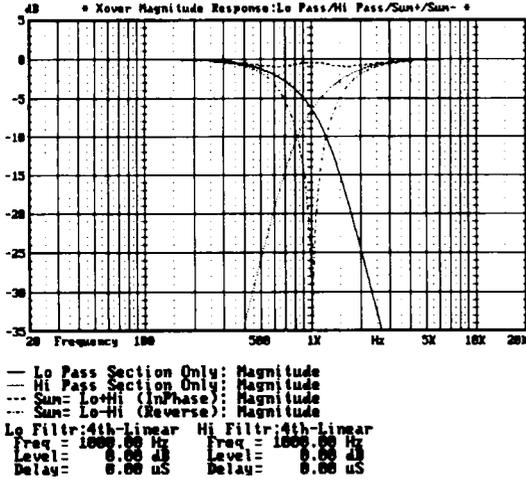


Figure 8.77

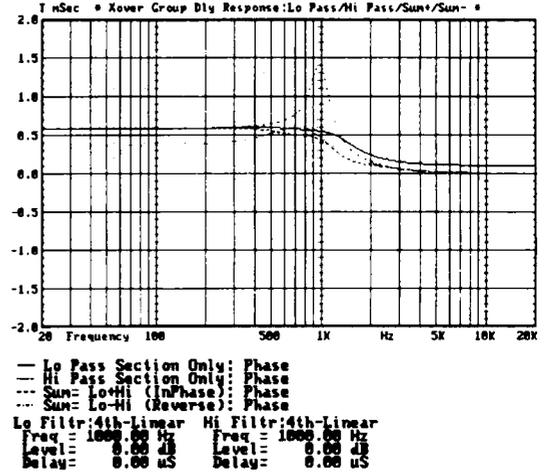


Figure 8.79

branchement en polarité normale ; sa courbe de retard de groupe ressemble à celle d'un filtre de type Bessel.

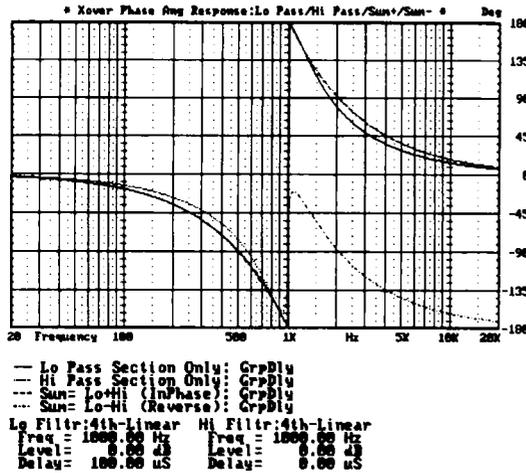


Figure 8.78

12. Filtre de type linéaire en phase d'ordre quatre

Le nom de ce filtre est attrayant, mais son asymétrie le rend peu intéressant. Les courbes de réponse en niveau, en phase et du retard de groupe figurent en 8.77 à 8.79 (sans décalage). La somme des signaux du filtre est presque plate pour un branchement en polarité normale et sa courbe de retard de groupe, assez plate, est similaire à celle d'un filtre de type Bessel d'ordre quatre.

8.3.1 Formules de calcul pour filtres à deux voies

Les formules suivantes servent à calculer des filtres symétriques passe-bas et passe-haut. La configuration des circuits électriques des filtres à deux voies est présentée en figure 8.80. Les valeurs des composants du filtre sont exprimées pour les selfs (L) en henrys, pour les condensateurs (C) en farads, et en ohms pour les résistances notées R, quant à la fréquence (f), elle est en hertz.

filtre de type Butterworth du premier ordre

$$C_1 = \frac{0,159}{R_H f} \quad L_1 = \frac{R_L}{6,28 f}$$

filtre de type Linkwitz-Riley de second ordre

$$C_1 = \frac{0,0796}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,3183 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,0796}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,3183 R_L}{f}$$

filtre de type Bessel de second ordre

$$C_1 = \frac{0,0912}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,2756 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,0912}{R_L f} \quad L_2 = \frac{0,2756 R_L}{f}$$

filtre de type Butterworth de second ordre

$$C_1 = \frac{0,1125}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,2251 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1125}{R_L f} \quad L_2 = \frac{0,2251 R_L}{f}$$

filtre de type Chebychev de second ordre

$$C_1 = \frac{0,1592}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1592 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1592}{R_L f} \quad L_2 = \frac{0,1592 R_L}{f}$$

filtre de type Butterworth de troisième ordre

$$C_1 = \frac{0,1061}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1194 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,3183}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,2387 R_L}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2122}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,0796 R_L}{f}$$

filtre de type Linkwitz-Riley de quatrième ordre

$$C_1 = \frac{0,0844}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1000 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1688}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,4501 R_H}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2533}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,3000 R_L}{f}$$

$$C_4 = \frac{0,0563}{R_L f} \quad L_4 = \frac{0,1500 R_L}{f}$$

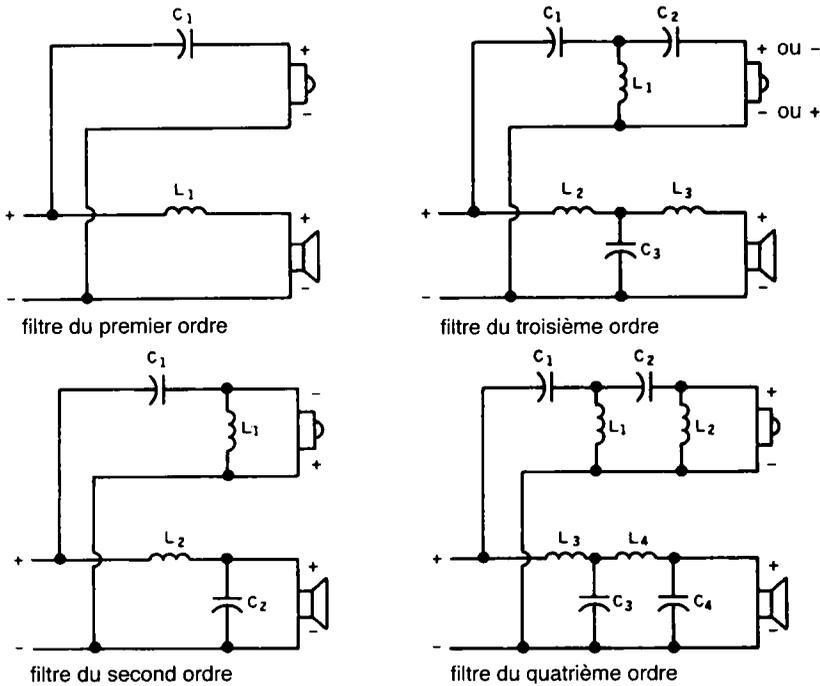


Figure 8.80 : Schémas de filtres à deux voies.

**filtre de type Bessel
de quatrième ordre**

$$C_1 = \frac{0,0702}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,0862 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,0719}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,4983 R_H}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2336}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,3583 R_L}{f}$$

$$C_4 = \frac{0,0504}{R_L f} \quad L_4 = \frac{0,1463 R_L}{f}$$

**filtre de type Butterworth
de quatrième ordre**

$$C_1 = \frac{0,1040}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1009 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1470}{R_L f} \quad L_2 = \frac{0,4159 R_H}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2509}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,2437 R_L}{f}$$

$$C_4 = \frac{0,0609}{R_L f} \quad L_4 = \frac{0,1723 R_L}{f}$$

filtre de type Legendre
de quatrième ordre

$$C_1 = \frac{0,1104}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1073 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1246}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,2783 R_H}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2365}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,2294 R_L}{f}$$

$$C_4 = \frac{0,091}{R_L f} \quad L_4 = \frac{0,2034 R_L}{f}$$

filtre de type Gaussien
de quatrième ordre

$$C_1 = \frac{0,0767}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1116 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1491}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,3251 R_H}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2235}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,3253 R_L}{f}$$

$$C_4 = \frac{0,0768}{R_L f} \quad L_4 = \frac{0,1674 R_L}{f}$$

filtre de type à phase linéaire
de quatrième ordre

$$C_1 = \frac{0,0741}{R_H f} \quad L_1 = \frac{0,1079 R_H}{f}$$

$$C_2 = \frac{0,1524}{R_H f} \quad L_2 = \frac{0,3853 R_H}{f}$$

$$C_3 = \frac{0,2255}{R_L f} \quad L_3 = \frac{0,3285 R_L}{f}$$

$$C_4 = \frac{0,0632}{R_L f} \quad L_4 = \frac{0,1578 R_L}{f}$$

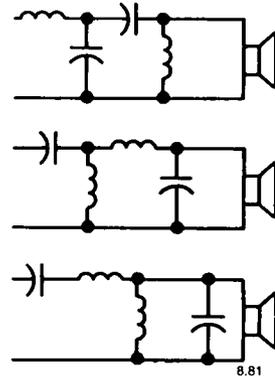


Figure 8.81 : Exemples de différentes configurations de filtre passe-bande.

8.4 Filtres à trois voies

Les filtres à deux voies relèvent de conditions quasi idéales. Le fait d'ajouter un haut-parleur et une fréquence de coupure supplémentaires complique considérablement la situation. À cause des nombreux compromis que nous allons passer en revue, voici le moment opportun pour vous signaler que, si vous désirez construire une enceinte acoustique à trois voies, vous devriez vraiment envisager l'utilisation d'un filtre actif pour la deuxième fréquence de filtrage. Bien qu'il faille acquérir un amplificateur supplémentaire en plus du filtre électronique, les avantages de ce type de montage sont significatifs (cf. paragraphe 8.1).

Il est connu que les filtres à trois voies ne peuvent être obtenus correctement par la combinaison de deux filtres à deux voies [7]. Le problème se complique davantage à cause de la grande variété des configurations de circuits de filtres possibles. Malheureusement, chacun des circuits passe-bande pour filtres à trois voies de la figure 8.81 aura une réponse dont la forme sera différente. Robert Bullock clarifia la situation par des calculs complexes qui tiennent compte des influences mutuelles des différentes sections des filtres passe-

bande. Cette information est tirée de son article *Passive Three-Way All-Pass Crossover Networks*, paru dans le JAES [7], complété par quelques réalisations pratiques publiées dans *Speaker Builder* 2/85 sous le titre *Passive Crossover Networks*. La revue *Speaker Builder* présente dans le numéro de février 87 une configuration en "T" pour la cellule passe-bande, différente de celle en usage dans les filtres à trois voies classiques. Ce circuit plus complexe présente une moindre sensibilité de l'impédance d'entrée, quand on le compare aux circuits standard, mais cela est de peu de conséquence pour les filtres qui seront étudiés ci-dessous.

8.4.1 Caractéristiques des filtres à trois voies

À l'opposé des filtres à deux voies, aucun filtre à trois voies n'est à la fois APC *All Pass Circuit* et CPC *Constant Power Circuit*. La plupart des propos tenus aussi bien sur la réponse polaire que sur la réponse en puissance reviennent à peu près au même. La seule exception est le filtre impair de type passe-tout (APC) qui a une dépression dans la courbe de niveau de 1 à 2 dB.

Dans la conception des filtres, l'une des choses les plus importantes est certainement l'écart entre les différentes fréquences de coupure du filtre. En d'autres mots, on considère que la réponse combinée des haut-parleurs sera d'autant meilleure que les fréquences de coupure seront plus éloignées les unes des autres (trois octaves est un bon point de départ) [22]. Le rapprochement des différentes fréquences de coupure du filtre à moins de trois octaves l'une de l'autre augmenterait inutilement l'influence de nombreuses interférences.

Les tableaux des formules de calcul de filtres du paragraphe 8.4.2 (voir figure 8.82) montrent ce que je considère de mieux comme type de filtre et comme répartition des

fréquences de coupure, tout en minimisant les interférences entre les haut-parleurs. Ces formules sont tout à fait adéquates pour une production industrielle, aussi bien que pour une fabrication en petite série, avec des haut-parleurs de dimension standard.

8.4.2 Formules de calcul des filtres passe-tout à trois voies (APC)

Les formules pour calculer les filtres sont adaptées aux deux paires fondamentales de fréquences de coupure les plus fréquemment utilisées dans les enceintes acoustiques à trois voies (figure 8.82). Chaque paire a une largeur de bande différente, définie par la fréquence de coupure entre le haut-parleur de graves et le haut-parleur de registre médium (f_L) et la fréquence de coupure entre le haut-parleur de médium et le haut-parleur d'aigus (f_H). Les deux largeurs de bande choisies sont pour le type (A) une largeur de 3,4 octaves ($f_H/f_L = 10$) et pour le type (B) une largeur de trois octaves ($f_H/f_L = 8$). Les formules de calcul de filtres de type (A) peuvent être employées aussi bien pour un ensemble de haut-parleurs filtré à 300 Hz/3 kHz, composé d'un haut-parleur de graves pour le grave, d'un haut-parleur grave-médium pour le médium et d'un haut-parleur d'aigus à dôme pour le registre aigu, que pour un ensemble filtré à 500 Hz/5 kHz, composé d'un haut-parleur de graves, d'un médium à petite membrane conique et clos à l'arrière ou d'un médium à dôme, et d'un haut-parleur d'aigus. Les formules de calcul de filtres de type (B) s'appliquent, pour les fréquences de coupure de 375 Hz/3 kHz, à un ensemble composé d'un haut-parleur de graves, d'un grave-médium et d'un haut-parleur d'aigus, tout comme, pour les deux couples de fréquences de coupure 625 Hz/5 kHz et 750 Hz/6 kHz, à un ensemble constitué d'un haut-parleur de graves, d'un médium à petite membrane conique et clos à l'arrière ou d'un médium à dôme, et d'un haut-parleur d'aigus. Pour d'autres largeurs de bande ou

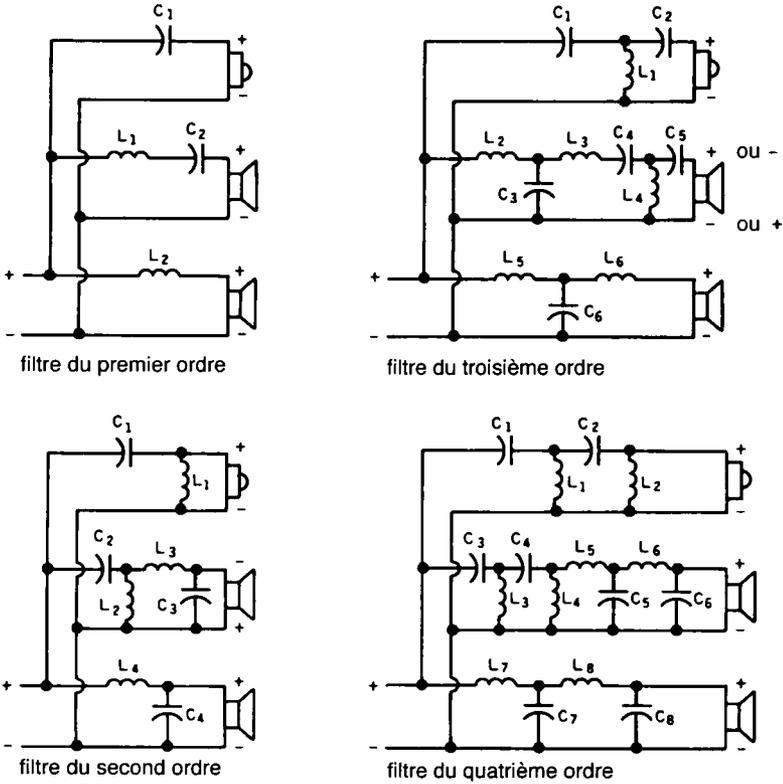


Figure 8.82 : Exemples de schémas de filtres à trois voies.

d'autres types de filtres, reportez-vous à l'ouvrage de Bullock, et préparez-vous à faire beaucoup de calculs [22].

Quand vous utilisez des fréquences de coupure aussi basses que 300 Hz, ou moins, les selfs prennent des valeurs élevées et peuvent provoquer des chutes de rendement non négligeables. La formule suivante vous servira à comparer les pertes d'insertion provenant de selfs :

$$L_L = 20 \log_{10} \cdot \left(\frac{R_m}{R_s + R_m} \right)$$

- où
- L_L perte d'insertion de la self en dB
- R_m impédance du haut-parleur
- R_s résistance en courant continu de la self

L'utilisation d'un filtre à trois voies entraîne une augmentation de gain pour la section passe-bande. À partir de cette donnée, fournie pour chaque exemple de filtre, vous pouvez comparer l'efficacité des différents haut-parleurs. Dans une enceinte à trois voies, l'efficacité totale en dB du haut-parleur de médium est la suivante :

Gain total du haut-parleur =
 (efficacité caractéristique du haut-parleur) + (gain de la section passe-bande du filtre) - (chute de niveau due à la self)

Pour toutes les formules présentées, nous avons :

$$f_m = (f_H \cdot f_L)^{1/2}$$

**Filtre de premier ordre
de type APC**

(A)

$$C_1 = \frac{0,1590}{R_H \cdot f_H} \quad L_1 = \frac{0,0458 R_M}{f_M}$$

$$C_2 = \frac{0,5540}{R_M \cdot f_M} \quad L_2 = \frac{0,1592 R_L}{f_L}$$

(B)

$$C_1 = \frac{0,1590}{R_H \cdot f_H} \quad L_1 = \frac{0,0500 R_M}{f_M}$$

$$C_2 = \frac{0,5070}{R_M \cdot f_M} \quad L_2 = \frac{0,1592 R_L}{f_L}$$

**Filtre de second ordre
de type APC**

(la section passe-bas a sa polarité inversée)

(A)

$$C_1 = \frac{0,0791}{R_H \cdot f_H} \quad L_1 = \frac{0,3202 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,3236}{R_M \cdot f_M} \quad L_2 = \frac{1,029 R_M}{f_M}$$

$$C_3 = \frac{0,0227}{R_M \cdot f_M} \quad L_3 = \frac{0,0837 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,0791}{R_L \cdot f_L} \quad L_4 = \frac{0,3202 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 2,08 dB

(B)

$$C_1 = \frac{0,0788}{R_H \cdot f_H} \quad L_1 = \frac{0,3217 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,3046}{R_M \cdot f_M} \quad L_2 = \frac{0,9320 R_M}{f_M}$$

$$C_3 = \frac{0,0248}{R_M \cdot f_M} \quad L_3 = \frac{0,0913 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,0788}{R_L \cdot f_L} \quad L_4 = \frac{0,3217 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 2,45 dB

**Filtre de troisième ordre
de type APC**

(la section passe-bas a sa polarité inversée)

(A)

$$C_1 = \frac{0,0995}{R_H \cdot f_H} \quad L_1 = \frac{0,1191 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,3402}{R_H \cdot f_H} \quad L_2 = \frac{0,0665 R_M}{f_M}$$

$$C_3 = \frac{0,0683}{R_M \cdot f_M} \quad L_3 = \frac{0,0233 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,3128}{R_M \cdot f_M} \quad L_4 = \frac{0,4285 R_M}{f_M}$$

$$C_5 = \frac{1,148}{R_M \cdot f_M} \quad L_5 = \frac{0,2546 R_L}{f_L}$$

$$C_6 = \frac{0,2126}{R_L \cdot f_L} \quad L_6 = \frac{0,0745 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 1,6 dB

(B)

$$C_1 = \frac{0,0980}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_1 = \frac{0,1190 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,3459}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_2 = \frac{0,0711 R_M}{f_M}$$

$$C_3 = \frac{0,0768}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_3 = \frac{0,0254 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,2793}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_4 = \frac{0,3951 R_M}{f_M}$$

$$C_5 = \frac{1,061}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_5 = \frac{0,2586 R_L}{f_L}$$

$$C_6 = \frac{0,2129}{R_L \cdot f_L}$$

$$L_6 = \frac{0,0732 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 2,1 dB

(la section passe-bas a une polarité normale)

(A)

$$C_1 = \frac{0,1138}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_1 = \frac{0,1191 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,2976}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_2 = \frac{0,0598 R_M}{f_M}$$

$$C_3 = \frac{0,0765}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_3 = \frac{0,0253 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,3475}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_4 = \frac{0,3789 R_M}{f_M}$$

$$C_5 = \frac{1,068}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_5 = \frac{0,2227 R_L}{f_L}$$

$$C_6 = \frac{0,2127}{R_L \cdot f_L}$$

$$L_6 = \frac{0,0852 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 0,85 dB

(B)

$$C_1 = \frac{0,1158}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_1 = \frac{0,1189 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,2927}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_2 = \frac{0,0634 R_M}{f_M}$$

$$C_3 = \frac{0,0884}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_3 = \frac{0,0284 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,3112}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_4 = \frac{0,3395 R_M}{f_M}$$

$$C_5 = \frac{0,9667}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_5 = \frac{0,2187 R_L}{f_L}$$

$$C_6 = \frac{0,2130}{R_L \cdot f_L}$$

$$L_6 = \frac{0,0866 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 0,99 dB

Filtre de quatrième ordre de type APC

(A)

$$C_1 = \frac{0,0848}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_1 = \frac{0,1004 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,1686}{R_H \cdot F_H}$$

$$L_2 = \frac{0,4469 R_H}{f_H}$$

$$C_3 = \frac{0,3843}{R_M \cdot f_M}$$

$$L_3 = \frac{0,2617 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,5834}{R_M \cdot f_M} \quad L_4 = \frac{1,423 R_M}{f_M} \quad C_7 = \frac{0,2515}{R_L \cdot f_L} \quad L_7 = \frac{0,2983 R_L}{f_L}$$

$$C_5 = \frac{0,0728}{R_M \cdot f_M} \quad L_5 = \frac{0,0939 R_M}{f_M} \quad C_8 = \frac{0,0569}{R_L \cdot f_L} \quad L_8 = \frac{0,1503 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 2,84 dB

$$C_6 = \frac{0,0162}{R_M \cdot f_M} \quad L_6 = \frac{0,0445 R_M}{f_M}$$

$$C_7 = \frac{0,2523}{R_L \cdot f_L} \quad L_7 = \frac{0,2987 R_L}{f_L}$$

$$C_8 = \frac{0,0567}{R_L \cdot f_L} \quad L_8 = \frac{0,1502 R_L}{f_L}$$

Gain de la section passe-bas = 2,28 dB

(B)

$$C_1 = \frac{0,0849}{R_H \cdot F_H} \quad L_1 = \frac{0,1007 R_H}{f_H}$$

$$C_2 = \frac{0,1685}{R_H \cdot F_H} \quad L_2 = \frac{0,4450 R_H}{f_H}$$

$$C_3 = \frac{0,3774}{R_M \cdot f_M} \quad L_3 = \frac{0,2224 R_M}{f_M}$$

$$C_4 = \frac{0,5332}{R_M \cdot f_M} \quad L_4 = \frac{1,273 R_M}{f_M}$$

$$C_5 = \frac{0,0799}{R_M \cdot f_M} \quad L_5 = \frac{0,1040 R_M}{f_M}$$

$$C_6 = \frac{0,0178}{R_M \cdot f_M} \quad L_6 = \frac{0,0490 R_M}{f_M}$$

8.4.3 Exemples d'application du calcul des filtres

Les formules de calcul pour filtres reportées ici ne donneront les résultats attendus sur le plan acoustique que si les conditions suivantes sont respectées :

1. Le filtre est chargé par une impédance constante, c'est-à-dire qu'elle ne varie ni en amplitude ni en phase avec la fréquence.
2. Le domaine utile en fréquence du haut-parleur dépasse, dans la zone d'atténuation, de 1,5 à 2 octaves la fréquence de coupure du filtre (vers les fréquences élevées pour un filtre passe-bas, et vers les fréquences basses pour un filtre passe-haut) en restant assez linéaire en niveau.
3. Les haut-parleurs passe-haut et passe-bas rayonnent à partir du même plan.

Il suffit que l'une quelconque de ces conditions ne soit pas remplie, pour que les caractéristiques de votre filtre ne correspondent pas à vos prévisions. Dans ce cas, il n'y a plus le choix qu'entre deux méthodes. La première, c'est la méthode empirique. Les formules ne vous donneront dans ce cas qu'une idée approximative des ordres de grandeur des différents éléments nécessaires. Relevez la courbe de réponse de votre enceinte, modifiez la valeur d'un des composants du filtre, puis refaites une mesure, et ainsi de suite jusqu'à ce que vous obteniez le résultat souhaité. C'est cette méthode qui est la plus utilisée, en réalité, par les fabricants d'enceintes acoustiques, car le nombre des variables à prendre en compte ne laisse guère le choix. La solution est d'utiliser

une technique de mesure très rapide, ou mieux encore, une technique de mesure en temps réel, qui vous permet de réagir immédiatement, comme les analyseurs FFT (transformation rapide de Fourier), les traceurs de courbes de réponse successives, ou un analyseur en temps réel de haute qualité (ATR).

L'autre méthode consiste à utiliser un logiciel de conception assistée par ordinateur. Ces programmes sont de plus en plus courants et aussi de plus en plus performants. Les logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) pour les enceintes acoustiques, y compris les logiciels d'optimisation des filtres, seront exposés en détail dans le chapitre 12.

Pour faciliter la conception de votre filtre, suivez les conseils ci-dessous :

- A.** En premier lieu, il n'est pas indispensable d'avoir une courbe d'impédance plate pour obtenir d'une enceinte acoustique les résultats désirés, mais si c'est le cas, ce sera plus facile. Parmi d'autres avantages procurés par une courbe d'impédance plate, citons : l'amélioration de l'interface amplificateur/enceinte ainsi que l'accroissement sur toute la gamme de fréquences de l'amortissement de l'enceinte. Changer la courbe d'impédance naturellement incurvée d'un haut-parleur en une courbe plus plate demande l'adjonction de filtres associés, qui auront été accordés aux paramètres du haut-parleur. Cette technique sera présentée dans les paragraphes 8.5 à 8.5.2. Sauf à vouloir baser toute votre procédure de mise au point sur des tâtonnements, commencez par corriger l'impédance des haut-parleurs avant de passer au calcul des filtres.
- B.** La deuxième condition, qui demande une grande extension de la bande passante utile du haut-parleur choisi, n'est pas toujours facile à remplir. Cette exigence dépend notamment de la directivité et de l'extension du registre grave, pour ce qui est du haut-parleur, et du choix de la fréquence

de coupure et de la pente d'atténuation, en ce qui concerne le filtre. On observera que la largeur de bande du haut-parleur pourra être plus faible, si l'on choisit une pente de filtrage plus raide. Comparés aux filtres d'ordre un, les filtres d'ordre quatre se contentent de largeurs de bande moins étendues, pour que les haut-parleurs donnent une bonne réponse aussi bien dans l'axe qu'en dehors.

Les difficultés posées par la directivité disparaissent, si l'on associe des haut-parleurs dont les différentes largeurs des registres de fréquences sont complémentaires. Un haut-parleur de graves de 30 cm (12") de diamètre est un mauvais choix pour une enceinte à deux voies, si son haut-parleur d'aigus à dôme ne peut être filtré à une fréquence inférieure à 2 kHz. La directivité du haut-parleur de 30 cm (12") provoquera un grand trou dans la courbe de réponse mesurée hors de l'axe. La combinaison de ce haut-parleur de graves de 30 cm (12") avec un deuxième haut-parleur de grave-médium de 15 cm (6"), un médium à dôme de 76 mm (3") et un haut-parleur d'aigus de 19 mm, donnerait un ensemble homogène. Les enceintes à deux voies équipées d'un haut-parleur de graves de 25 cm (10") restent peu courantes, même si elles ont connu un certain succès pendant quelques temps. Un haut-parleur de graves de 25 cm (10"), associé à un médium de 10 cm (4") et à un haut-parleur d'aigus de 25 mm (1"), forme un ensemble qui fonctionne bien, s'il est filtré dans la zone des 750 Hz à 1 kHz et des 4 kHz à 5 kHz. Une réserve en largeur de bande de fréquences d'environ 1,5 à 2 octaves pour chaque haut-parleur, de part et d'autre de sa fréquence de coupure, n'est possible que dans des enceintes à trois ou quatre voies, où l'on aura choisi avec soin les haut-parleurs et les fréquences de coupure du filtre.

C'est en vain que l'on cherchera à éviter, avec une enceinte à deux voies, que les haut-parleurs ne se recoupent dans la zone où ils ne sont plus linéaires en niveau, soit à

cause du haut-parleur de graves dont la directivité est trop marquée, soit à cause du haut-parleur d'aigus qui ne descend pas assez bas en fréquence. Connaissant la directivité et la chute vers les fréquences élevées des haut-parleurs, habituellement utilisés pour faire des enceintes à deux voies (haut-parleurs de graves de 10 cm (4") et 20 cm (8") et haut-parleurs d'aigus de 12,7 mm (0,5") à 38 mm (1,5")), il est inutile d'espérer que les spectres des haut-parleurs puissent se recouvrir sur 1,5 à 2 octaves de part et d'autre de la fréquence de coupure du filtre, qui se situe entre 2 et 3 kHz. Si l'atténuation du filtrage s'effectue dans une zone où la réponse du haut-parleur change fortement, et ce dans l'axe aussi bien qu'en dehors, alors il ne vous reste que deux possibilités, soit de procéder par tâtonnements, soit de tenter de résoudre le problème à l'aide d'un logiciel d'optimisation pour filtre de haut-parleur.

Par exemple, si pour un haut-parleur d'aigus un filtre passe-haut est calculé pour une fréquence de coupure de 2 kHz, alors que le niveau du haut-parleur d'aigus chute en dessous de 1,2 kHz, il sera nécessaire de calculer la fonction de transfert du filtre pour que, combinée avec celle du haut-parleur d'aigus, l'ensemble corresponde à la courbe recherchée. Il faut se souvenir qu'il y a de nombreuses façons d'obtenir une courbe de réponse plate. Chaque problème posé par un circuit de filtrage a de multiples solutions, certaines sont valables, d'autres ne le sont pas. Un logiciel d'optimisation pour les filtres de haut-parleur vous permet par exemple de programmer un filtre du second degré avec un simple filtre CR (condensateur / résistance), car il sera étroitement associé à la pente de coupure du haut-parleur, et même d'optimiser les valeurs des composants pour obtenir une réponse analogue à un filtre d'ordre deux, trois, voire quatre, avec le même type de circuit. Bien entendu, vous n'êtes pas obligé d'utiliser le même ordre de filtrage que celui qui correspond à la pente de coupure

recherchée. D'ailleurs, cela n'est pratiquement jamais le cas pour une enceinte acoustique à deux voies. Les logiciels d'optimisation ouvrent la voie à des expérimentations avec des configurations inhabituelles, comme la combinaison d'un filtre du premier degré passe-bas, associé à un circuit parallèle du type réjecteur à composants L, C, et R, opérant à une fréquence située une octave au-dessus de la fréquence de coupure du filtre.

Si la fonction de transfert du haut-parleur est partie intégrante de la fonction générale, vous pouvez être amené à développer des filtres à l'apparence asymétrique. Le calcul du filtre pour une enceinte à deux voies s'effectue souvent en prenant, pour le haut-parleur de graves, un filtre de premier degré et, pour le haut-parleur d'aigus, un filtre d'ordre trois. Dans ce cas, le filtre passe-bas de premier degré se combine avec la chute aux fréquences élevées du haut-parleur de graves, qui correspond à 12 dB/octave (second ordre), pour effectuer une atténuation totale qui, mesurée au microphone, correspond à l'atténuation d'un filtre du troisième degré. Le haut-parleur d'aigus, lui, devra être coupé assez haut avec un filtre de configuration d'ordre trois pour donner une atténuation qui soit aussi d'ordre trois.

C. Habituellement, les problèmes provoqués dans la courbe de réponse par le décalage horizontal des haut-parleurs ne sont pas des moindres, à moins de corriger réellement ce décalage ou de le compenser par des filtres d'ordre plus élevé. Inversez plusieurs fois la polarité des sections passe-haut et relevez chaque fois une courbe de réponse, et vous saurez si votre filtre a été en fin de compte bien conçu et bien ajusté et si les sections passe-haut et passe-bas sont correctement mises en phase. Si le filtre a été bien calculé, c'est-à-dire si la courbe de réponse est plate et la phase des haut-parleurs ainsi que leurs niveaux à la fréquence de coupure sont correctement ajustés, vous verrez apparaître, à ce

moment, à la fréquence de coupure, un important trou symétrique. Parfois, alors que vous aurez calculé le filtre avec beaucoup de soin pour obtenir une courbe de réponse théoriquement plate, le filtre donnera néanmoins de piètres résultats. Si c'est le cas, vous le remarquerez à la médiocrité de la directivité et de l'image sonore.

En plus des critères d'impédance, de directivité et d'alignement des haut-parleurs sur le plan horizontal, d'autres critères sont également d'importance pour déterminer quelle fréquence vous donnera les performances optimales. Le bon choix des fréquences de coupure, pour éviter certaines zones de fréquences inappropriées, est fondamental pour bien réussir la conception de filtres pour haut-parleurs. Les filtres à trois voies semblent fonctionner le mieux avec les fréquences de coupure de 200 à 300 Hz pour la liaison entre le grave et le médium, et de 2 à 3,5 kHz pour la liaison entre le médium et le haut-parleur d'aigus, mais ceci n'est une règle que parce qu'elle souffre des exceptions. En d'autres mots, évitez de filtrer dans la zone des 350 Hz à 1,5 kHz. Les haut-parleurs de graves (de 25 cm à 38 cm de diamètre) ont tendance à donner des voix d'hommes trop pleines, si ces haut-parleurs, par défaut d'un filtrage adéquat, montent au-delà de 200 à 350 Hz (en fonction de la pente d'atténuation évidemment). Il est alors difficile de trouver des haut-parleurs d'aigus à cône ou à dôme capables de travailler sans trop de distorsions à des fréquences de coupures inférieures à 2 kHz.

8.4.4 Filtres : exemples d'applications

Quelques illustrations vous feront mieux comprendre les règles exposées au paragraphe précédent. Voici des simulations, effectuées par ordinateur, de chaque type de "dilemme" et appliquées à une enceinte à deux voies qui utilise un filtre Linkwitz-Riley d'ordre quatre :

♦ Le filtre passe-bas

Cette série de simulations utilise un haut-parleur de graves SEAS du type P17RC / P de 15 cm (6") de diamètre dont l'impédance a été mesurée par la méthode de division de tension, avec le système Audio Precision System 1. Pour des raisons de simplification, les courbes de réponse ont été relevées dans l'axe à 1 m de distance avec le microphone 7012 d'ACO Pacific et l'amplificateur de mesure DRA MLSSA, puis les résultats ont été transférés au logiciel LEAP 4.0 sur PC. Mon objectif était une réponse passe-bas de type Linkwitz-Riley d'ordre quatre avec une fréquence de coupure de 3 kHz. La figure 8.83 compare la courbe non filtrée du haut-parleur de graves et celle de l'objectif.

Mon premier essai a été fait avec un circuit du type Linkwitz-Riley d'ordre quatre et des valeurs standard. Je l'ai fait pour mettre en évidence l'effet d'un filtre "classique", sans section de compensation d'impédance. Le résultat figure en 8.84. La pente d'atténuation vers les 3 kHz à 6 kHz n'est pas trop mauvaise, mais la bosse de 4 dB à la fréquence de coupure est de toute évidence le résultat de fortes interactions.

En toute logique, l'étape suivante consiste à ajouter un filtre qui compense l'impédance du haut-parleur par la mise en parallèle d'un simple circuit RC (résistance, condensateur). Le résultat est documenté par la courbe de la figure 8.55. Il s'agit certainement d'une amélioration, mais le taux d'atténuation atteint 27 dB/octave entre 3 kHz et 6 kHz. Comme notre objectif est une réponse du quatrième ordre, c'est-à-dire 24 dB/octave, il est évident que la combinaison de la coupure naturelle du haut-parleur de graves et de l'action conjuguée des filtres donne une pente d'atténuation plus forte que nécessaire.

Puisque l'atténuation introduite par un circuit du quatrième ordre semble trop forte, essayons un circuit d'ordre inférieur. La figure 8.86 montre la réponse d'un circuit du

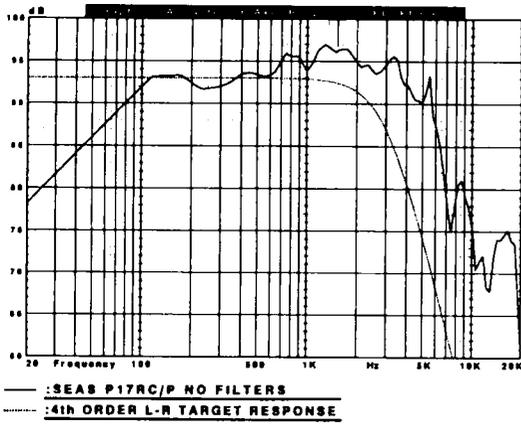


Figure 8.83

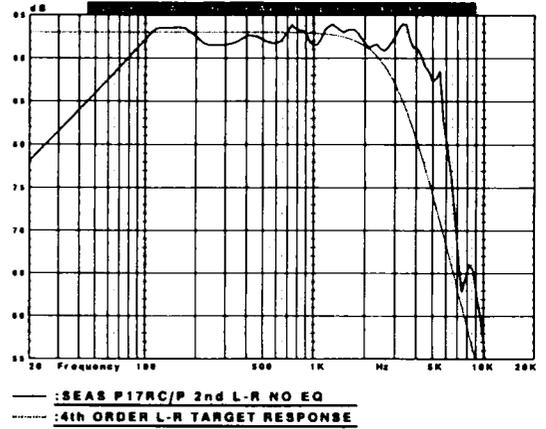


Figure 8.86

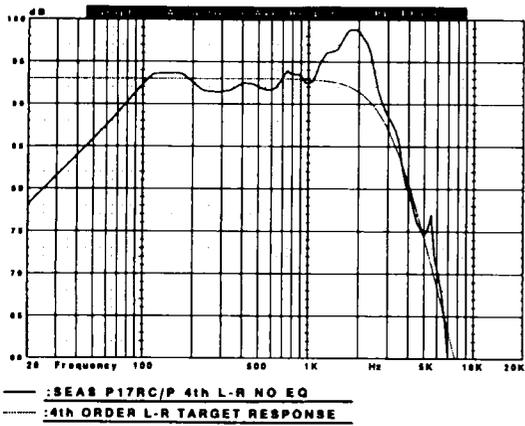


Figure 8.84

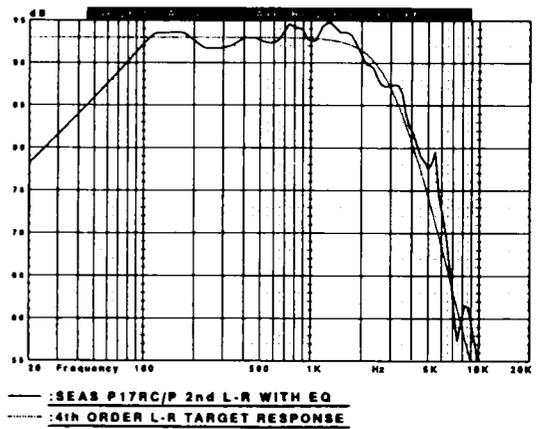


Figure 8.87

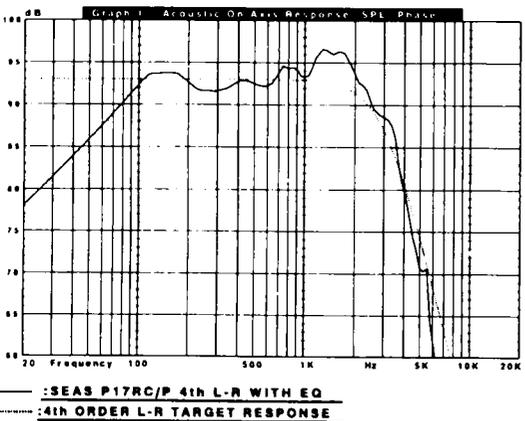


Figure 8.85

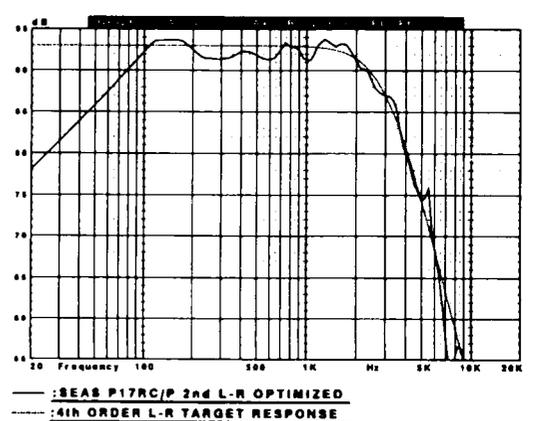


Figure 8.88

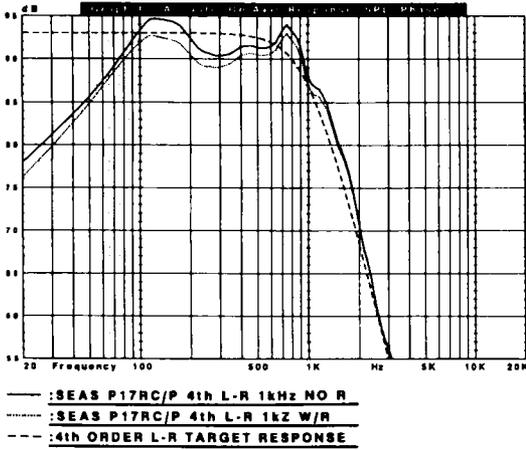


Figure 8.89

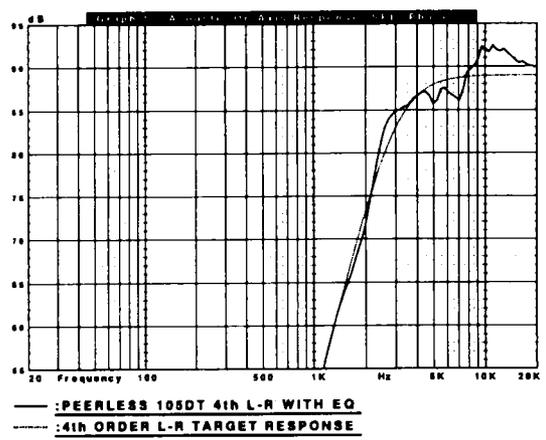


Figure 8.92

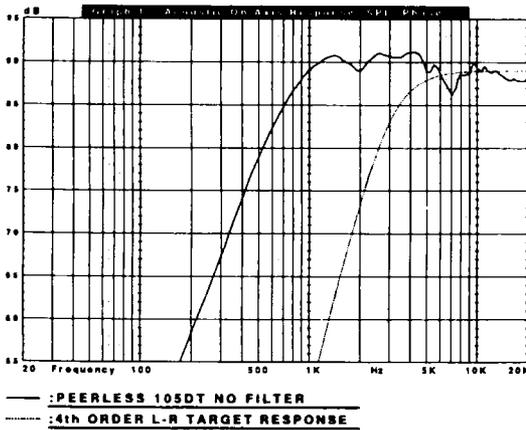


Figure 8.90

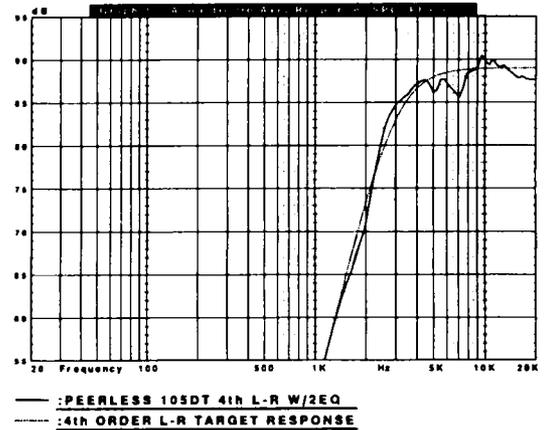


Figure 8.93

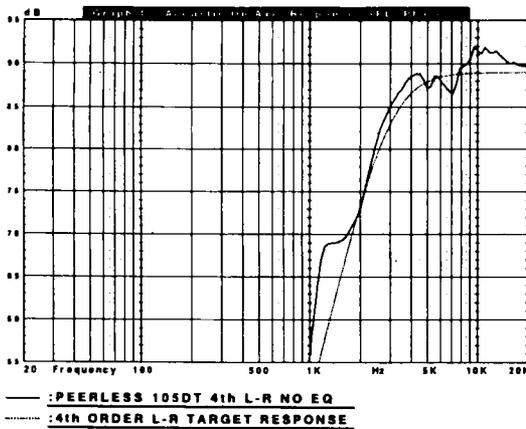


Figure 8.91

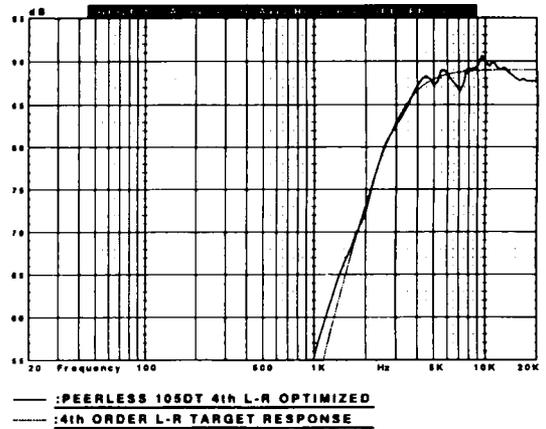


Figure 8.94

second ordre du type Linkwitz-Riley, qui a été calculé en tenant compte des paramètres du haut-parleur, mais sans circuit de compensation de son impédance. Le résultat n'est pas aussi heureux que celui de la configuration avec le filtre d'ordre quatre, mais en rajoutant la compensation pour l'impédance du haut-parleur, nous obtenons la meilleure courbe de réponse jusqu'à présent (cf. figure 8.87).

En fin de compte, tout ce dont nous avons eu besoin pour nous rapprocher suffisamment de l'objectif fixé, c'était un peu de jugement et d'un minimum d'ajustements. La figure 8.88 montre les résultats avec optimisation par ordinateur ; à l'évidence, ils sont encore plus proches de l'objectif.

Dans nos expériences, nous avons ignoré dans les filtres les effets "parasites" des résistances des selfs qui sont placées en série. Prenons un autre exemple pour mieux observer les effets de la résistance en courant continu des selfs (DCR). La figure 8.89 montre le même haut-parleur de graves avec un filtre du type Linkwitz Riley d'ordre quatre et une compensation d'impédance à 1 kHz. La valeur de ces deux inductances est respectivement de 2,4 mH et 1,2 mH. Si ces selfs étaient à air, bobinées avec du fil de cuivre émaillé de 1,2 mm de diamètre, leur résistance au courant continu serait de 1,0 Ω et 0,7 Ω , donc un total de 1,7 Ω . La courbe du haut a été relevée sans les effets de la résistance des selfs en série, alors que celle du bas les inclut. L'effet d'atténuation dû à la résistance série des selfs est surtout important aux basses fréquences, alors qu'il diminue quand on approche de la fréquence de coupure du filtre, où il est amoindri par l'action même du filtre. L'autre effet marquant est l'action de la résistance des selfs sur le coefficient de surtension Q des haut-parleurs.

♦ Le filtre passe-haut

Dans ce paragraphe, nous utilisons un haut-parleur d'aigus à dôme en tissu Peerless du type 105DT, choisi parce qu'il a une résonance

somme toute "classique" et n'utilise pas de Ferrofluid (un liquide visqueux particulier qui évacue la chaleur de la bobine mobile vers l'aimant). Les relevés des caractéristiques du haut-parleur d'aigus ont été faits avec les mêmes appareils de mesure et les mêmes méthodes que précédemment. Le but est d'obtenir un filtrage passe-haut du type Linkwitz-Riley d'ordre quatre à une fréquence de coupure de 3 kHz. La figure 8.90 montre la courbe de réponse idéale à atteindre et, en superposition, celle du haut-parleur d'aigus non filtré.

La première étape consiste à essayer un circuit classique d'ordre quatre du type Linkwitz-Riley avec des valeurs obtenues par calculs standard. La courbe figure en 8.91, et montre l'effet classique d'un filtre sans correction à la résonance. La résonance du haut-parleur provoque un accident marqué dans la courbe de réponse vers la fréquence de 1 kHz. Notez également l'apparition, dans la région des 8 à 15 kHz, d'un pic résultant de l'interaction du filtre avec la bobine mobile du haut-parleur d'aigus.

En ajoutant au filtre un circuit bouchon série LCR accordé sur 1 kHz, on note la disparition de la perturbation qui était située vers les 1 à 2 kHz, par contre, la bosse vers les 8 à 15 kHz est toujours présente, reportez-vous à la figure 8.92.

Pour corriger l'impédance, la solution consiste à ajouter un simple réseau RC dont l'effet est clairement visible en figure 8.93. Dans ce cas, le simple nivellement de la courbe d'impédance du haut-parleur d'aigus a suffi à éliminer le problème posé par la bosse entre 8 kHz et 15 kHz. Le résultat est loin d'être mauvais, mais la figure 8.94 montre le supplément de linéarité obtenu par le logiciel qui a calculé une optimisation des composants de ce filtre.

♦ La sommation des deux éléments passe-haut et passe-bas du filtre

La figure 8.95 nous montre, sur le même graphe, la réponse des deux haut-parleurs obtenue avec un filtre optimisé. C'est une configuration classique de filtre du type Linkwitz-Riley, caractérisée par un niveau de -6 dB pour les deux haut-parleurs à la fréquence de coupure de 3 kHz. La somme des réponses de ces deux haut-parleurs est donnée en figure 8.96. Comme prévu, cette somme montre une courbe de réponse relativement plate. Testons le filtre en faisant une inversion de phase, c'est-à-dire en changeant la polarité de l'un des deux haut-parleurs, pour voir comment le filtre réagit. La figure 8.97 montre à l'évidence le résultat. Le trou provoqué par l'opposition de phase est centré très près de la fréquence de filtrage de 3 kHz, et sa forme est relativement symétrique.

Malheureusement, nous avons postulé dans notre exemple que les deux haut-parleurs avaient leurs plans de rayonnement confondus et qu'une compensation des temps de propagation était effectuée par le décalage physique des haut-parleurs. Si nous montons les deux haut-parleurs l'un au-dessus de l'autre, sur une face avant plane, comme c'est le cas 99 fois sur 100, nous aurons un retard d'environ 115 μ s, qui correspond à un décalage de 4 cm (1,56") entre les plans de rayonnement des deux haut-parleurs. Si nous ajoutons cette information au logiciel, nous obtenons la courbe de la figure 8.98, où une large dépression est apparue à la fréquence de coupure du filtre.

Comme cette dépression en niveau n'est pas trop profonde et que son centre n'est pas trop éloigné de la fréquence de coupure de 3 kHz, l'inversion de la phase de l'un des deux haut-parleurs pourrait rétablir la linéarité de la courbe de réponse. La figure 8.99 montre bien qu'il en est ainsi et que la courbe est à nouveau acceptable.

Une autre manière de rétablir la phase est de modifier la courbe du filtre, soit au niveau de la section passe-haut, soit au niveau de la section passe-bas, pour obtenir une courbe de réponse qui soit à nouveau satisfaisante. C'est la fonction d'optimisation du logiciel LEAP qui a permis de résoudre ce problème. Dans le cas présent, je n'ai pas touché au filtre passe-haut, et seuls les éléments du filtre passe-bas pouvaient varier par logiciel. La figure 8.100 montre la courbe altérée du haut-parleur de graves filtré et celle inchangée du haut-parleur d'aigus filtré. La somme des deux courbes, une fois optimisées, est montrée en figure 8.101. En figure 8.102, on contrôle le bon fonctionnement du filtre en inversant la phase. Bien que la courbe de réponse ne soit pas tout aussi plate qu'avec la compensation des temps de propagation par décalage des haut-parleurs, quand la phase de l'un des haut-parleurs est inversée, on obtient néanmoins, vers la fréquence de filtrage de 3 kHz, un trou assez symétrique.

Laquelle de ces deux solutions donne le meilleur résultat sonore ? La réponse dépend entièrement de l'auditeur. Il n'est pas impossible que l'une des versions sonne mieux avec certaines musiques dont le spectre est modifié par des techniques de studio ou des choix particuliers de micros. Pour répondre à ces questions, il nous faudrait entrer dans la partie artistique du métier.

8.4.5 Courbes de réponse et conception de filtres

Les techniques de relevé de courbes de réponse sont étudiées en détail dans le chapitre 9. Cependant, quel que soit le type de mesure employé, il est utile de préciser quelques autres critères habituels.

Par convention, lors de la mise au point d'enceintes acoustiques, on effectue les mesures avec le micro placé à une distance d'un mètre dans la direction de l'auditeur, et

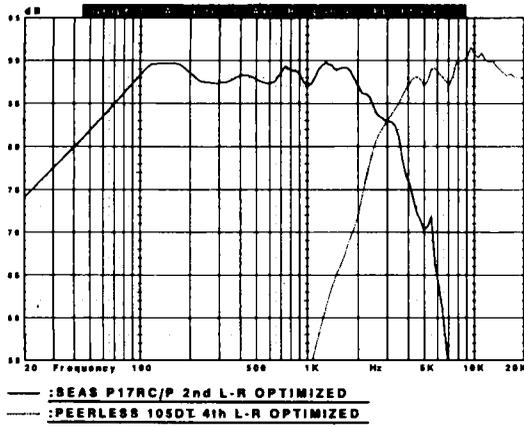


Figure 8.95

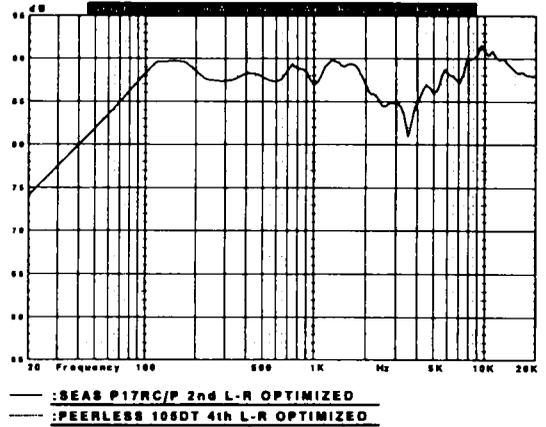


Figure 8.98

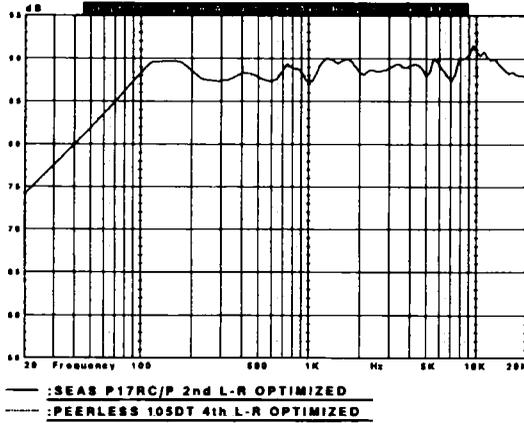


Figure 8.96

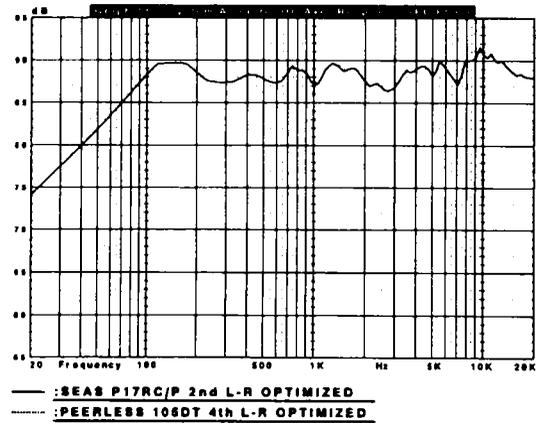


Figure 8.99

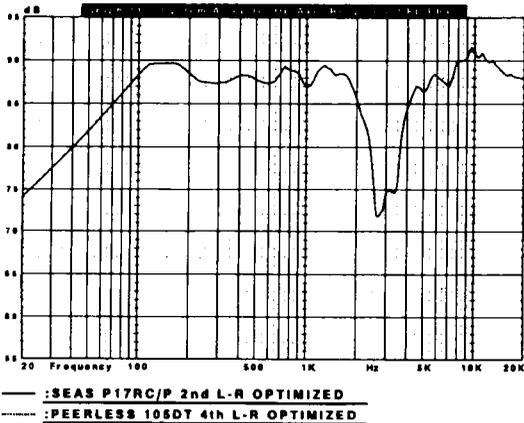


Figure 8.97

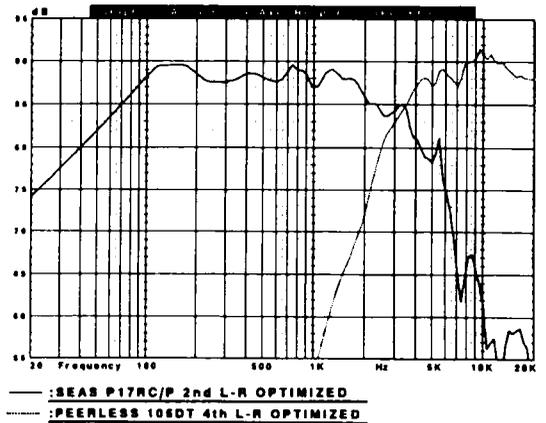


Figure 8.100

avec une incidence nulle par rapport à la normale. La hauteur par rapport au sol est d'environ 1 m (38"), et l'axe du prototype est pris au milieu, entre le haut-parleur passe-haut et le haut-parleur passe-bas (pour les enceintes à trois voies, on pointe le micro entre le haut-parleur médium et le haut-parleur d'aigus). Une autre école demande de placer le microphone de mesure à 2 ou 3 m de l'enceinte, car cette distance correspondrait plus à la distance d'écoute moyenne de l'auditeur [15]. Cette distance, plus élevée, requiert des conditions de mesure quasi anéchoïques si l'expérimentateur veut mesurer des signaux qui ne soient pas trop perturbés par de nombreuses réflexions, surtout dans les basses fréquences.

Une bonne réponse en puissance est tout aussi importante. Lors de tests dirigés par Floyd Toole au *Canada National Research Council*, les enceintes acoustiques qui ont donné les meilleurs résultats avaient toutes non seulement une bonne courbe de réponse dans l'axe, mais également une bonne courbe de réponse en puissance [24]. Si l'expérimentateur choisit une fréquence de coupure dans une zone de fréquence où la courbe hors axe du haut-parleur change rapidement, la directivité en sera fortement affectée. De grandes

perturbations dans la courbe de réponse hors axe altèrent la réponse en puissance telle que la perçoit l'auditeur. Les nombreuses réflexions et diffractions ont des spectres qui diffèrent beaucoup de la courbe de réponse mesurée dans l'axe, et amoindrissent généralement la qualité subjective globale de l'enceinte.

Voici deux techniques pour déjouer le risque, dans la zone de coupure du filtre, d'une mauvaise courbe de réponse dans l'axe. Premièrement, évitez de choisir votre fréquence de coupure du filtre dans une zone où, hors axe, la courbe de réponse change beaucoup. Il n'est pas toujours possible de résoudre ce problème lors de la mise au point d'enceintes acoustiques, surtout si elles sont à deux voies. Deuxièmement, n'hésitez pas à définir votre enceinte, et donc votre filtre, en fonction de mesures faites hors axe, ce qui implique qu'il faudra bien entendu admettre le résultat à 0° (dans l'axe) tel qu'il est. Compte tenu du fait que la plupart des auditeurs écoutent fréquemment leurs enceintes hors axe, avec par exemple des moniteurs de studio ou des enceintes en champ rapproché, on peut considérer qu'une telle enceinte mise au point sous une incidence horizontale de 15° à 20° donnera des résultats souvent plus homogènes.

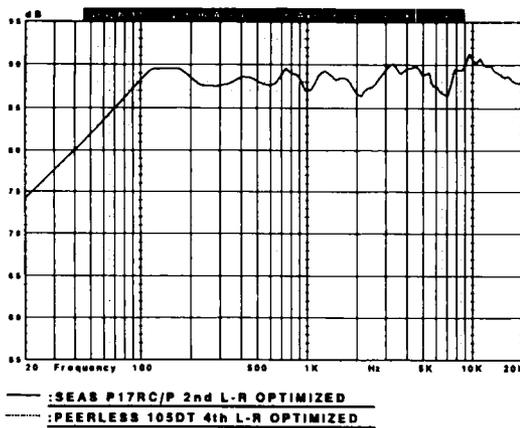


Figure 8.101

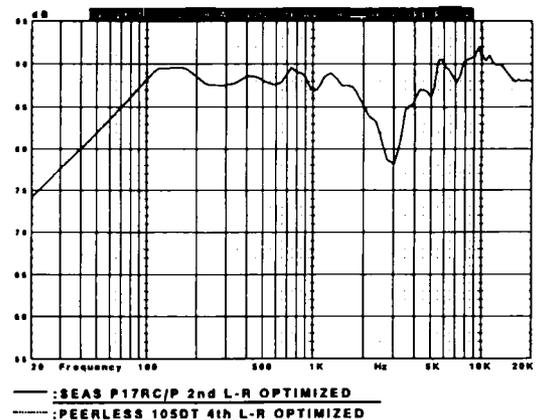


Figure 8.102

8.5 Compensation de la variation de l'impédance du haut-parleur

Lors de la mise au point de vos filtrés, et plus précisément pour compenser la variation d'impédance des haut-parleurs, que vous travaillez par tâtonnements ou que vous utilisez un logiciel qui optimise vos filtrés, un complément à ne pas négliger est le circuit de compensation de l'impédance. Bien que les logiciels pratiquent l'optimisation des filtrés, il reste que, dans les enceintes du commerce, les circuits correcteurs d'impédance sont toujours très fréquents. Les deux grandes anomalies relevées, lorsque l'on étudie la variation de l'impédance en fonction de la fréquence, sont : la fréquence de résonance du haut-parleur et la montée de la valeur de l'impédance avec la fréquence à cause de l'accroissement de l'inductance de la bobine mobile [25,26]. Voir figure 8.103. Les pics de résonance peuvent être corrigés par des filtrés séries RLC du type anti-résonant, décrits en détail dans le paragraphe 8.5.1. Ces filtrés peuvent s'appliquer à tout type de haut-parleur : haut-parleur de graves, médium ou haut-parleur d'aigus. Mais si vous voulez corriger quelque résonance de fréquence très basse, attendez-vous à manipuler des condensateurs et des selfs de forte valeur. On rencontre fréquemment ce type de circuit anti-résonant LRC pour corriger des résonances dans la zone des 80 à 100 Hz d'enceintes satellites, qui font partie d'un ensemble "triphonique" c'est-à-dire complétées par un unique caisson de graves.

Si vous devez compenser l'inductance d'une bobine mobile, un simple circuit RC fera l'affaire ; pour plus d'informations, reportez-vous au paragraphe 8.5.2. Cette technique est généralement réservée aux filtrés pour haut-parleurs de graves et haut-parleurs de médium. Mais on les utilise aussi avec les haut-parleurs d'aigus pour avoir une courbe d'impédance plate jusque vers 100 kHz, ce qui représente une charge constante pour

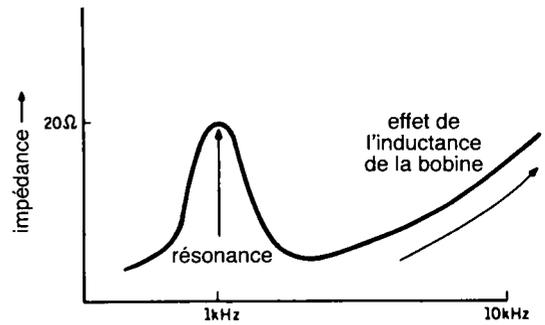


Figure 8.103 : Courbe d'impédance d'un haut-parleur d'aigus à dôme.

l'amplificateur de puissance, et on les utilise également pour corriger quelque peu la partie haute de la courbe de réponse du haut-parleur d'aigus.

8.5.1 Circuits anti-résonants séries

La première fonction du circuit de la figure 8.104 est d'amortir la résonance du haut-parleur et d'éliminer ses effets sur le filtre. Par contre, si le haut-parleur a été traité au Ferrofluid, la résonance aura déjà été amortie mécaniquement, et cette correction ne sera pas améliorée par l'adjonction d'un circuit anti-résonant. Si, par exemple, le haut-parleur a un pic de résonance non amortie, et que ce pic est situé à moins de deux octaves d'une fréquence de coupure d'un filtre passe-haut, dans ce cas, le circuit anti-résonant améliorera nettement les caractéristiques de ce haut-parleur. Ce type de circuit est particulièrement indiqué pour les haut-parleurs d'aigus à dôme, les médiums à dôme et les haut-parleurs médiums à cône dont la fréquence de résonance du coffret est au-dessus de 200 Hz. Il n'est pas interdit d'utiliser ce principe pour des fréquences de résonance situées quelques octaves plus bas, mais la valeur des composants à mettre en œuvre est très grande, surtout pour les selfs.

**Formules de calcul
d'un circuit anti-résonant**

$$C = \frac{0,1592}{R_E Q_{es} f_s}$$

$$L = \frac{0,1592 \cdot (Q_{es} R_E)}{f_s}$$

$$R_c = R_E + \frac{Q_{es} R_E}{Q_{ms}}$$

Amplitude de l'impédance :

$$Z = R_c^2 + \left(6,2832 f L - \frac{0,1592}{f C} \right)^2$$

Angle de la phase :

$$\Phi^\circ = \arctan \left[\frac{6,2832 L - \left(\frac{1}{6,2832 C} \right)}{R_c} \right]$$

Notes : Il faut inclure la valeur de la résistance de la self L dans R_c , mais vous pouvez aussi choisir une section appropriée de cuivre émaillé pour que, lors de la fabrication de la self L, sa résistance en courant continu soit exactement la valeur de la résistance R_c .

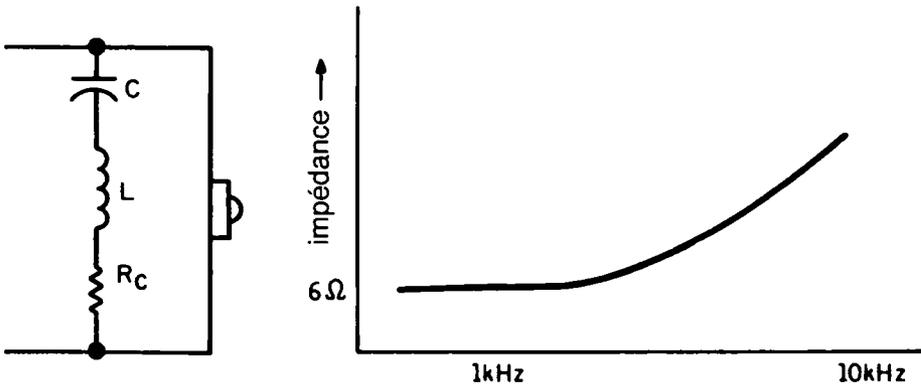


Figure 8.104 : Filtre anti-résonant série.

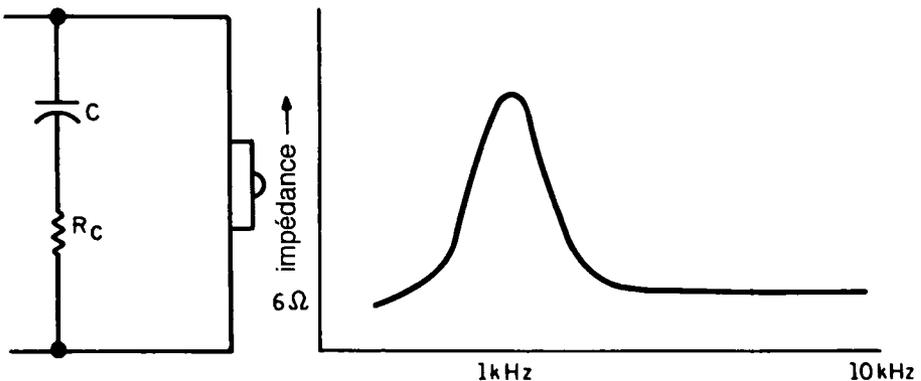


Figure 8.105 : Circuit de compensation d'impédance.

Une méthode résumée, qui ne nécessite pas la connaissance des paramètres Q du haut-parleur, sera :

$$C = \frac{0,03003}{f}$$

$$L = \frac{0,2252}{f^2 C}$$

R_c = valeur approchée de l'impédance nominale du haut-parleur

Contrôlez les circuits décrits ci-dessus en relevant une courbe d'impédance du haut-parleur et de l'ensemble haut-parleur plus circuit anti-résonant. Si la courbe d'impédance compensée n'est pas assez plate, essayez d'augmenter la résistance R_c par pas de 0,5 Ω , jusqu'à ce que la courbe d'impédance vous convienne.

8.5.2 Egalisation de la courbe d'impédance

Tous les haut-parleurs à bobine mobile ont une impédance qui augmente avec la fréquence à cause de la réactance de la bobine mobile. Afin que les filtres passe-bas des haut-parleurs de graves et des haut-parleurs médiums puissent travailler dans de bonnes conditions, vous pouvez corriger cette augmentation de l'impédance avec le circuit RC de la figure 8.105. Vous pouvez également utiliser ce circuit avec un haut-parleur d'aigus à dôme, non pour adapter son impédance au filtre, mais pour atténuer une certaine dureté du son ou pour faciliter l'application des circuits d'atténuation en L.

Formules de calcul

$$C = \frac{L_e}{R_c^2}$$

L_e inductance du haut-parleur en henrys
 R_c 1,25 $\times R_E$

Les valeurs de la résistance R_c et du condensateur C sont approximatives. Vous aurez à les ajuster par tâtonnements successifs pour obtenir une courbe d'impédance qui soit plate à la mesure.

8.6 Circuits d'atténuation pour haut-parleur

L'efficacité des haut-parleurs d'aigus et des haut-parleurs de médium est généralement meilleure que celle de la plupart des haut-parleurs de graves ; cette différence s'entend facilement. Afin d'obtenir une courbe de réponse globale homogène, vous devez ajuster les différents niveaux des haut-parleurs d'une même enceinte acoustique. La meilleure façon d'y arriver est d'utiliser des atténuateurs en L, ou des ensembles de plusieurs de ces atténuateurs, que vous commuterez suivant vos désirs, afin d'obtenir différents niveaux d'atténuation pour compenser l'acoustique de la pièce d'écoute ou pour satisfaire vos préférences sonores.

Toutefois la prudence est de mise lors de l'emploi des atténuateurs à résistances pour corriger les différences d'efficacité entre haut-parleurs. À la moindre erreur, le filtre peut "voir" une autre impédance globale de charge, différente du niveau pour lequel il a été calculé ; alors une dérive inattendue de la fréquence de coupure se produira là où le filtrage est le plus sensible. Les paramètres suivants seront calculés ou tirés des documents du fabricant :

1. La sensibilité nominale de chaque haut-parleur en dB (D_s)*

(* Note : Les sensibilités mesurées par les fabricants sont exprimées en 1 W/1 m, pour une mesure en bande large, mais comme il y a souvent des déformations importantes dans les courbes de réponses (comme la bosse due à la résonance qui se produit juste avant l'effondrement général

du niveau sonore, phénomène typique de tous les haut-parleurs de graves dont la bobine mobile est à deux couches), les résultats annoncés ne sont guère exploitables. Une méthode plus efficace est de déduire la sensibilité à partir d'une portion significative et linéaire de la courbe de réponse qui a été relevée à 1 W / 1 m.)

2. L'atténuation totale, en dB, est égale à (résistance de source de l'amplificateur) + (résistance totale des selfs), où :

$$R_t = 20 \log_{10} \frac{R_m + (R_G + R_L)}{R_m}$$

- R_t perte totale d'insertion en dB
- R_m impédance réelle du haut-parleur, incluant celles de tous les circuits de compensation
- R_G résistance de source de l'amplificateur (cf. chapitre 9)
- R_L résistance série des selfs mesurées en courant continu

3. Si nécessaire, gain en passe-bande exprimé en dB (B_G), quand la sensibilité totale du haut-parleur (D_{ts}) est égale à :

$$D_{ts} = D_s + B_G - R_t$$

Avec cette méthode, les différences entre les sensibilités des haut-parleurs des registres grave, médium et aigu sont faciles à déterminer.

Maintenant que vous connaissez le niveau d'atténuation requis, vous avez le choix entre deux types de circuits d'atténuation : soit une simple résistance série, soit un atténuateur en L, comme celui de la figure 8.106. La résistance série convient, à condition de corriger les valeurs de votre filtre de façon à tenir compte de l'augmentation de la résistance totale du haut-parleur. Cette technique augmente non seulement la taille des selfs mais aussi les pertes d'insertion. Un atténuateur en L préserve l'impédance minimale du haut-parleur tout en effectuant son atténuation, à condition que vous compensiez les variations

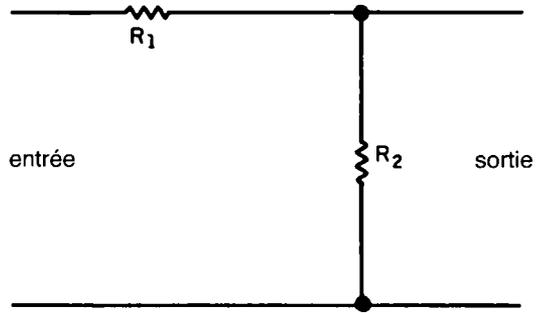


Figure 8.106 : Circuit d'atténuation.

d'impédance du haut-parleur par des circuits appropriés [27].

Formules de calcul

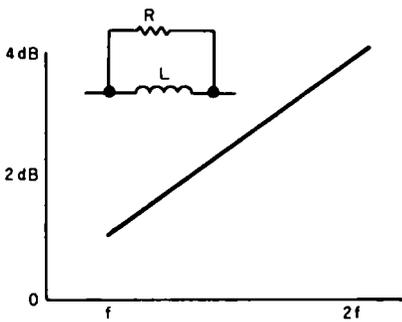
$$R_2 = \frac{10^{(A/20)} \cdot Z}{1 - 10^{(A/20)}}$$

$$R_1 = Z - \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{Z} \right)^{-1}$$

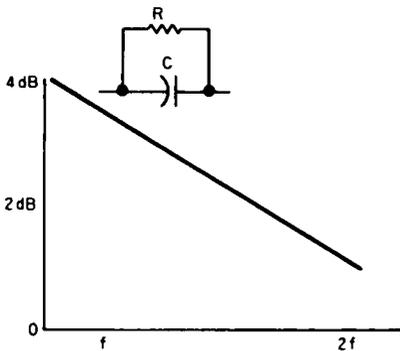
- Z impédance totale du haut-parleur
- A montant de l'atténuation requise en -dB (décibels négatifs, par ex. -3 dB)

8.7 Circuits de correction de courbe de réponse

Mis à part les filtres et les circuits de compensation d'impédance, il y a deux autres types de circuits qui permettent de modifier la courbe de réponse d'un haut-parleur. Pour arriver à obtenir des résultats viables avec ces deux circuits, le circuit de correction (RL ou RC) et le circuit anti-résonant parallèle, il faut généralement procéder par tâtonnements ; les informations suivantes vous guideront en vous donnant notamment des ordres de grandeur pour un premier essai.



a)



b)

Figure 8.107 : Circuits de correction de type RL et RC.

a) Les circuits de correction de type RL ou RC. La figure 8.107 montre les deux circuits RL et RC, qui, malgré leur simplicité, permettent de compenser une montée en niveau quand la fréquence varie dans les cas suivants :

A. le niveau d'amplitude de la courbe croît avec la fréquence ;

B. le niveau d'amplitude de la courbe croît quand la fréquence décroît (figure 8.108).

Procédure à suivre

1) Calculez la valeur du composant pour la fréquence où l'atténuation devrait être la plus faible (la fréquence où commence la montée en niveau de la bosse). La réactance du composant (L ou C) sera de 1 Ω à cet endroit, avec :

(A) pour L, $L = \frac{0,15916}{f}$

L inductance en henrys
 f fréquence à laquelle la réactance est minimale, en hertz

(B) pour C, $C = \frac{0,15916}{f}$

C capacité en farads
 f fréquence à laquelle la réactance est minimale, en hertz

2) La résistance R est choisie de telle manière que l'impédance totale du nouvel ensemble soit égale au niveau maximum d'atténuation nécessaire (ou à la moyenne, si la forme de la bosse n'est pas bien définie), avec :

$$Z = \frac{R X}{(R^2 + X^2)^{1/2}}$$

Z impédance totale du circuit
 X réactance du composant à la fréquence où l'atténuation est maximale (voir le paragraphe 8.2 pour les formules concernant la réactance)

3) L'atténuation en décibels se calcule à partir de :

$$A_t = 20 \log_{10} \frac{R_d + Z}{R_d}$$

A_t atténuation en dB
 R_d impédance totale du haut-parleur, y compris les circuits de compensation

Prenons, par exemple, un circuit de type A pour corriger une augmentation en niveau avec la montée qui commence à 250 Hz et culmine à 5 kHz avec +10 dB.

$$L = \frac{0,15916}{250}$$

0,63 mH a une réactance de 20 Ω à 5 kHz. Le tableau 8.1 donne différentes valeurs d'atténuation en fonction de la résistance R.

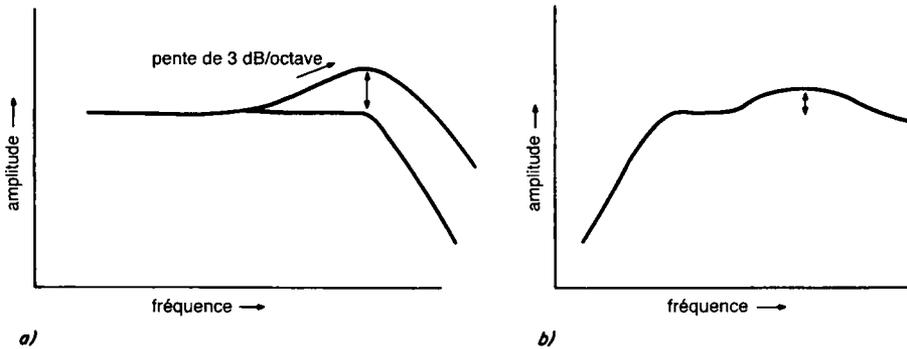


Figure 8.108 : Courbes de réponse (a) dont l'amplitude monte avec la fréquence et (b) dont l'amplitude monte quand la fréquence diminue.

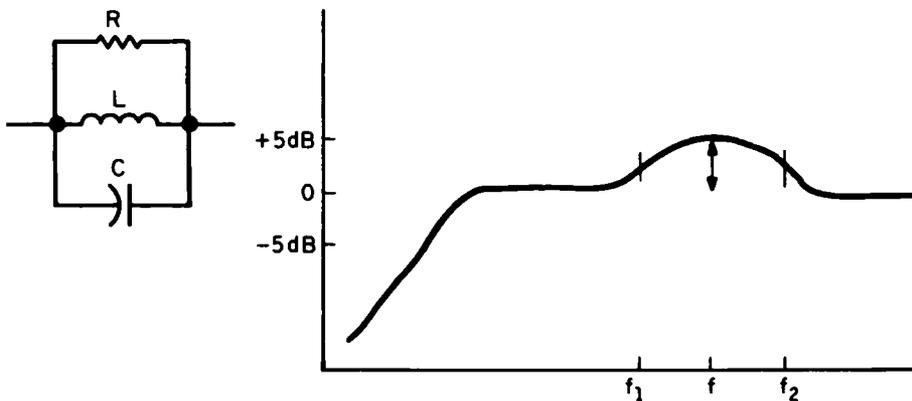


Figure 8.109 : Circuit anti-résonant parallèle.

Il est difficile d'établir des règles précises et rapides pour ces types de filtres ; en d'autres mots, ici aussi les tâtonnements prévaudront. Pour le calcul du filtre, il est important de ne pas oublier d'inclure, lors de la mesure de l'impédance du haut-parleur, les différents circuits de correction ainsi que les circuits de compensation d'impédance.

b) Les circuits anti-résonants parallèles.

Ce circuit, représenté en figure 8.109, peut corriger d'importants pics d'amplitude. La courbe de réponse montre une situation classique pour une application de ce type :

Tableau 8.1	
Atténuation pour diverses valeurs de R	
RΩ	A _t
25	10,6 dB
20	10,0 dB
15	9,0 dB
10	7,5 dB
5	4,8 dB

Procédure à suivre

Déterminez la fréquence centrale f et l'amplitude en dB du pic. Précisez également les fréquences f_1 et f_2 définies à -3 dB, puis :

$$C = \frac{0,03003}{f} \text{ en farads}$$

$$L = \frac{0,02252}{f^2 C} \text{ en henrys}$$

$$R = \frac{1}{6,2832 C B}$$

$B =$ largeur de bande définie à -3 dB ($f_1 - f_2$)

L'impédance du circuit est donnée par :

$$Z = \frac{1}{\left[\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{6,2832 f C} - 6,2832 f C \right)^2 \right]^{1/2}}$$

L'atténuation totale est donnée par :

$$A_t = 20 \log_{10} \frac{R_d + Z}{R_d}$$

L'angle de la phase, en degrés, est donné par :

$$\Phi^\circ = \arctan R \left(\frac{1}{6,2832 f_L C} - 6,2832 f C \right)$$

Malheureusement, le circuit anti-résonant parallèle n'est pas aussi facile à calculer que son équivalent série. La résistance série, présente dans la self, transforme le filtre parallèle en filtre série-parallèle. La qualité du filtre dépendra également beaucoup du facteur de fuite des condensateurs utilisés (les condensateurs au mylar ou au polypropylène donneront des résultats différents de ceux obtenus avec des condensateurs électrochimiques). Devant ces nombreux facteurs, le mieux est

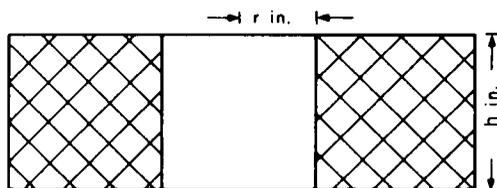


Figure 8.110 : Self à air.

de commencer avec les valeurs obtenues par le calcul, en prenant soin de réduire autant que possible la valeur de la résistance (au courant continu) de la self, puis d'augmenter, par paliers successifs, la valeur de la résistance R jusqu'à obtention de l'effet désiré (en augmentant la valeur de R , on augmente le trou ou coefficient de surtension Q du filtre). Les formules ci-dessus donnent un rapport L/C qui provoque une réjection assez étroite (coefficient Q élevé) pour la plupart des pics (résonances) rencontrés. Si le circuit anti-résonant doit corriger une altération de la courbe sur plusieurs octaves, il faut utiliser, pour les condensateurs C , des valeurs plus faibles et proportionnellement, des valeurs de selfs L plus grandes. Aussi longtemps que la valeur calculée du produit $L \times C$ est constante et identique à celle des formules initiales, la fréquence de résonance du circuit ne changera pas. À l'inverse, si une bande de réjection plus étroite est nécessaire, il faut augmenter la valeur de C et diminuer celle de L en proportion. Une excellente présentation graphique des filtres réjecteurs a été publiée dans *Speaker Builder*, par David Weemsen en février 1986, sous le titre *Notch Filters*. Dans cet article, les graphes et tableaux sont à prendre avec précaution, c'est-à-dire uniquement à titre indicatif pour les valeurs des composants, car la résistance des selfs et les facteurs de fuite des condensateurs n'y sont pas spécifiés.

8.8 Selfs pour filtre

Pour les filtres de haut-parleurs, deux types de selfs sont essentiellement utilisés : les selfs à air et les selfs à noyau métallique. Les selfs à noyau métallique, qui utilisent des circuits magnétiques de transformateurs ou différents types de ferrites, sont utilisées là où une forte valeur d'inductance, couplée à une faible résistance, ne peut être obtenue avec des selfs à air. Les selfs à noyau métallique sont loin d'être le composant idéal, elles ont le défaut de saturer et de provoquer de la distorsion aux niveaux élevés. La bi-amplification est une solution à envisager, si les valeurs des selfs deviennent trop importantes lors du filtrage avec un caisson de graves (*subwoofer*). Comme nous le verrons plus loin, si vous n'avez pas de problème de place, vous pouvez très bien utiliser des selfs à air de forte valeur et de faible résistance interne.

Si vous disposez d'un outillage approprié, ou mieux d'une bobineuse (de préférence motorisée) et d'un pont de mesure, les selfs à air sont une solution acceptable pour quelqu'un qui fabrique ses propres enceintes acoustiques. À défaut d'équipement adéquat, il vaut mieux se rabattre sur les selfs du marché. Je sais, pour en avoir fabriqué des milliers, que le seul fait d'envisager le bobinage manuel me décourage d'avance. Mais si vous êtes armé de la patience nécessaire, sachez que, malgré l'absence d'une bobineuse, la tâche est loin d'être impossible. Les selfs devront être mesurées avec soin (comme tous les autres composants du filtre, et ce avant leur implantation).

La méthode décrite par Thiele relie plutôt la taille physique de la self à la constante de temps réactive, nécessaire à la fréquence de filtrage, au lieu de se limiter simplement à la valeur de l'inductance [30,31]. En conséquence de quoi, ces selfs sont fréquemment plus volumineuses que celles que l'on est habitué à voir dans les enceintes acoustiques de série. Ces selfs, plus grandes, ont leur

résistance interne optimisée afin qu'elle perturbe le moins possible le coefficient Q du haut-parleur associé.

Pour les calculs, la valeur de la résistance (au courant continu) de la self est habituellement fixée à $1/20$ de la valeur de l'impédance du haut-parleur (y compris les circuits de compensation d'impédance) à la fréquence de coupure du filtre. D'après Thiele, cette valeur est tolérable, car elle ne perturbe pas trop le coefficient Q du haut-parleur. Pour un haut-parleur qui a une impédance de 8Ω , nous aurons $0,4 \Omega$, et pour un haut-parleur de 4Ω , cela fera $0,2 \Omega$, etc...

En fonction des besoins, deux formes de self A et B sont employées. Le type A est valable en principe en toutes circonstances, sauf pour de petites valeurs d'inductance s'appliquant au filtrage de fréquences élevées, cas où parfois on a besoin d'un très petit format. Le type B est un format adapté aux petits noyaux pour pouvoir fabriquer de petites inductances. La figure 8.110 illustre le dessin de base qui s'applique aux deux modèles dont les calculs sont faits à partir des formules suivantes :

R	résistance interne de la self (mesurée en courant continu)
H	hauteur du noyau en pouces
d	diamètre du fil
L	inductance en microhenry (6,5 mH = 650 μ H)
N	nombre de tours de bobinage
r	rayon du noyau en pouces

$$\begin{aligned}
 & \text{(A)} \\
 & r = H \\
 & H = \left(\frac{L}{5590 \cdot R} \right)^{1/2} \\
 & N = 3,94 \left(\frac{L}{H} \right)^{1/2} \\
 & d = \frac{0,841 H}{\sqrt{N}}
 \end{aligned}$$

$$r = 2H$$

$$H = \left(\frac{L}{6170 R} \right)^{1/2}$$

$$N = 2,61 \left(\frac{L}{H} \right)^{1/2}$$

$$d = \frac{0,738 H}{\sqrt{N}}$$

Tableau 8.2			
Conversion (approx.) diamètre calibre US			
diamètre		calibre	Ω/1K'
(en pouces)	(en mm)		
0,10190	3,2	10	0,9989
0,09074		11	1,260
0,08081	2,6	12	1,588
0,07196		13	2,003
0,06408	2,0	14	2,525
0,05707		15	3,184
0,05082	1,6	16	4,016
0,04526		17	5,064
0,04030	1,2	18	6,385
0,03589		19	8,051
0,03196	0,9	20	10,150
0,02845	0,8	21	12,800
0,02535	0,7	22	16,140
0,02257	0,6	23	20,360
0,02100	0,55	24	25,670
0,01790	0,5	25	32,370
0,01594	0,45	26	40,810

Le tableau 8.2 sert à convertir les diamètres des fils en calibres standard. Vous choisirez le calibre le plus proche du diamètre de fil que vous aurez calculé. Si vous n'avez jamais acheté du fil de cuivre émaillé pour bobiner des selfs, sachez que vous pourrez vous en

procurer chez les fournisseurs de moteurs électriques, qui en vendent en grosses bobines pour refaire des bobinages de moteur.

Quand vous arrondissez la valeur de r pour utiliser un noyau de dimension standard (r arrondi à 0,5" au lieu de 0,46"), n'oubliez pas que le nombre de spires va changer. Si la correction à faire est proche du nombre de tours initialement calculé, gardez cette valeur N comme objectif. Vous rectifierez la valeur finale de votre self, après l'avoir mesurée, simplement en enlevant ou en rajoutant quelques tours.

Dans les situations où de grands diamètres de fil de cuivre émaillé sont nécessaires, comme par exemple des calibres de 10 ou 12, vous pouvez bobiner votre self avec plusieurs fils de calibres inférieurs. Le tableau 8.3 donne des équivalents de bobinages entre des fils de gros calibres et de multiples fils de petits calibres.

Tableau 8.3		
Equivalence entre fil unique et fils multiples		
nombre de fils	calibre	calibre équivalent
2	18	15
3	18	13
4	18	12
2	16	13
3	16	11
4	16	11

Par exemple, une self de 4 mH avec une résistance en courant continu de 0,4 Ω aura les caractéristiques suivantes :

$$H = 1,33"$$

$$r = 1,33"$$

$$N = 216 \text{ spires}$$

$$d = 0,07663 \text{ soit calibre } 12,$$

ou un ensemble de 4 fils de calibre 18

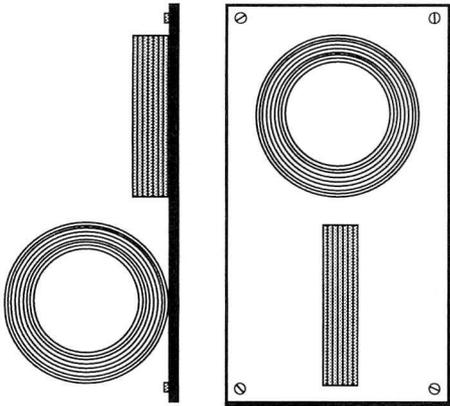


Figure 8.111 : Implantation perpendiculaire des selfs sur le circuit.

La stabilité mécanique des selfs s'obtient en ficelant le bobinage avec des tresses en nylon, puis en le plongeant dans un vernis à émailler (comme le Glyptol).

Lors de l'implantation des composants sur le circuit imprimé de votre filtre, éloignez les selfs le plus possible les unes des autres et placez les perpendiculairement les unes par rapport aux autres (voir figure 8.111). Si la distance entre les selfs est d'au moins 75 mm (3") et que le montage est fait à angle droit, vous éviterez le couplage magnétique entre les différentes sections du filtre [32].

Il est préférable d'acheter les selfs à noyau métallique, car les noyaux métalliques ne sont généralement pas disponibles en petites quantités pour l'amateur. Les selfs faites avec des carcasses ou des barres en ferrite, des noyaux en fer ou des feuilles métalliques, ne sont pas parfaitement linéaires et leur inductance varie avec la puissance d'entrée [33]. Les selfs à noyau les plus linéaires et les plus onéreuses sont les selfs toriques de type MPP.

8.8.1 Condensateurs pour filtres d'enceintes acoustiques

Le choix du type de condensateur à utiliser dans les filtres se détermine généralement à partir de son facteur de fuite et de son coût. Cela revient habituellement à employer des condensateurs à film plastique (comme le mylar ou le polypropylène) pour des valeurs jusqu'à 20 μF , dans les sections de filtre pour le haut-parleur médium et pour le haut-parleur d'aigus, et d'utiliser des condensateurs électrochimiques non-polarisés, dans la plupart des autres cas. Certains condensateurs non-polarisés sont de si bonne qualité qu'ils peuvent néanmoins être utilisés dans presque tous les cas. Malheureusement, la majorité des condensateurs non-polarisés, spécialisés pour les enceintes acoustiques, sont d'origine asiatique et de moindre qualité. L'une des manières d'améliorer la qualité "sonore" de ces condensateurs économiques non-polarisés est de mettre en parallèle un deuxième condensateur de type polypropylène de petite valeur (0,1 à 1 μF). Une autre solution est de mettre en parallèle plusieurs condensateurs de faible valeur au lieu d'un seul de grande capacité. Dans cette méthode, la partie résistive et inductive est également mise en parallèle et le résultat final est nettement supérieur à celui obtenu par un seul composant.

Les condensateurs non-polarisés sont moins stables dans le temps que les condensateurs à film plastique ; il est important de noter que les condensateurs (et les selfs) doivent être mesurés à la fréquence à laquelle ils fonctionneront [34]. Si l'on dispose d'un analyseur, comme le LinearX LMS, ou d'un pont de mesure à fréquence variable (à l'opposé de la valeur fixe standard de 1 kHz), les mesures des composants du filtre sont à faire à la fréquence de coupure qui les concerne (ou à la fréquence précise de réjection pour le circuit anti-résonant) ainsi que dans la zone d'atténuation à une octave au-delà de la fréquence de coupure.

8.8.2 Filtres passifs perfectionnés

Une étude détaillée des techniques de perfectionnement des filtres passifs pour haut-parleurs n'est pas du ressort de ce livre, mais on la trouvera dans un ouvrage complémentaire : *Loudspeaker Recipes, Book 1 : Four Two-Way Systems*. Le livre *Loudspeaker Recipes* est un manuel de conception de filtres pour haut-parleurs qui, à partir de quatre exemples d'enceintes acoustiques à deux voies, étudie les différents aspects de la conception des filtres, y compris certains aspects, comme la compensation des temps de propagation par modification de filtres ou l'importance de la mise en phase des haut-parleurs, lors de l'étude du filtre. Ce livre est disponible chez Old Colony Sound, PO Box 243, Peterborough, N. H., 03458-6243.

8.9 Filtres actifs

Les filtres actifs sont composés de circuits électroniques de très faible puissance dont les sections passe-haut et passe-bas sont insérées entre le préamplificateur et l'étage de puissance d'un système bi- ou tri-amplifié (voir figure 8.112). La technique de bi- ou tri-amplification est utilisée en concert depuis de nombreuses années pour des sonorisations de haute qualité. Sa complexité et son coût trop élevé, par rapport à la simplicité du filtre passif allié à un unique amplificateur, expliquent son faible succès auprès du public. Toutefois, ses performances et ses caractéristiques méritent qu'on s'y intéresse. Les principaux avantages du filtre actif sont les suivants :

1) Une plus faible distorsion d'intermodulation, car l'amplificateur travaille dans une bande de fréquences plus étroite [20]. La saturation de l'étage de puissance jusqu'à l'écrêtage, à cause des très basses fréquences, est également réduite, car un seul haut-parleur est alimenté dans un système multi-voies.

- 2) Une augmentation de la dynamique. Dans un système bi-amplifié, constitué d'un amplificateur de 60 W et d'un autre de 30 W, l'écrêtage se manifestera à un niveau qui correspond à environ 175 W sur un amplificateur classique, alimentant les haut-parleurs à travers un filtre passif [35].
- 3) Les performances transitoires sont améliorées [36].
- 4) Une meilleure liaison entre l'étage de puissance de l'amplificateur et les haut-parleurs de graves, une absence des résonances de haut-parleur d'aigus induites par les filtres passifs (meilleur amortissement du haut-parleur).
- 5) Un filtrage de meilleure qualité, car la charge des différentes sections du filtre est d'impédance constante.
- 6) Un son de meilleure qualité lors de comparaisons subjectives avec des filtres passifs de haute qualité [37].
- 7) Un ajustement aisé des différentes sensibilités des haut-parleurs.
- 8) Une plus grande facilité pour intervenir sur la phase, la compensation des temps de propagation, les résonances, et de nombreuses méthodes pour modifier la courbe de réponse, comme l'utilisation de circuits de correction ou l'égalisation [3].

Deux configurations à vocation domestique sont présentées dans la figure 8.112. La configuration bi-amplifiée consiste habituellement en un caisson de graves unique, équipé d'un seul haut-parleur alimenté par un seul amplificateur, complété par des enceintes satellites et un filtre actif dont la fréquence de coupure est comprise entre 100 et 300 Hz, avec une atténuation de 18 à 24 dB/octave. L'enceinte satellite est une petite enceinte à deux voies, munie d'un filtre passif avec une fréquence de coupure de 2 à 3 kHz (l'unique caisson central est inférieur, en termes de qualité d'image sonore, à deux caissons de graves indépendants ; ce fut à l'origine une invention d'ordre économique, consistant à réduire les coûts de fabrication). La configuration tri-amplifiée n'est fondamentalement qu'une

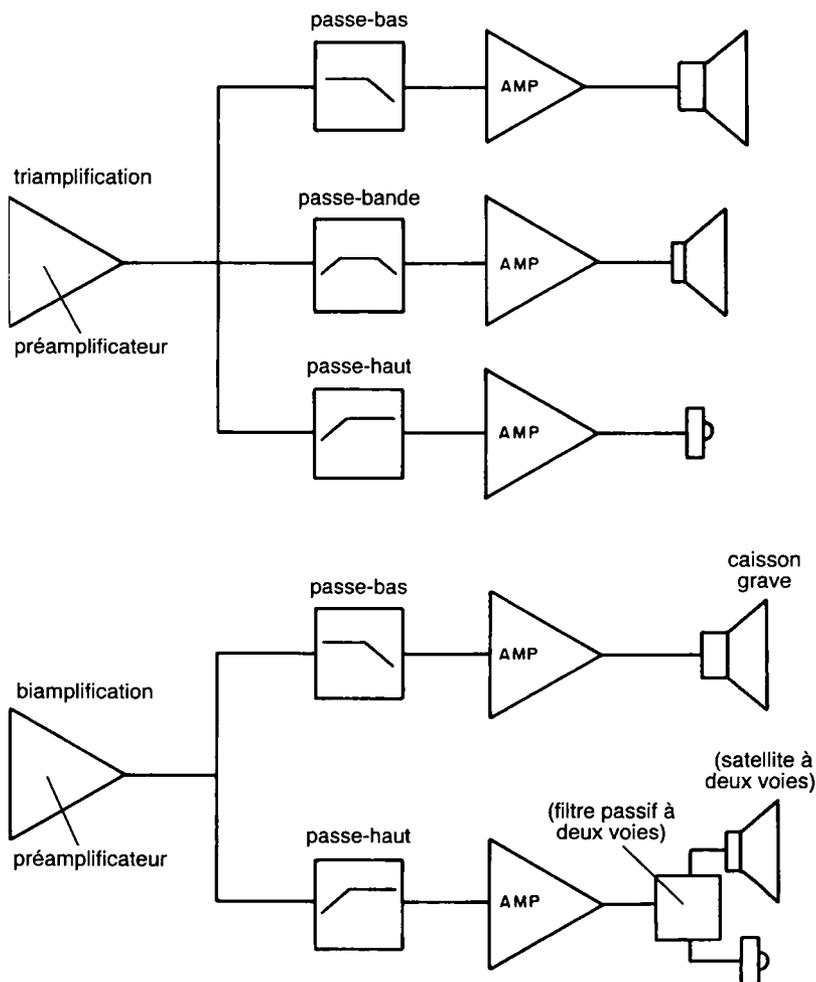


Figure 8.112 : Exemples de filtrage actif et de filtrage mixte.

extension du système bi-amplifié, où un filtre actif et un amplificateur supplémentaire ont remplacé le filtre passif. C'est la configuration avec laquelle l'intervention sur la phase et sur la courbe de réponse du système est la plus aisée.

L'étude détaillée de la conception des filtres actifs n'entre pas dans le cadre de ce livre ; c'est pourquoi nous vous recommandons les publications suivantes :

1. **S. Linkwitz**, *A Three Enclosure Loudspeaker System*, *Speaker Builder*, 2, 3, 4 / 80
2. **R. Ballard**, *An Active Crossover Filter with Phase Correctors*, *Speaker Builder*, 3, 4 / 82

3. Ed Dell, *Electronic Crossovers Revisited*, *Speaker Builder*, 3 / 82 et 3 / 85
4. R. Bullock, *Passive Crossover Networks-Active Realizations of Two-Way Designs*, *Speaker Builder*, 3 / 85
5. W. G. Jung, articles divers, *Audio Amateur*, 1,2, 4 / 75 et 2 / 76
6. P. Hillman, *Symmetrical Speaker System with Dual Transmission Lines, Part II*, "Speaker Builder 6 / 89
7. R. Parker, *A Tri-amplified Modular System*, *Speaker Builder* 5 / 90

La plupart des références citées ci-dessus sont complétées par les circuits imprimés des filtres ainsi que les composants, ceux-ci sont disponibles auprès de la société Old Colony Sound Lab, PO Box 243, Peterborough, N.H. 03458-0243.

Bibliographie

1. C. P. Boegli, *Interference Effects with Crossover Networks*, *Audio*, 11 / 56
2. J. Ashley & L. Henne, *Operational Amplifier Implementation of Ideal Electronic Crossover Networks*, *JAES*, 1 / 71
3. S. Linkwitz, *Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers*, *JAES*, 1-2 / 76; *Passive Crossover Networks for Noncoincident Drivers*, " *JAES*, 3 / 78
4. P. Garde, *All-Pass Crossover Systems*, *JAES*, 9 / 80
5. W. M. Leach, *Loudspeaker Driver Phase Response: The Neglected Factor in Crossover Design*, *JAES*, 6 / 80
6. R. M. Bullock, III, *Loudspeaker Crossover Systems: An Optimal Crossover Choice*, *JAES*, 7-8 / 82
7. R. M. Bullock, III, *Passive Three-Way All-Pass Crossover Networks*, *JAES*, 9 / 84
8. S. Lipshitz & J. Vanderkooy, *A Family of Linear-Phase Crossover Networks of High Slope Derived by Time Delay*, *JAES*, 1-2 / 83
9. J. Vanderkooy & S. Lipshitz, *Is Phase Linearization of Loudspeaker Crossover Networks Possible by Time Offset and Equalization?* *JAES*, 12 / 84
10. S. Lipshitz & J. Vanderkooy, *Use of Frequency Overlap and Equalization to Produce High-Slope Linear-Phase Loudspeaker Crossover Networks*, *JAES*, 3 / 85
11. W. F. Harms, *Series or Parallel?*, *Hi-Fi News & Record Review*, 12/80
12. R.C. Heyser, *Loudspeaker Phase Characteristics and Time Delay Distortion: Part I*, *JAES*, 1 / 69
13. R. Gonzalez & J. D'Appolito, *Electroacoustic Model*, *Speaker Builder* 4 / 89
14. S. Linkwitz, *Shaped Tone-Burst Testing*, *JAES*, 4 / 80
15. L. Fincham, *Multiple Driver Loudspeakers, Chapter 4*, *Loudspeaker and Headphone Handbook*, revu par John Borwick, Butterworth & Co
16. D. Fink, *Time Offset and Crossover Design*, *JAES*, 9 / 80
17. R.M. Bullock, *Satisfying Loudspeaker Crossover Constraints with Conventional Networks—Old and New Designs*, *JAES*, 7-8 / 83
18. J. Vanderkooy & S. Lipshitz, *Power Response of Loudspeakers with Noncoincident Drivers—The Influence of Crossover Design*, *JAES*, 4 / 86
19. J. Backman, *Design Criteria for Smooth Energy Response* présenté à la 90^e Convention de l'AES, 2 / 91, preprint no. 3047
20. R. Small, *Crossover Networks and Modulation Distortion*, *JAES*, 1 / 71
21. J. D'Appolito, *A Geometric Approach to Eliminating Lobing Error in Multiway Loudspeakers*, présenté à la 74^e Convention de l'AES, 10 / 83, preprint no. 2000
22. J. D'Appolito, réponse à l'article *Going Off the Deep End*, *Speaker Builder* 3 / 90, p. 90
23. R.M. Bullock, *Passive Crossover Networks*, *Speaker Builder* 2 / 85
24. F.E. Toole, *Loudspeaker Measurements and Their Relationship to Listener Preferences: Part I*

and II, JAES, 4-5 / 86

25. **Swanson & Tichy**, *Antiresonant Compensation of Tweeters Frequency Response Peaks*, présenté à la 78^e Convention de l'AES, 10 / 85, preprint no. 2235
26. **E. Zaustinsky**, *Measuring and Equalizing Dynamic Driver Complex Impedance*, présenté à la 79^e Convention de l'AES, 10 / 85, preprint no. 2299
27. **M. Knittel**, *Microcomputer-Aided Driver Attenuation*, *Speaker Builder*, 1 / 85
28. **B. Edgar**, *A Coil Winder You Can Build*, *Speaker Builder*, 1 / 87
29. **F. Viesca**, *An Electronic Turns Counter*, *Speaker Builder*, 1 / 88
30. **A. Thiele**, *Air Cored Inductors for Audio*, JAES, 6 / 76
31. **A. Thiele**, *Air Cored Inductors for Audio—A Postscript*, JAES, 12 / 76
32. **M. Sanfilipo**, *Inductor Coil Crosstalk*, *Speaker Builder*, 7/94, p. 14
33. **G.R. Koonce**, *A Technique to Measure Inductance*, *Speaker Builder*, 6 / 89
34. **R. Honeycutt**, *Caps for Passive Crossovers*, *Speaker Builder*, 3/92, p. 34
35. **Lovda & Muchow**, *Bi-Amplification—Power vs. Program Material*, *Audio*, 9 / 75
36. **A.P. Smith**, *Electronic Crossover Networks and Their Contribution to Improved Loudspeaker Transient Response*, JAES, 9 / 71
37. **D.C. Read**, *Using a Single Bass Speaker in a Stereo System*, *Wireless World*, 11 / 74

9 Enceintes acoustiques et mesures

Introduction

Ce chapitre décrit de nombreuses procédures de mesures. Elles vous fourniront les paramètres indispensables aux différents calculs. Pour la plupart de ces mesures relativement simples, il vous faudra une bonne calculatrice scientifique, un générateur basses fréquences, un fréquencemètre (pour garantir la précision), deux voltmètres alternatifs et un peu de patience. Moyennant rémunération, un technicien audio qui dispose de tout cet équipement vous fera certainement les mesures demandées. Vous pourrez vous contenter d'une calculatrice scientifique et de quelques connaissances élémentaires en algèbre.

Sachez que pour obtenir des mesures précises, il vous faudra beaucoup de temps et beaucoup de patience. Il m'a fallu pas moins de onze mois de travail à temps plein pour mettre au point un prototype pour l'exposition d'hiver du *Consumer Electronics Show*, qui a été achevé juste à temps, et pourtant j'avais eu de l'aide. Il ne faudrait pas que le lecteur ait l'impression que la mise au point d'une enceinte acoustique de bonne facture soit chose facile. En réalité, comme je l'ai déjà mentionné plus d'une fois, la construction d'une enceinte acoustique relève en grande partie de l'art. Le travail scientifique guide la conception, mais ne se substitue ni au bon goût, ni au bon sens, ni à la sensibilité musicale. Si l'on pouvait se contenter de la technique pour concevoir une enceinte acoustique, il n'y aurait pas de mauvaise enceinte...

9.1 Terminologie

BL	force du moteur magnétique, en tesla-mètres
f_s	résonance du haut-parleur à l'air libre en Hz
f_{sa}	résonance du haut-parleur à l'air libre en Hz avec une masse supplémentaire M_a
f_{ct}	résonance du haut-parleur dans l'enceinte (enceinte d'essai) en Hz
M_{md}	masse ou poids de l'équipage mobile du haut-parleur
M_{mr}	masse rayonnante (masse d'air) définie par la membrane du haut-parleur
M_{ms}	masse totale de l'équipage mobile y compris la masse rayonnante
M_a	masse supplémentaire (par exemple une boulette de mastic que l'on aura soigneusement pesée)
C_{mb}	compliance de l'enceinte à mesurer
C_{ms}	compliance mécanique du haut-parleur
Q_{es}	coefficient de surtension électrique du haut-parleur
Q_{ms}	coefficient de surtension mécanique du haut-parleur
Q_{ts}	coefficient de surtension totale du haut-parleur
Q_{ect}	coefficient Q_{es} du haut-parleur placé dans l'enceinte à mesurer
R_c	résistance de substitution égale à la résistance R_{evc}
R_{es}	résistance R à la fréquence f_s diminuée de la résistance R_{evc}

R_{evc}	résistance de la bobine mobile mesurée en courant continu
R_x	résistance de substitution variable
I_e	courant traversant la résistance R_{evc}
I_c	courant traversant la résistance R_c
V_{as}	volume d'air équivalent à la compliance du haut-parleur
V_{ab}	volume d'air interne, l'enceinte à mesurer étant étanche et sans matériaux absorbants
L_{evc}	inductance de la bobine mobile du haut-parleur

9.2 Rodage des haut-parleurs

Avant toute mesure, il est indispensable de «roder» les haut-parleurs à cône. Ce sont essentiellement les suspensions qui vont s'assouplir après cinq à dix heures de fonctionnement (la fréquence de résonance peut diminuer jusqu'à 15 %). Vous pouvez effectuer ce rodage avec un signal sinusoïdal de 25 Hz délivré par un générateur basses fréquences qui alimente le haut-parleur à travers un amplificateur de puissance. Ajustez le volume de votre amplificateur de telle sorte que l'excursion de la membrane soit d'amplitude moyenne, et rodez, à cette amplitude, votre haut-parleur pendant au moins une heure.

9.3 Mesure de la fréquence de résonance du haut-parleur (f_s)

La fréquence de résonance f_s du haut-parleur peut être mesurée par le montage à diviseur de tension (source de courant constante) de la figure 9.1 ou 9.2. Cette mesure doit être effec-

tuée à la tension la plus faible que votre matériel puisse prendre en compte. Sachez qu'en général, il est préférable de faire les mesures à une tension inférieure à 1 V. Quand le niveau de tension utilisé pour la mesure augmente, surtout quand on mesure des haut-parleurs de petit diamètre, on observe que la fréquence de résonance augmente elle aussi. Les résultats des mesures doivent s'appliquer à des modèles mathématiques basés sur de «faibles signaux», il est évident que les signaux de mesure doivent donc être faibles également.

Pour mesurer la fréquence de résonance d'un haut-parleur, on le suspend généralement par un câble ou une chaîne, à au moins 1 m du sol, du plafond, des murs ou de tout autre obstacle. Cependant, le mouvement de la membrane provoque une réaction de sens opposé, de telle sorte que le haut-parleur va bouger durant la mesure. Vous obtiendrez une précision légèrement meilleure en fixant le haut-parleur sur un châssis d'essai, fait par exemple de deux traverses de bois placées à environ un mètre du sol, entre lesquelles le haut-parleur sera fixé solidement.

Pour situer la fréquence de résonance, balayez lentement avec votre générateur la gamme de fréquences de 10 Hz à 100 Hz (pour les haut-parleurs de graves) jusqu'à obtenir un pic de tension. Les haut-parleurs médium et les haut-parleurs d'aigus ayant des fréquences de résonance plus élevées, il vous faudra adapter la gamme de balayage manuel en conséquence. La fréquence du maximum (pic) de tension mesurée est la fréquence de résonance du haut-parleur à l'air libre, il faut la relever au dixième de hertz près.

On note f_{sb} la fréquence de résonance du haut-parleur qui tient compte de la charge acoustique provoquée par la face avant de l'enceinte. Pour mesurer ce paramètre, utilisez la même procédure qu'auparavant, mais en fixant le haut-parleur sur une surface de

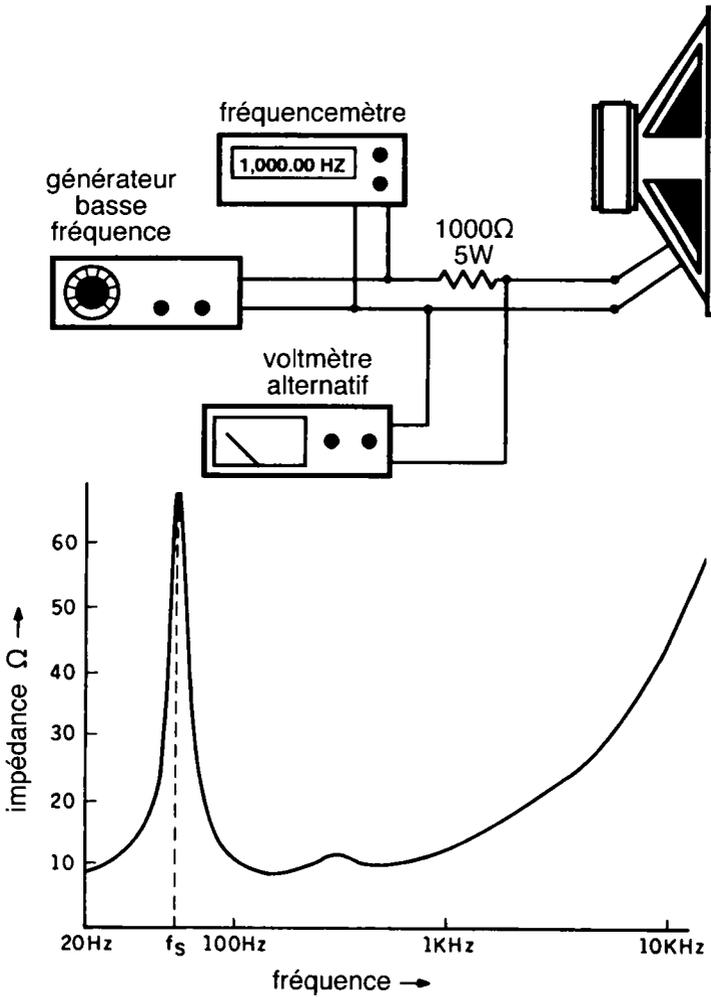


Figure 9.1 : Mesure de l'impédance, méthode du rapport de tension (mesure à courant constant).

dimensions identiques à celles de la face avant de l'enceinte.

Une autre méthode de mesure est celle qui utilise une source de courant, comme exposé dans la figure 9.3. On suit la même procédure qu'auparavant, si ce n'est qu'ici la fréquence de résonance est déterminée lors de la mesure de la tension minimale.

9.3.1 Mesure de l'impédance

L'impédance est tout simplement une résistance en courant alternatif. Des exemples de la méthode de mesure de l'impédance par la technique de la division de tension (ou à courant constant) sont présentés dans les montages des figures 9.1 et 9.2. Cette méthode reste la technique de mesure la plus facile pour obtenir une courbe d'impédance de précision satisfaisante. Toutefois, les

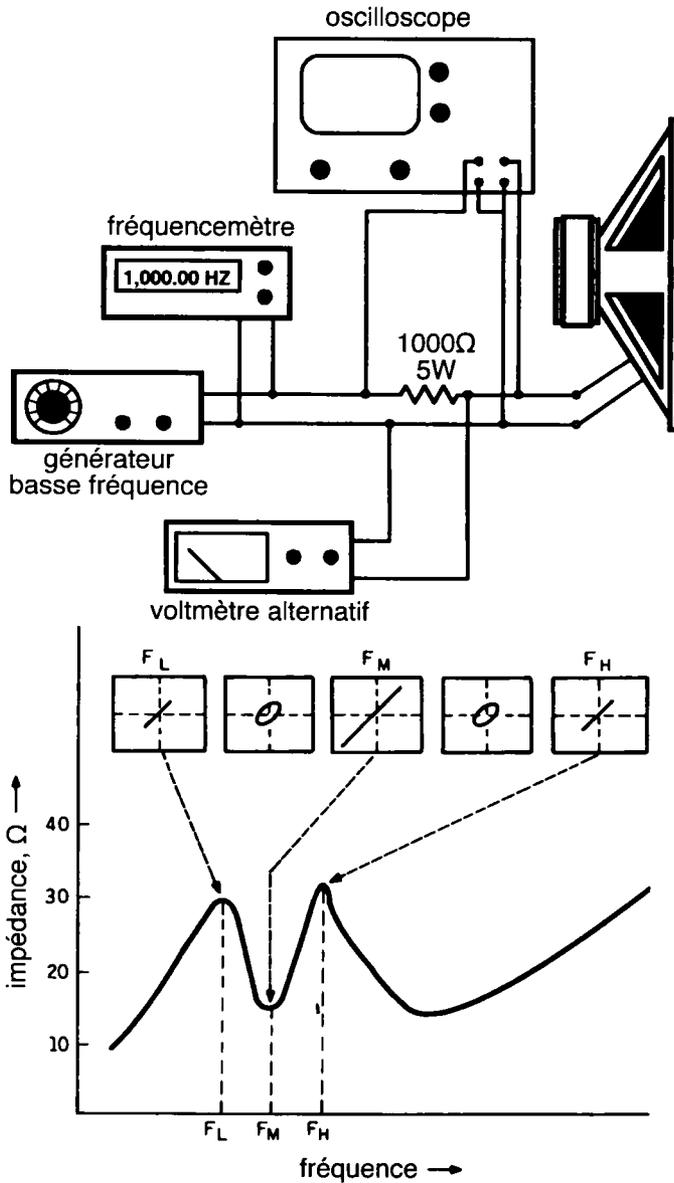


Figure 9.2 : Montage pour déterminer l'impédance par la différence de phase entre le courant et la tension.

courbes d'impédance obtenues ainsi ne sont pas de véritables mesures d'impédance. L'inconvénient majeur de la méthode de mesure de l'impédance par la division des tensions est que l'imprécision est d'autant

plus grande que l'impédance du haut-parleur est plus élevée. La différence n'est certes pas énorme, mais encore faut-il en être informé pour en tenir éventuellement compte. La figure 9.4 compare, pour la mesure de

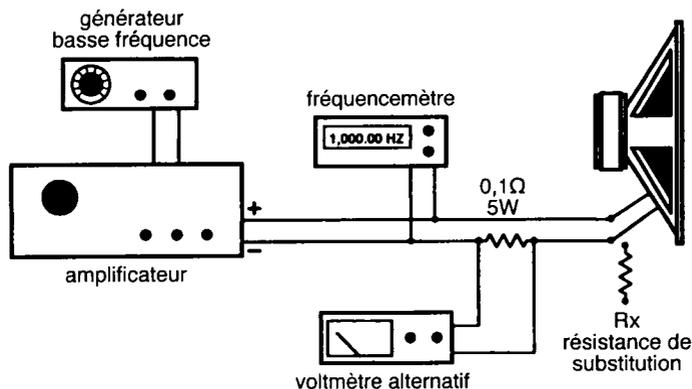


Figure 9.3 : Mesure de l'impédance par la méthode de la source de tension constante.

l'impédance d'un même haut-parleur par l'appareil de mesure Audio Precision System 1, les résultats obtenus avec la méthode de mesure vraie et la méthode de mesure approximative (en utilisant la méthode de la division de tension à partir de la résistance interne de 600Ω de son générateur). La courbe en pointillés a été obtenue à partir des données mesurées par le System 1 et transmises au logiciel LEAP 4.0, puis tracée sans conversion, tandis que la courbe pleine provient des mêmes données mais converties auparavant en impédance réelle par le module de conversion d'impédance du logiciel LEAP avant d'être tracée. La différence d'impédance est d'environ $2,7 \Omega$ à la fréquence de résonance, et d'environ 1Ω pour les fréquences supérieures à 5 kHz .

Les relevés de mesure, qui correspondent aux bancs de mesure des figures 9.1 et 9.2, sont obtenus en notant, manuellement et à intervalles réguliers, les niveaux de tension tout en balayant avec le générateur de 10 Hz à 20 kHz . La calibration du banc de mesure vous permettra de lire le niveau de tension en équivalent de résistance. Pour ce faire, on remplace le haut-parleur par une résistance de $10 \Omega \pm 1\%$ et on ajuste le niveau du générateur pour lire une tension de 1 V au voltmètre (analogique ou numérique). À par-

tir de maintenant, la lecture de la tension sera équivalente à une lecture d'impédance en ohms où $1 \text{ V} = 10 \Omega$, $0,8 \text{ V} = 8 \Omega$, $2 \text{ V} = 20 \Omega$, etc... Sans retoucher à l'étalonnage du générateur, remplacez la résistance de calibration par le haut-parleur, et relevez un nombre suffisant de mesures pour que la courbe ainsi définie soit assez précise. Pour le graphe, utilisez du papier semi-logarithmique (c'est un papier calibré dont l'axe horizontal est logarithmique, tandis que l'axe vertical reste linéaire).

La même méthode de mesure peut être utilisée pour accorder à la fréquence f_b des enceintes bass-reflex ou à radiateur passif. Malheureusement, la plupart du temps, la courbe aux alentours de la fréquence f_b est trop plate, ce qui rend la détermination de cette fréquence trop difficile ; dans ce cas, utilisez de préférence le montage de la figure 9.2. Ici, on visualise l'occurrence de la fréquence f_b par l'apparition d'une ligne inclinée à 45° sur le tube cathodique de l'oscilloscope, comme on le constate sur la courbe affichée dans la figure 9.2 [1].

La méthode de la source de courant de la figure 9.3 est utile pour faire une vraie mesure de l'impédance, mais elle n'est pas aussi facile à mettre en œuvre que la méthode à courant

constant. Dans ce cas, utilisez une boîte de substitution de résistance (boîte de résistances commutées, de puissance suffisante pour vous éviter des surprises) ou un potentiomètre de 10 W. Vous trouverez l'impédance à une fréquence donnée en notant la valeur de la tension, puis, en substituant la résistance R_x au haut-parleur, vous ferez varier celle-ci jusqu'à obtenir la même tension que précédemment. Enfin, enlevez R_x et mesurez, à l'ohmmètre, sa valeur qui est l'impédance cherchée (ou bien lisez le résultat sur le cadran de la boîte de commutation). Veillez toujours à effectuer les mesures avec une tension aussi faible que possible, à moins que vous ne vouliez mettre en évidence les perturbations provoquées par les niveaux élevés.

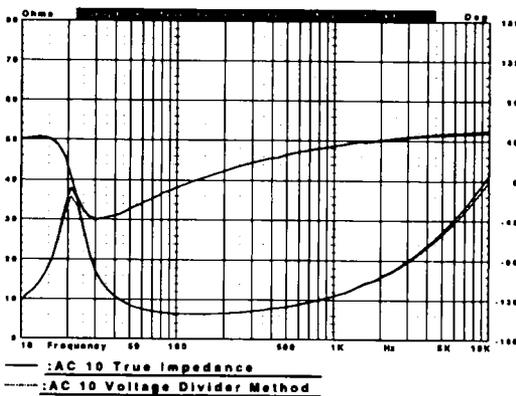


Figure 9.4

9.3.2 Mesure de l'impédance complexe

La seule manière de comprendre la nature réactive de l'impédance complexe, qu'est la charge d'un haut-parleur vu de l'amplificateur, est d'en faire le calcul ou la mesure. L'amplitude de l'impédance, mesurée dans le paragraphe précédent (9.3.1), est de nature complexe, elle est constituée de deux parties : la résistance et la réactance. Quand, pour mesurer l'impédance, on utilise la méthode de la division de tension ou celle de la source de courant, la composante résistive et la

composante réactive sont confondues, pour donner une image globale de l'impédance du haut-parleur. C'est une méthode de mesure pratique et simple, qui convient tout à fait pour détecter et pour éviter des impédances très faibles, charges difficiles pour les amplificateurs (en dessous de 3Ω). En prenant connaissance de la nature réactive de cette charge, vous comprendrez mieux les caractéristiques particulières que présente cette charge pour un amplificateur.

L'impédance est composée d'une partie résistive et d'une partie réactive ; elles sont reliées mathématiquement par :

$$Z = (R^2 + X^2)^{1/2}$$

où Z représente l'amplitude de l'impédance (telle celle mesurée au paragraphe 9.3.1), R est la partie résistive et X la partie réactive. La partie résistive de l'équation peut, dans une certaine mesure, être observée sur la courbe d'impédance, comme celle de la figure 9.4. Les points d'amplitudes les plus faibles, situés juste après la chute marquant la fréquence de résonance, sont presque purement résistifs et plus ou moins égaux à la résistance du haut-parleur (mesurée en courant continu). De même, l'impédance à la fréquence de résonance du haut-parleur est purement résistive (si l'angle de la phase est nul, ce qui est généralement le cas, sauf exceptions). Il n'est pas facile de comprendre quelle partie de la courbe est effectivement résistive.

La partie réactive de l'impédance d'un haut-parleur peut être soit capacitive (la tension est en retard par rapport au courant) ou inductive (la tension est en avance par rapport au courant). La proportion dans laquelle la partie réactive de la charge, vue de l'amplificateur, est plutôt de nature capacitive ou inductive, indiquera dans quelle mesure un haut-parleur précis représentera une charge facile ou difficile pour l'amplificateur. Un haut-parleur donné représente une charge

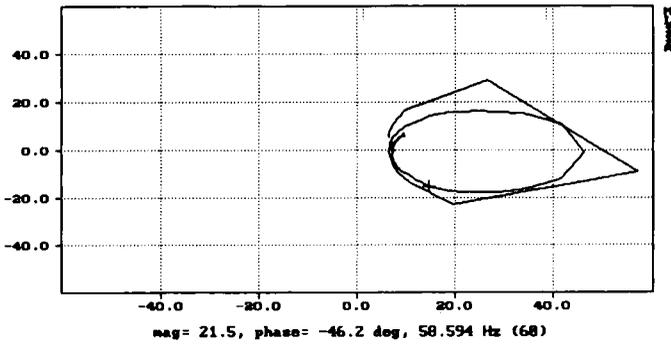


Figure 9.5 : Diagramme de Nyquist (en ohms, avec égalisation).

facile ou difficile pour l’amplificateur, suivant que la partie réactive de la charge est plutôt de nature capacitive ou inductive. Il est actuellement assez aisé de déterminer si l’impédance est de nature résistive, capacitive ou inductive. Il suffit de connaître l’amplitude de l’impédance (comme mesuré au paragraphe 9.3.1) et sa phase. Pour mesurer la phase de l’impédance, il faut soit un phase-mètre, soit un logiciel qui déduit la phase de la mesure de l’amplitude de l’impédance, comme celui de Peter Schuck, nommé *XOPT Crossover Programm*, ou bien entendu le logiciel LEAP. En général, la phase est calculée à partir de la pente que fait une courbe d’amplitude en fonction de la fréquence, cette

notion est expliquée en détails dans le paragraphe 9.8.3 intitulé : la mesure de la phase.

La procédure à suivre pour tracer une courbe d’impédance complexe consiste à déterminer, pour chaque fréquence, la valeur de la partie résistive et la valeur de la partie réactive sur la courbe d’amplitude de l’impédance. Pour calculer la partie résistive de l’impédance à une fréquence donnée, multipliez la valeur de l’amplitude (Z) par le cosinus de l’angle de phase (θ) :

$$R = Z \cdot (\cos \theta)$$

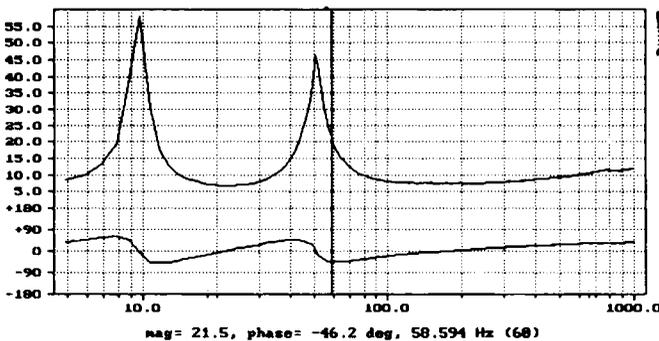


Figure 9.6 : Diagramme de Bode (en ohms, avec égalisation).

Pour calculer la partie réactive de l'impédance à une fréquence donnée, multipliez la valeur de l'amplitude (Z) par le sinus de l'angle de phase. La phase, qu'elle soit mesurée ou calculée, est indiquée en valeur angulaire positive ou négative (en degrés par exemple). Le sinus d'un angle de phase positif est une valeur positive qui correspond à une réactance inductive (X_L) :

$$X_L = Z \cdot (\sin \theta)$$

De la même façon, le sinus d'un angle de phase négatif est une valeur négative à laquelle correspond une réactance capacitive (X_C) :

$$X_C = Z \cdot (\sin \theta)$$

La valeur réelle de l'impédance est représentée par R , tandis que X_L et X_C représentent la partie imaginaire. La bonne notation de la partie imaginaire se fait en utilisant l'opérateur imaginaire j , alors la réactance inductive s'écrit $+j\Omega$ et la réactance capacitive (capacitance) s'écrit $-j\Omega$.

Une fois que la valeur mesurée pour chaque fréquence a été décomposée en une partie réelle et une partie imaginaire, celles-ci sont reportées sur un diagramme polaire, nommé diagramme de Nyquist. La figure 9.5 représente un diagramme de Nyquist tracé dans le domaine des complexes, à partir des mesures provenant d'un analyseur DRA MLSSA FFT. La figure 9.6 donne, pour une mesure identique, la courbe d'impédance et la courbe de phase ; ces deux courbes représentent l'impédance d'un haut-parleur de graves monté en *bass-reflex*. Notez que l'axe horizontal est gradué en ohms et représente la partie réelle, c'est-à-dire la partie résistive, du tracé. L'axe horizontal du diagramme tracé par l'analyseur MLSSA est gradué en valeurs ohmiques négatives et positives, mais seules les valeurs positives de l'axe concernent les diagrammes des enceintes acoustiques. Si vous tracez une courbe d'impédance

complexe à la main, graduez l'axe à partir de zéro et uniquement pour les valeurs positives. L'axe vertical, qui représente les valeurs imaginaires, est gradué à partir d'un centre placé à mi-hauteur, en $+j\Omega$ /inductif vers le haut de l'axe et en $-j\Omega$ /capacitif vers le bas. Les deux axes auront de préférence la même échelle.

L'interprétation des courbes d'impédance complexes est relativement facile. La courbe commence à gauche et tourne, dans le sens des aiguilles d'une montre, vers la droite. Une résonance se reconnaît à la forme de la courbe : c'est un cercle complet, comme en figure 9.5. L'enceinte *bass-reflex*, qui a deux résonances, est représentée par deux rotations. Si l'enceinte acoustique a une ébénisterie très rigide, on observera deux cercles bien ronds et symétriques. Si l'ébénisterie n'est pas assez rigide, les cercles seront déformés et deviendront asymétriques (l'écran de l'analyseur MLSSA ne produit pas des proportions correctes pour ces graphes, c'est pourquoi les figures ne ressembleront pas tout à fait à ces descriptions). Un tracé de diagramme d'une enceinte multivoies peut présenter, dans les fréquences des registres médium et aigus, des petits cercles supplémentaires ainsi que des petits « serpentins », preuve de haut-parleurs qui interfèrent, à cause d'un filtrage aux recouvrements trop importants.

Pour avoir une idée de la difficulté de la charge que représente un haut-parleur pour un amplificateur, relevez les fréquences où la réactance capacitive est maximale. Puis tracez une ligne à partir de l'origine (coordonnées 0,0), tangente à la partie capacitive du cercle de résonance en basse fréquence. C'est à cette fréquence que l'angle de phase de la réactance capacitive est maximal pour le haut-parleur ; en figure 9.5, l'angle est de 46° à 58 Hz. Les angles de phase supérieurs à 40° en basses fréquences ou vers 1 à 2 kHz indiquent une charge quelque peu difficile pour l'amplificateur. La fréquence où la résistance

est la plus faible est également importante. Quand la courbe croise l'axe horizontal à des fréquences très élevées ou très basses, on décèle les valeurs inférieures à 3Ω , charges difficiles pour un amplificateur [2].

9.4 Calcul de la masse de l'air mû par le haut-parleur

La masse de l'air exerce une pression sur la membrane en mouvement du haut-parleur ; de ce fait, il faudra en tenir compte pour le calcul de la masse totale en mouvement. La masse d'air en mouvement dépend de la surface de la membrane, selon la relation suivante :

$$M_{mr} = 0,575 \cdot S_d^{1,5}$$

Le tableau 9.1 donne la masse d'air en mouvement en fonction du diamètre de différents haut-parleurs [3].

diamètre	S_d (m ²)	M_{mr} (g)
18"	0,1300	27,0
15"	0,0890	15,3
12"	0,0530	7,0
10"	0,0330	3,5
8"	0,0220	1,9
6,5"	0,0165	1,2
6"	0,0125	0,8
5,25"	0,0089	0,5
4,5"	0,0055	0,2
3"	0,0038	0,1

9.4.1 Mesure de l'équipage mobile d'un haut-parleur

Il y a trois méthodes pour déterminer la masse ou le poids de l'équipage mobile d'un haut-parleur. La première est évidente : demandez cette information au fabricant du haut-parleur, c'est la manière la plus précise pour obtenir cette donnée et de plus, elle vous fera gagner du temps. La masse de l'équipage mobile M_{md} pourra être alors additionnée à la masse de l'air en mouvement M_{mr} pour donner la masse totale en mouvement M_{ms} :

$$M_{ms} = M_{md} + M_{mr}$$

Les deux autres méthodes, celle par différence de masse et celle par différence de compliance, nécessitent des appareils de mesure.

A. Méthode de mesure par différence de masse

À partir de l'un des montages des figures 9.1, 9.2 ou 9.3, fixez une petite masse supplémentaire M_a sous forme de pâte à modeler (ou autre matériau, la pesée étant à 0,1 g près), que vous appliquerez avec soin et d'une manière symétrique sur le pourtour du cache-noyau de la membrane. Puis, la masse supplémentaire M_a étant en place, mesurez, avec la méthode habituelle pour un haut-parleur à l'air libre, la nouvelle fréquence de résonance f_{sa} . Pour plus de précision, cette mesure devrait être faite, le haut-parleur étant fixé à une surface rigide et suspendue. La mesure de la fréquence de résonance se fait avec une précision de 0,1 Hz. La masse supplémentaire M_a doit être suffisamment importante pour produire un décalage de la fréquence de résonance du haut-parleur de 20 à 50 % (cela peut présenter des difficultés lors de la mesure de résonances très basses qui se situent à des fréquences inférieures à 10 Hz sur certains haut-parleurs, et de ce fait, une mesure de précision reste très difficile, même avec des appareils de mesure professionnels ; en résumé, tâchez de maintenir la fréquence

de résonance f_{sa} supérieure à 10 Hz). La masse supplémentaire est d'environ 10 g pour une membrane de 15 cm de diamètre (6") et atteint 40 g ou plus pour une membrane de grand diamètre. La masse M_{md} de la membrane se calcule par la formule suivante :

$$M_{md} = \frac{M_a}{(f_s/f_{sa})^2 - 1} \text{ en grammes}$$

Et enfin $M_{ms} = M_{md} + M_{mr}$.

B. Méthode de mesure par différence de compliance

Avec la méthode de mesure par différence de masse, la fréquence de résonance f_{sa} était inférieure à la fréquence de résonance du haut-parleur à l'air libre. Cela peut être problématique avec des haut-parleurs dont la fréquence de résonance est très basse, car f_{sa} risque d'être inférieure à 10 Hz, fréquence à la limite des possibilités de certains appareils de mesure. À l'inverse, la méthode par différence de compliance augmente la fréquence de résonance, qui, de ce fait, sera plus facile à mesurer avec des appareils économiques.

L'enceinte d'essai sera rendue parfaitement étanche par l'application systématique de joints. Le haut-parleur est monté à l'extérieur de l'enceinte, comme dessiné sur la figure 9.9 pour l'enceinte close. Il est indispensable d'utiliser un joint étanche entre le haut-parleur et l'enceinte. Un ruban adhésif de mousse synthétique à alvéoles fermées, comme on en utilise pour calfeutrer les fenêtres, pourra servir de joint ; celui-ci sera serré par le haut-parleur maintenu en place manuellement ou fixé par des vis.

Le volume de l'enceinte doit être tel que la fréquence de résonance augmente de 50 à 100 % par rapport à la fréquence de résonance du haut-parleur à l'air libre. Ce volume dépend du volume V_{as} du haut-parleur ; si vous disposez de cette donnée (cf. caractéristiques du fabricant), sachez que la moitié de cette valeur sera suffisante. Ci-dessous, vous trouverez une liste

d'enceintes d'essais de différents volumes qui devraient convenir à la majorité des cas :

Diamètre		Volume	
		enceinte d'essai	haut-parleur
pouces	cm	litres	pouces-cube
4-5	12-1	3,5	216
6-7	15-17	14,2	864
8	20	28,3	1728
10	25	41,5	2532
12	30	56,6	3456
15	38	70,8	4320

Le volume total de l'enceinte tiendra compte du volume supplémentaire, défini par la membrane conique du haut-parleur de graves, volume qui se calcule en multipliant le volume de départ par un coefficient de 1,02. La fréquence de résonance de l'enceinte f_c sera déterminée, à partir de l'un des montages des figures 9.1, 9.2 ou 9.3, avec la même méthode que pour la mesure de la fréquence de résonance d'un haut-parleur à l'air libre. La mesure de f_c étant faite à 0,1 Hz près, on calculera la compliance de l'enceinte C_{mb} à l'aide de :

$$C_{mb} = \frac{V_{ab}}{1,42 \cdot E^5 \cdot S_d^2} \text{ en mètre newton}$$

où V_{ab} est en m^3 et S_d en m^2 .

Puis, M_{md} sera déterminée par :

$$M_{md} = \frac{C_{mb}^{-1} - M_{mr} [1,85 \cdot (6,283 f_c)^2 - (6,283 f_s)^2]}{(6,283 f_c)^2 - (6,283 f_s)^2}$$

en kg

où C_{mb} est en m/N et M_{mr} en kg.

Enfin, $M_{ms} = M_{md} + M_{mr}$.

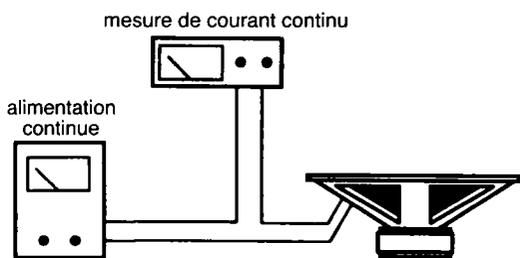


Figure 9.7 : Mesure du facteur de force BL.

9.4.2 Calcul de la compliance d'un haut-parleur

La compliance de l'ensemble des suspensions du haut-parleur C_{ms} est donnée par la formule suivante :

$$C_{ms} = [(6,283 f_s)^2 \cdot M_{ms}]^{-1} \text{ en m/N}$$

où M_{ms} est en kg.

9.4.3 Mesure du facteur de force BL du haut-parleur

Le produit BL mesure la force magnétique du moteur du haut-parleur. Il est égal au produit de la longueur de fil de la bobine mobile qui plonge dans le champ magnétique par la densité de ce champ. Le résultat se mesure en tesla \times mètres. Il existe plusieurs méthodes pour mesurer le produit BL ; celle qui, avec un équipement simple, est la plus reproductible, met en action une force d'opposition [3].

Le montage utilisé pour mesurer le facteur de force BL est dessiné en figure 9.7. La procédure consiste, après avoir posé le haut-parleur à l'horizontale sur une surface stable, à poser une petite masse connue (M_a) sur la membrane afin de la déplacer vers le bas, puis à appliquer une tension continue à la

bobine mobile jusqu'à retrouver la position de départ de la membrane (position de repos). La masse posée sur le cône doit être connue à 0,1 g près, et provoquer un déplacement du cône d'au moins 5 mm. Une fois la membrane revenue à sa position de repos (si en augmentant la tension, la membrane continue de descendre, inversez la polarité de branchement), notez l'intensité du courant (i) affichée sur l'ampèremètre. Le facteur de force BL est calculé par :

$$BL = \frac{9,8 \cdot (M_a)}{i} \text{ en tesla-mètres}$$

où M_a est en kilogrammes et le courant i en ampères.

Pour effectuer cette mesure avec précision, il est important de déterminer exactement la position de repos de la membrane avant d'ajouter la masse supplémentaire, puis de replacer exactement la membrane en cette position en appliquant une tension électrique à la bobine mobile du haut-parleur. Une technique simple pour fabriquer un indicateur de position de repos est d'attacher solidement un bout de fil rigide au bord du châssis du haut-parleur et de le tordre de telle sorte qu'il affleure la surface de la membrane. Un repère plus précis peut être construit à partir de différents éléments mécaniques disponibles dans les tiroirs de la plupart des bricoleurs, un exemple étant le «BL-mètre» de la photo 9.8. Cet appareil, construit à l'aide d'une «troisième main», ferme, par un contact à la surface de la membrane, un circuit électrique qui, alimenté par une pile, allume un témoin lumineux quand la membrane est en position de repos.

9.5 Calcul de l'inductance de la bobine mobile L_b

À partir du montage de la figure 9.1, mesurez, à une fréquence de 10 kHz, l'amplitude (m)

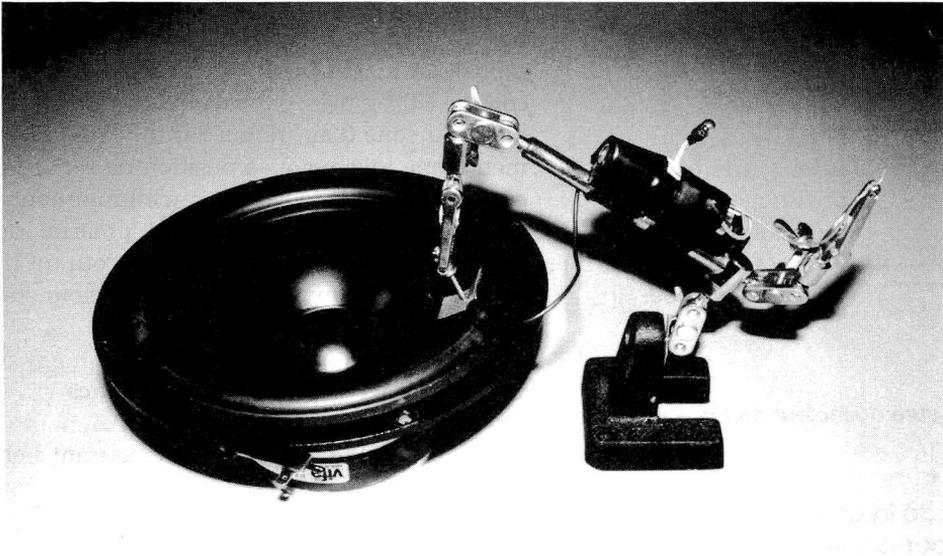


Figure 9.8 : Montage pour mesurer le facteur de force BL .

en ohms de l'impédance de la bobine mobile. L'inductance de la bobine mobile, mesurée en henry, est donnée par la formule suivante :

$$L_e = 1,592 \cdot 10^{-5} \sqrt{m^2 - R_E^2}$$

Une méthode plus précise pour calculer l'inductance de la bobine mobile est de mesurer l'amplitude et la phase à 1 kHz et de calculer, à partir des formules du paragraphe 9.3.2, l'impédance complexe, puis de séparer la composante inductive / imaginaire de la composante résistive / réelle, sans oublier que l'inductance d'un haut-parleur varie avec la fréquence. Si la mesure de la phase n'est pas possible, l'approximation suivante [3] fonctionne assez bien :

1. Mesurez l'amplitude de l'impédance (Z_x) à 1 kHz à 0,1 ohm près.
2. La composante résistive / réelle à 1 kHz de la bobine mobile peut être estimée de la façon suivante :

$$R_{vc} \approx R_{evc} \cdot (1 + 0,038 BL) \text{ en ohms}$$

3. La réactance totale est donnée par :

$$X_T = \sqrt{Z_R^2 - R_{vc}^2} \text{ en ohms}$$

4. Déterminez la réactance inductive (X_L) en soustrayant la réactance due à la masse du cône :

$$X_L = X_T \cdot \frac{BL^2}{6283 M_{md}} \text{ en ohms}$$

où M_{md} est en kg
et BL en tesla-mètres.

5. L'inductance de la bobine mobile L_{evc} est donnée par :

$$L_{evc} = \frac{BL^2}{6283} \text{ en henry}$$

L'inductance de la bobine mobile est généralement mesurée à 1 kHz. L'inductance et la résistance alternative de la bobine mobile d'un haut-parleur dépendent de la fréquence et varient fortement avec elle.

9.6 Calcul de la résistance de source R_G de l'amplificateur

La résistance de source de l'amplificateur est l'une des résistances dont il faut tenir compte lors du calcul du coefficient Q du haut-parleur. La méthode la plus simple est d'utiliser le coefficient d'amortissement (D), habituellement mesuré à 1 kHz et donné par le constructeur. La résistance de source R_G se calcule par :

$$R_G = \frac{R_d}{D - 1}$$

où R_d est l'impédance nominale du haut-parleur. Si, lors de la conception des filtres, on a utilisé les circuits de compensation d'impédance du chapitre 8, cette caractéristique sera constante sur la plus grande partie de la bande passante du haut-parleur. Néanmoins, le taux d'amortissement peut varier significativement, aussi bien avec la fréquence qu'avec le niveau de sortie de l'amplificateur. C'est pourquoi, plutôt que de vous fier aux caractéristiques du constructeur, il est préférable de mesurer le taux d'amortissement de votre amplificateur. La méthode présentée ci-dessous a été décrite par Small. Elle est basée sur une mesure qui s'effectue à la fréquence de 50 Hz [4].

Injectez un signal sinusoïdal de 50 Hz à l'entrée de votre amplificateur, et réglez le niveau de volume de l'amplificateur ainsi que le niveau de sortie du générateur de telle sorte que vous mesuriez à la sortie, non chargée, un niveau de tension égal à E_0 , où :

$$E_0 = \sqrt{W \cdot R_d}$$

W = puissance nominale de l'amplificateur en watts

Pour un amplificateur de 50 W, chargé par une enceinte de 4 Ω , nous aurons $E_0 = 14,4$ V

Avec le même montage et les mêmes niveaux, substituez au haut-parleur une résistance de

charge égale à R_d (capable de dissiper au moins la puissance nominale de l'amplificateur) et mesurez à ses bornes la tension E_L . Alors, calculez R_G par :

$$R_G = \frac{R_d (E_0 - E_L)}{E_L}$$

9.6.1 Calcul de la résistance série totale, R_x

Pour pouvoir calculer le coefficient Q du haut-parleur, il vous faut connaître la résistance série totale, composée non seulement de la résistance interne de l'amplificateur R_G , mais également de la résistance du câble de liaison qui relie la sortie de l'amplificateur à l'entrée de l'enceinte, de la résistance du bornier de raccordement de l'enceinte, de celle du câblage interne ainsi que des résistances du filtre (comme celles des selfs). Pour ce faire, à l'endroit où l'on raccorde le câble à l'amplificateur, mesurez la résistance R_t en ohms aux extrémités du câble, celui-ci étant relié à l'enceinte (haut-parleurs et filtre branchés). La résistance R_x se calcule par :

$$R_x = R_t - R_E$$

Tableau 9.2

Enceinte <i>bass reflex</i> de test				
haut-parleur		volume		évent
ft	cm	ft ³	litres	D x L
8	20	1,0	28	2" ID x 2"
10	25	1,5	42	2" ID x 2"
12	30	2,5	70	3" ID x 6"
15	40	3,5	100	4" ID x 5"

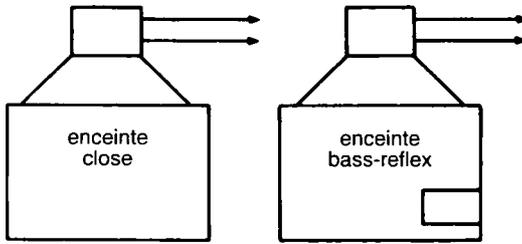


Figure 9.9 : Enceintes d'essai pour la mesure de V_{as} .

9.7 Calcul du volume d'air V_{as} équivalent à la compliance du haut-parleur

Le paramètre V_{as} est l'un des plus difficiles à mesurer, car sa valeur peut changer sensiblement avec l'humidité et la température de l'air. Voici trois méthodes pour mesurer et calculer V_{as} : la méthode avec enceinte *bass-reflex*, la méthode avec enceinte close et la méthode avec le paramètre C_{ms} .

1. Méthode avec enceinte *bass-reflex*.

À partir du tableau 9.2, sélectionnez une enceinte de volume adéquat et munie d'un évent approprié, relevez-en la courbe d'impédance et déterminez les fréquences de résonance f_H et f_L (figure 9.2). Bouchez l'évent avec soin et mesurez la fréquence de résonance de l'enceinte devenue close f_c . Calculez f_b par :

$$f_b = \sqrt{f_H^2 + f_L^2 - f_c^2}$$

puis :

$$V_{as} = \frac{(f_H^2 - f_b^2)(f_b^2 - f_L^2)V_b}{f_H^2 f_L^2}$$

Cette méthode part du principe qu'il n'y a pas de fuites d'air, comme cela se produit parfois avec certains haut-parleurs. De plus, la fréquence f_b est sensée être définie pour l'impédance minimale du haut-parleur, ce qui

n'est pas toujours le cas, surtout si l'inductance de la bobine mobile est élevée.

2. Méthode avec enceinte close.

Utilisez une enceinte close d'essai de volume V_t sans matériaux amortissants pour mesurer le coefficient Q (Q_{ct}) et la fréquence de résonance (f_c) de l'enceinte, le haut-parleur étant monté comme en figure 9.9 (la mesure du coefficient Q est exposée au paragraphe 9.8). Prenez un volume de 30 l pour un haut-parleur de 20 cm (8") ou 25 cm (10"), et une enceinte de 55 à 60 l pour un haut-parleur de 30 cm (12") ou 38 cm (15"). Le haut-parleur doit être monté d'une manière étanche. Appliquez la formule suivante :

$$V_{as} = V_t \left[\frac{f_{ct} Q_{ct}}{f_s Q_{es}} - 1 \right]$$

Pour calculer plus rapidement, mais avec moins de précision, la fréquence de résonance f_c de l'enceinte, utilisez l'expression suivante :

$$V_{as} = V_t \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{f_{ct}}{f_s} \right)^2 - 1$$

Les deux formules précédentes sous-entendent qu'il n'y a pas de fuites, sinon les résultats seraient imprécis.

3. Méthode de mesure à partir de la compliance du haut-parleur.

À partir de la compliance du haut-parleur (C_{ms}), calculée auparavant, et à partir de la surface de rayonnement du haut-parleur S_d (en mètres carrés, voir tableau 2.15), calculez V_{as} en mètres cubes, par la formule :

$$V_{as} = 1,42 \cdot 10^5 (S_d^2) (C_{ms})$$

Cette méthode a l'avantage d'être indépendante d'éventuelles fuites du haut-parleur. La méthode de détermination du volume d'air équivalent à la compliance du haut-parleur peut se révéler, tout comme les deux autres méthodes, imprécise si les sus-

pensions des haut-parleurs ne sont pas linéaires. Pour diminuer au maximum ces altérations, effectuez vos mesures au niveau de tension minimum toléré par votre matériel de mesure. Lors de ces mesures, comme pour toutes celles de ce chapitre, il vous faut relever les fréquences à 0,1 Hz près, c'est pourquoi un fréquencemètre apparaît dans tous les montages.

En pratique, les méthodes deux et trois produisent généralement des résultats similaires. Toutefois, je préfère, pour calculer la compliance, utiliser la méthode des enceintes d'essais, puis appliquer la méthode trois.

9.8 Mesure du coefficient Q , Q_s , Q_{es} et Q_{ms} du haut-parleur

La mesure du coefficient Q d'un haut-parleur peut se faire de deux manières. La première est celle suggérée par Thiele dans son premier article sur les enceintes *bass-reflex*. Cette méthode est basée sur la détermination des fréquences situées à -3 dB de part et d'autre de la fréquence de résonance du haut-parleur. L'autre méthode consiste à mesurer le facteur de force BL et la compliance pour effectuer le calcul du coefficient Q du haut-parleur. La méthode de Thiele s'est répandue dans l'industrie mais elle peut donner des résultats erronés, lesquels proviennent parfois du manque de linéarité des suspensions de certains haut-parleurs et de la difficulté, selon la forme de la courbe, à déterminer les fréquences placées à -3 dB de part et d'autre de la résonance. Dans la majorité des cas, si l'équipement en matériel de mesure est modeste, la deuxième méthode sera préférable et donnera des résultats plus fiables car elle est bien moins sensible à l'imprécision des mesures. Pour information, les deux méthodes sont décrites ci-dessous.

A. Méthode 1

À partir du montage de mesure de la figure 9.3 :

1. Mesurez la résistance en courant continu de la bobine mobile du haut-parleur (R_E), de préférence avec un pont de mesure de précision.
2. Choisissez une résistance (R_C) de valeur proche à R_E (si $R_E = 6,5 \Omega$, une résistance de 8Ω fera l'affaire).
3. Connectez la résistance R_E aux bornes de mesure et réglez le générateur sur la fréquence f_s . Notez, avec une attention toute particulière, la tension à cette fréquence, car toutes les mesures qui vont suivre se feront exactement à cette même valeur, nommée valeur de référence. La valeur absolue de cette tension n'est pas très importante, car toutes les autres mesures de tension se feront à cette même échelle. Si possible, utilisez le calibre de 100 mV de votre voltmètre pour obtenir des résultats conformes à la notion de linéarité. Sinon, montez à une tension comprise entre $0,2$ et $0,7$ V, vous obtiendrez certainement de meilleurs résultats tout en restant dans ce qui peut être considéré comme faisant partie de la gamme des « petits signaux ». Mesurez le courant nommé i_c , défini à la tension de référence et à la fréquence f_s .

4. Calculez le courant I_E :

$$I_E = \frac{I_c R_C}{R_E}$$

5. Remplacez la résistance R_C par le haut-parleur. En tenant le haut-parleur en l'air, réglez le générateur BF pour obtenir un courant minimum qui définit la fréquence f_s . Ce courant est appelé I_0 .
6. Calculez :

$$r_0 = \frac{I_E}{I_0}$$

7. Calculez :

$$I_r = \sqrt{I_E I_0}$$

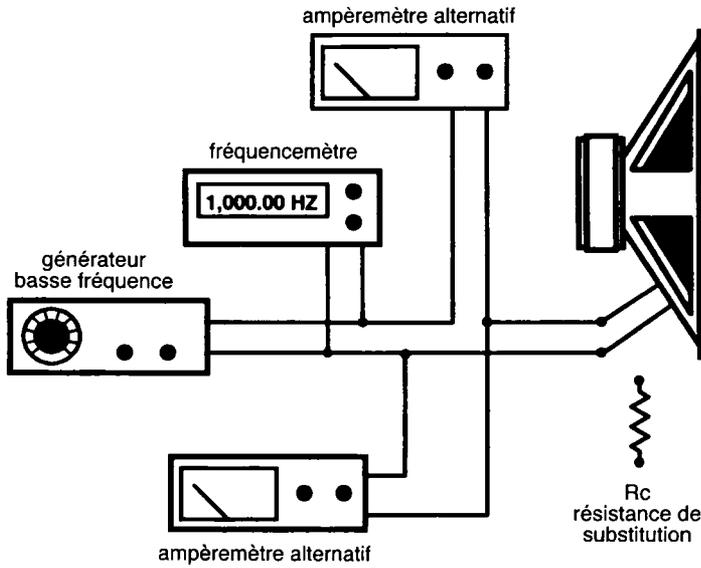
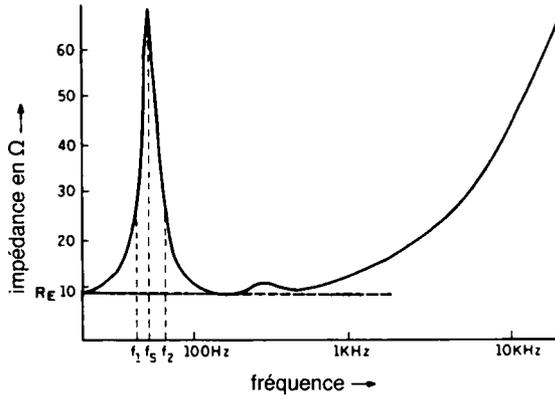


Figure 9.10 : Montage pour la mesure du coefficient Q du haut-parleur.

8. Déterminez les fréquences f_1 et f_2 en dessous et au-dessus de f_s , qui donnent, à la tension de référence, un courant égal à I_r (figure 9.10). Vérifiez la précision de la mesure de f_s en calculant :

$$f_s = \sqrt{f_1 f_2}$$

Si les deux valeurs sont identiques à 1 Hz près, la mesure sera considérée comme valable.

9. Calculez :

$$Q_{ms} = \frac{f_s \cdot \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1}$$

10. Calculez :

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1}$$

11. Calculez :

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}$$

Cette relation donne la valeur de Q_{ts} uniquement à partir des paramètres du haut-parleur. Comme indiqué auparavant, vous devez tenir compte des différentes résistances séries venant de l'amplificateur, du câble de liaison et du filtre, car celles-ci augmentent la valeur de Q_{ts} , lorsque vous montez le haut-parleur de graves dans l'enceinte définitive. Lors de vos mesures, vous pouvez remplacer ces différentes résistances séries par une résistance série totale, que vous connecterez à une des bornes du haut-parleur, ou utiliser la valeur calculée de Q_{es} par les relations suivantes :

$$Q'_{es} = Q_{es} \cdot \left(\frac{R_G + R_x + R_E}{R_E} \right)$$

$$Q'_{ts} = \frac{Q'_{es} \cdot Q_{ms}}{Q'_{es} + Q_{ms}}$$

Une fois le coefficient Q_s connu, vous pouvez modifier sa valeur pour n'importe quel haut-parleur afin de l'adapter à une situation particulière, mais ce sera toujours au détriment de l'efficacité. Les techniques sont les suivantes :

- A. Ajouter une masse à la membrane pour augmenter Q_{ts} [5].
- B. Ajouter une résistance de faible valeur en série avec le haut-parleur, mais de la même puissance nominale, pour augmenter Q_{ts} [6].
- C. Obturer les ouvertures à l'arrière du saladier du haut-parleur de graves avec du tissu poreux afin de diminuer Q_{ts} [7,8].

B. Méthode 2

1. Calculez R_{es} en soustrayant la résistance de la bobine mobile R_{evc} de la mesure de l'amplitude de (R) à la fréquence de résonance f_s (comme mesuré au para-

graphe 9.3.1 à partir d'un relevé de la courbe d'impédance) [3]. Soit :

$$R_{es} = R - R_{evc} \quad \text{en ohms}$$

2. Calculez Q_{ms} par la formule suivante :

$$Q_{ms} = \frac{R_{es}}{BL^2 C_{ms} (6,283 f_s)}$$

où le facteur de force BL est exprimé en tesla mètres et C_{ms} en mètres / newton.

3. Calculez Q_{es} par la formule suivante :

$$Q_{es} = \frac{R_{evc}}{BL^2 C_{ms} (6,283 f_s)}$$

où le facteur de force BL est exprimé en tesla mètres et C_{ms} en mètres / newton.

4. Calculez Q_{ts} par la formule suivante :

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Il existe trois autres méthodes de mesure du coefficient Q, à partir d'appareils de mesures informatisés ou de logiciels de CAO pour enceintes acoustiques.

A. L'analyseur Audio Precision System 1 possède un programme automatique qui mesure l'ensemble des paramètres en une quinzaine de secondes, sortie sur imprimante incluse [9]. La méthode utilisée est essentiellement une version informatisée de la méthode de Thiele, basée sur la mesure de la variation de la compliance pour déterminer V_{as} . L'analyseur procède de la même manière que la méthode manuelle, en alliant à un faible niveau de tension de mesure un enregistrement de précision. L'analyseur System 1 détermine la fréquence de résonance f_s à partir de l'annulation de la phase, méthode généralement précise, mais pas dans toutes les situations ni avec n'importe quel haut-parleur. Par contre, c'est un excellent appareil de mesure pour le contrôle de qualité à la production.

B. L'analyseur DRA Labs MLSSA FFT peut mesurer une impédance, à partir de la méthode dite à l'air libre, par la méthode de variation de masse ou par la méthode de variation de compliance ; il peut effectuer un tracé de la courbe à partir des différentes mesures et calculer tous les paramètres mécaniques. Sa vitesse d'exécution dépend de la vitesse de l'ordinateur associé, mais elle reste un peu plus lente que celle du System 1. Son tracé de courbe à partir de données discrètes est plus précis que celui de la méthode de Thiele, il donne tous les principaux paramètres mécaniques.

C. Le logiciel LEAP 4.0 peut recevoir des données de différents appareils, par exemple des analyseurs Audio Precision System 1, DRA MLSSA, Ariel SYSid et Techron 12 ou 20, pour tracer automatiquement des courbes d'impédance, mesurées à partir de la méthode dite à l'air libre, de la méthode de variation de masse ou de celle de variation de compliance. C'est le programme le plus élaboré et le plus précis du groupe, et parmi les résultats fournis, il y a non seulement les paramètres mécaniques, mais également des données sur la variation, en fonction de la fréquence, de la résistance et de l'inductance concernant la partie montante de la courbe d'impédance en fréquences élevées.

9.8.1 Techniques de mesure de la courbe de réponse en fréquence

A. Mesure de toute la bande passante de l'enceinte acoustique

On dispose de trois techniques pour mesurer la bande passante d'une enceinte acoustique entre 10 Hz et 40 kHz. Chaque technique de mesure est définie par le type de volume dans lequel rayonne l'enceinte. On distingue l'espace de mesure anéchoïque sphérique (appelé aussi champ libre, mesurant 4π stéradians), le demi-espace ou hémisphère (2π stéradians) et la mesure par effet de sol.

Les mesures anéchoïques sont faites en l'absence de toute surface réfléchissante. En d'autres mots, rien ne réfléchira le son sur 360° et ce quelle que soit la direction ; c'est ce qui explique l'appellation « plein espace » (*full space*) ou espace de mesure sphérique ou sur un angle solide de 4π stéradians. Ce type de mesure ne peut être fait que, soit dans une chambre spéciale absorbant tout le son, chambre anéchoïque comme celle du *National Research Council* au Canada, soit en suspendant, à l'extérieur, l'enceinte acoustique en l'air, loin du sol. Les mesures anéchoïques peuvent également être simulées par une technique de mesure à base de fenêtres temporelles (*electronically gating*) qui, des signaux provenant de l'enceinte à mesurer, filtrent les réflexions des surfaces environnantes. Ce type de mesure s'effectue avec des analyseurs FFT ou des générateurs sinus, pilotés par des portes électroniques. Le seul inconvénient de cette technique est que la fréquence la plus basse, qui puisse encore être mesurée, est définie par la durée maximale d'ouverture de la porte. Pour avoir des mesures correctes en basses fréquences jusque vers 20 Hz, il est indispensable qu'il n'y ait pas de surfaces réfléchissantes à moins de 8,53 m. Les lois de la nature exigent que les mesures anéchoïques, faites avec la technique des fenêtres temporelles, doivent quand même avoir un environnement quasi anéchoïque pour délivrer des mesures valables jusque vers 20 Hz. Ces conditions de mesure, en environnement clos, peuvent être remplies en suspendant l'enceinte acoustique à mi-hauteur dans un grand hangar. Pour pouvoir effectuer des mesures jusque vers 10 Hz, il faudrait que la surface réfléchissante la plus proche soit à 17 m de distance.

Les mesures anéchoïques à large bande ne sont possibles que dans un très petit nombre d'endroits ; celles qui se limitent à une bande de 50 Hz à 40 kHz sont toutefois plus faciles à faire avec la technique des fenêtres temporelles. J'utilisais d'habitude une petite tour de 1,80 m de haut pour effectuer des mesures

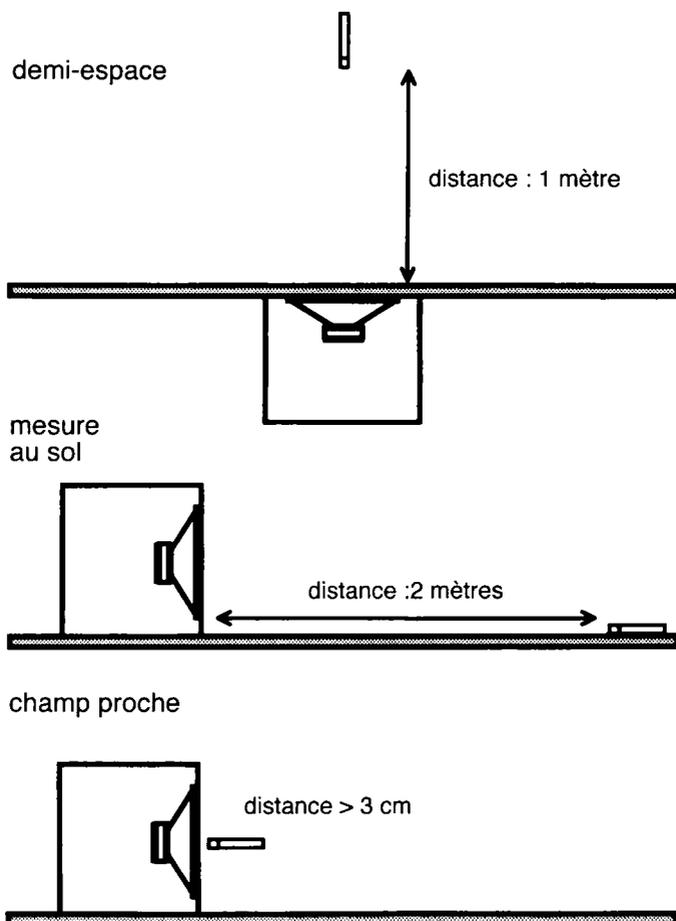


Figure 9.11 : Trois environnements différents pour la mesure de la courbe de réponse.

MLS avec des portes temporelles à partir de l'analyseur DRA MLSSA. De ce fait, le micro était placé à 2,39 m du sol. Pour parcourir la distance de 4,78 m (entre le sol et retour), le son met environ 0,014 s. La fréquence est l'inverse de la période d'une onde ($f=1/t$), à la durée de 0,014 s correspond donc une fréquence de 71 Hz : ce sera la fréquence la plus basse à laquelle la mesure reste fiable.

Les mesures effectuées en rayonnement hémisphérique, voir l'illustration en figure 9.11, ont les mêmes limites, dues aux surfaces réfléchissantes, que celles effectuées

en champ libre. Elles sont généralement faites en plein air. L'enceinte acoustique à mesurer est enterrée dans une petite fosse, à un endroit où la surface est très plane, la face avant étant tangente à la surface du sol et les haut-parleurs dirigés vers le ciel. Le haut-parleur rayonne dans un champ hémisphérique de 180° , d'où le nom de demi-espace ou de 2π . Les mesures en condition hémisphérique peuvent facilement convenir à des relevés de données comprises entre 10 Hz et 40 kHz. Comme le ciel ne présente aucune surface réfléchissante, la seule limite à cette technique de mesure sera la distance au sol

entre l'enceinte et la surface réfléchissante la plus proche ; cette distance devrait faire au moins 9 m.

Le troisième type de mesure est appelé «à effet de sol», comme on le constate en figure 9.11. Ce type de mesure s'obtient en plaçant l'objet à mesurer sur un sol dur, plan et réfléchissant (une chape en béton ou une surface en asphalte d'un parking), et en posant le microphone également sur le sol [10]. La mesure inclut l'image acoustique de l'enceinte, c'est la raison pour laquelle le microphone, posé sur le sol, est placé à l'apex de l'onde directe et de l'onde réfléchi. Ce type de mesure s'effectue également à l'air libre et les surfaces réfléchissantes les plus proches devraient se situer à plus de 9 m de l'objet à mesurer. Ces conditions sont fréquemment réunies dans les grands parkings, et il est facile d'y effectuer des mesures à large bande de fréquences par la technique «à effet de sol». Lors de la mesure d'enceintes acoustiques du type colonne, inclinez-les vers le sol autant que possible pour améliorer les résultats de la mesure. Les résultats des mesures effectuées avec la technique «à effet de sol» sont similaires aux mesures effectuées en champ libre.

La figure 9.12 compare la réponse en fréquence obtenue avec chacun des trois types de mesure. Pour pouvoir comprendre la différence entre ces trois types de mesure, il est important de connaître la nature du «saut» en niveau de la courbe de réponse. Si une membrane de haut-parleur rayonne sans être perturbée par une quelconque rupture de surface ni même par la limite en dimensions d'une face avant, le rayonnement sera de nature hémisphérique jusqu'à la fréquence où la directivité du haut-parleur commencera à se manifester. Si le haut-parleur est monté sur une face avant, celle-ci agit comme un réflecteur d'une torche électrique et augmente la quantité d'énergie rayonnée dans certaines directions. Le «saut» sur la courbe de réponse a lieu quand la longueur d'onde du signal

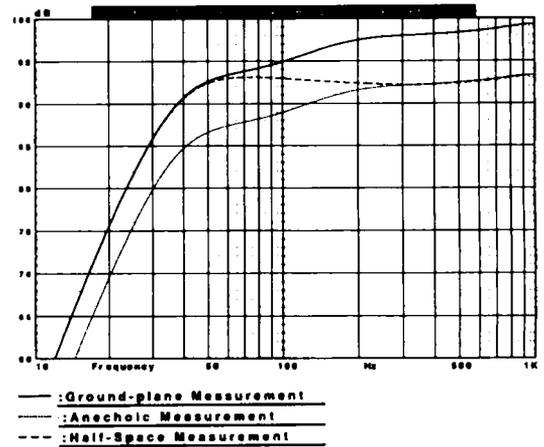


Figure 9.12

rayonné décroît pour approcher de l'aire de la surface réfléchissante, c'est-à-dire quand la face avant commence à fonctionner comme un réflecteur sonore. Quand la face avant est de dimension infinie, comme c'est le cas lors d'une mesure de type hémisphérique, ce «saut» de niveau a lieu à toutes les fréquences, ce qui explique la forme plate de la courbe de la figure 9.12. Cet accroissement en niveau provoque un doublement de la pression sonore, soit un gain de 6 dB par rapport à la mesure en champ libre. Quand la surface rayonnante est limitée uniquement à la face avant de l'enceinte, comme dans le cas de la mesure en champ libre ou par «effet de sol», le «saut» en niveau a lieu à la fréquence, définie par la surface de la face avant, à laquelle les mesures passent de 4π à 2π . Dans la simulation de la figure 9.12, effectuée par le logiciel LEAP 4.0, le «saut» en niveau démarre aux environs de 75 Hz, pour la mesure en champ libre, et croît de 3 dB/octave jusqu'à environ 300 Hz, soit deux octaves plus haut. La mesure par «effet de sol» comprend deux sources sonores, la source directe de l'objet à mesurer ainsi que son image acoustique, c'est pourquoi son gain est de 6 dB, comparé à la mesure en champ libre. Ainsi en figure 9.11, le microphone est placé à 2 m de l'enceinte à mesurer, car en doublant la distance de mesure du micro-

phone, on diminue le niveau de pression sonore de 6 dB et de ce fait, on obtient le même niveau sonore que lors d'une mesure en champ libre, effectuée à 1 m de distance. Sans cette correction, la mesure par « effet de sol » présente exactement le même « saut » en niveau que la mesure en champ libre.

B. Mesures en basses fréquences

Dans les limites précitées, les trois types de mesure, en champ libre, hémisphérique ou par « effet de sol », sont valables pour mesurer les basses fréquences des enceintes acoustiques. Des trois méthodes, la mesure de type hémisphérique est probablement la meilleure pour déterminer la fréquence à -3 dB (f_3) d'une enceinte. Il y a toutefois une autre méthode de mesure, qui utilise le champ proche, et qui est à même de fournir une mesure rapide et facile du registre grave [11]. Cette mesure en champ proche, à la fois rapide et simple, est exposée en figure 9.11. La méthode consiste à placer le microphone aussi près que possible du haut-parleur, de préférence à moins de 75 mm du cache-noyau du haut-parleur de graves. Comme le niveau sonore recueilli est très élevé, il couvre toutes les réflexions de la pièce et toutes les diffractions de la face avant, et les résultats seront similaires à ceux obtenus dans des conditions de mesure hémisphérique. Tout comme la mesure hémisphérique (2π stéradians), la mesure en champ proche est dépourvue du « saut » en niveau caractéristique des mesures effectuées en champ libre ou par « effet de sol ».

Cette technique fonctionne bien pour mesurer des haut-parleurs de graves d'enceintes closes, mais demande quelques précautions lors de son application aux enceintes *bass-reflex*. La réponse en basses fréquences de l'enceinte *bass-reflex* étant la combinaison de l'énergie rayonnée par le haut-parleur de graves et par l'évent, il faudra tenir compte de cette combinaison lors d'une mesure en champ proche. On y par-

vient en faisant deux mesures séparées. La mesure au niveau de l'évent est faite en plaçant le microphone centré au ras de l'ouverture de l'évent. À cause de la diaphonie entre le haut-parleur de graves et l'évent, la mesure au niveau de l'évent n'est valable que pour des fréquences 1,6 fois inférieures à la fréquence d'accord de l'enceinte, à moins que vous ne puissiez isoler quelque peu le rayonnement du haut-parleur de graves de celui de l'évent (par exemple, en plaçant un coussin absorbant entre les deux). Comme le niveau de pression sonore en champ proche est proportionnel à la surface de rayonnement et que l'évent a une surface d'émission inférieure à celle du haut-parleur de graves, le niveau de sortie de l'évent devra être corrigé, car il est proportionnellement plus faible que celui du haut-parleur de graves. Par exemple, si l'évent a une surface inférieure de moitié à celle du haut-parleur de graves, il faudra réajuster son niveau de sortie de + 6 dB par rapport à celui du haut-parleur de graves.

9.8.2 Appareils pour la mesure des courbes de réponse en fréquence

Les appareils pour la mesure de la courbe de réponse se classent en deux catégories : les appareils manuels et les appareils automatiques.

A. Appareils manuels pour le relevé des courbes de réponse

Les relevés de courbes de réponse à la main peuvent être faits avec des appareils de mesure assez simples et les courbes de réponse sont tracées à partir des données relevées fréquence par fréquence. La procédure est plutôt lente, mais si le mesurage est effectué avec soin, les résultats peuvent être pratiquement aussi précis que ceux obtenus avec des analyseurs très onéreux. La mesure se décompose en deux parties : émission du signal et réception du signal.

1. Les sources de signaux

Plusieurs types de générateurs économiques sont disponibles pour les mesures manuelles et produisent les signaux suivants : le signal sinusoïdal, le signal sinusoïdal modulé et le bruit rose. Les générateurs sinus et les générateurs de fonction sont des appareils relativement abordables et peuvent alimenter l'enceinte soit directement soit par l'intermédiaire d'un amplificateur. Pour la lecture de la fréquence du signal de sortie, vous pouvez vous fier à l'indication du cadran du générateur ou ajouter un fréquencemètre pour obtenir une lecture plus précise.

De la même manière qu'avec un générateur sinus, le bruit rose peut aussi être utilisé pour faire des mesures en fréquences. Ce type de signal est très peu sensible aux ondes stationnaires des pièces d'habitation et peut, dans ce cas, être utilisé avec d'assez bons résultats ; cependant les mêmes limites que celles définies pour les conditions de mesure avec la technique des portes temporelles s'appliquent également ici. Le bruit rose est habituellement filtré en bandes de 1/3 à 1/10 d'octave et ne donnera pas autant de détails qu'avec une mesure en son pur. Les générateurs de bruit rose filtré sont des appareils plutôt onéreux. Heureusement, ces signaux de mesure sont disponibles sur plusieurs disques tests analogiques et de type CD.

Comme le bruit rose, le signal sinusoïdal modulé est peu sensible aux ondes stationnaires des pièces où s'effectue la mesure. Les signaux sinusoïdaux modulés sont généralement conçus, comme le bruit rose, dans des bandes de largeur comprises entre 1/3 et 1/10 d'octave. Les générateurs de signal sinusoïdal modulé sont cependant moins chers que les générateurs de bruit rose (un générateur de ce type en kit figure au catalogue de Old Colony Sound). Comme pour les autres signaux, on les trouve également sur les disques tests analogiques et sur les dis-

ques test CD. Les relevés effectués avec un signal sinusoïdal modulé sont moins sensibles aux ondes stationnaires des pièces de mesure, mais plus précis si l'on applique les conditions de mesure exposées au paragraphe 9.8.1.

2. La réception du signal

La mesure du niveau du signal de réception, lors d'un relevé manuel de la courbe de réponse en fréquence, peut se faire simplement à l'aide d'un sonomètre. Les sonomètres de premier prix ne sont pas réputés pour leur linéarité en fréquence. Si possible, calibrez votre sonomètre par rapport à une référence connue ; par la suite vous rectifierez vos mesures à partir de cette courbe d'étalonnage. Une autre solution est d'utiliser un microphone connecté directement à un voltmètre calibré en dB. Les mesures obtenues ne représentent pas la valeur SPL et n'auront qu'une valeur relative, mais cette méthode est suffisante dans bien des cas, comme lors de la mise au point des filtres par exemple. Comme pour le sonomètre, un étalonnage par rapport à un appareil de précision pour mesurer les courbes de réponse est recommandée.

B. Appareils automatiques pour la mesure de la courbe de réponse

Les deux types d'appareils utilisés pour des mesures de courbes de réponse professionnelles sont définis par le type de signal émis. Ce sont les analyseurs à balayage sinus et les analyseurs du type FFT (il existe une troisième catégorie d'analyseurs utilisant le bruit rose en large bande comme signal d'excitation, mais ces appareils sont rarement utilisés).

Les appareils de mesure à balayage sinus utilisent généralement l'une des deux techniques d'enregistrement suivantes : l'enregistrement par un traceur de courbes motorisé ou l'enregistrement par l'intermédiaire d'une interface reliant l'appareil de mesure à un ordinateur. L'enregistrement des

courbes par un traceur motorisé implique que celui-ci, lors du traçage de la courbe sur un papier à échelle logarithmique en fréquence, entraîne d'une manière synchrone le défilement des fréquences du générateur d'un bout à l'autre de la gamme. Un exemple réussi de ce type d'appareil est le traceur de courbes Neutrik Audiograph 3300 [12]. Si l'on utilise une interface, la courbe de réponse apparaît, lors du balayage automatique du générateur, sur l'écran de l'ordinateur. Un excellent exemple d'appareil associant un générateur à balayage et une interface pour ordinateur est l'Audio Precision System 1 [13]. Ce dernier peut également produire des fichiers de données, qui peuvent être lus en vue de manipulations ultérieures par d'autres programmes, comme le logiciel LEAP 4.0 d'Audio Teknology.

Les analyseurs FFT utilisent différents signaux d'excitation, tels l'impulsion standard [14], le signal sinus modulé en fréquence (*chirp* en anglais) et le signal de séquence à durée maximale, nommé MLS (*Maximum Length Sequence*)[15]. La séquence de mesure commence par l'excitation de l'enceinte par une impulsion dont l'onde sonore est enregistrée via un microphone, puis filtrée par une fenêtre temporelle particulière, et enfin, une FFT (*Fast Fourier Transform*) est effectuée pour calculer une courbe de réponse en fonction de la fréquence. La plus grande différence, hormis la présence d'une fenêtre de mesure (qu'on peut également mettre en œuvre lors des mesures avec les générateurs sinus), c'est que les données sont enregistrées sur une échelle linéaire en fréquence et non logarithmique. Il en résulte un nombre accru de points pour les fréquences élevées et donc une très grande précision dans ce domaine. L'inconvénient, c'est que le petit nombre de points affichés dans le grave donnera peu de détails dans ce registre.

Depuis que la plupart des analyseurs FFT courants peuvent être reliés à un ordinateur,

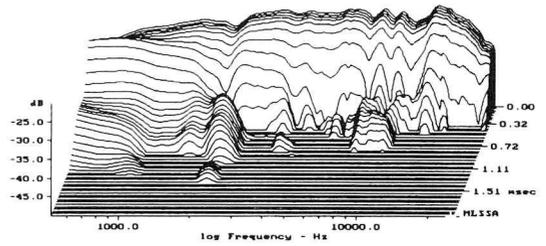


Figure 9.13 : Spectres cumulatifs du traînage d'une enceinte.

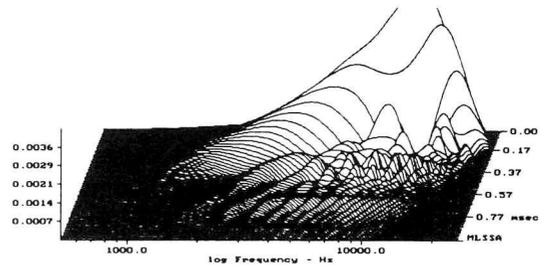


Figure 9.14 : Distribution de Wigner.

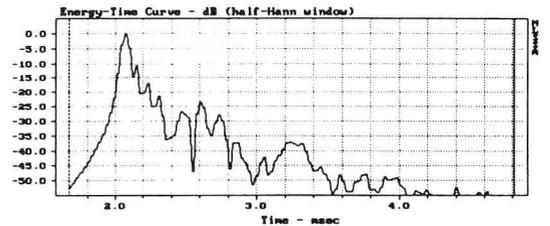


Figure 9.15 : Courbe de traînage (ETC).

ils bénéficient des mêmes avantages que les appareils à balayage sinus munis d'une interface. Citons pour exemple : le Techron TEF 20 qui est un analyseur FFT autonome, équipé d'une interface RS-232, qui produit un signal sinus modulé en fréquence (*chirp*) ; l'analyseur FFT Ariel SYSid [16], sous forme d'une carte à monter dans un PC, qui fournit une impulsion ou un signal sinus modulé en fréquence (*chirp*) ; et l'analyseur FFT DRA Labs MLSSA [17], constitué d'une simple carte à monter dans un PC, qui délivre un signal d'excitation sous forme d'impulsion ou de signal à MLS. L'avantage majeur de chacun de ces analyseurs est la possibilité d'effectuer des mesures cumulatives en fonction du temps (*time-domain*). Cela permet à l'utilisateur d'observer, par exemple, la répartition spectrale de l'énergie ou l'extinction des résonances en fonction du temps. Des exemples de courbes de décroissance de l'amplitude en fonction du temps sont donnés en figure 9.13 [18]. La figure 9.14 présente une distribution de Wigner [19,20] et la figure 9.15 une courbe de décroissance de l'énergie en fonction du temps (ETC ou *Energy-Time Curve*) [21]. Toutes ces courbes sont issues de l'analyseur DRA Labs de MLSSA. L'explication et l'interprétation détaillées de telles courbes sortirait du cadre de cet ouvrage.

9.8.3 Mesure de la phase

Il n'existe pas de méthode manuelle pour mesurer la phase. La mesure de la phase demande l'utilisation soit d'un phasemètre approprié, soit d'un des analyseurs automatiques décrits au paragraphe 9.8.1, soit de l'un des logiciels de CAO pour enceinte acoustique (XOPT et LEAP 4.0). La phase est une notion mal comprise en général, ce à quoi les explications qui suivent vont tenter de remédier.

La phase d'une onde d'amplitude quelconque est fonction de la pente de cette onde. S'il n'y a pas plus de rotation de phase que celle

définie par le changement de pente de l'amplitude, on appelle cet ensemble un ensemble à « phase minimale ». En règle générale, les enceintes acoustiques sont des ensembles à phase minimale et de ce fait, la courbe de phase peut être dérivée à partir de la pente de l'amplitude de l'onde. Pour une enceinte acoustique, ceci est vrai aussi bien pour une courbe d'impédance que pour une courbe d'amplitude en fonction de la fréquence. La figure 9.16 illustre les relations entre amplitude et phase. Quand la pente de la courbe d'amplitude est plate et horizontale, l'angle de phase est égal à zéro degré. Quand la pente est positive, la phase est positive, mais elle retournera à la valeur zéro, lorsque la magnitude redeviendra plate. De même, quand la pente de la courbe de magnitude est négative, la phase est négative et repassera par la valeur zéro quand la courbe d'amplitude redeviendra plate. (*Phasemètre numérique* de R. Luccassen, article paru en juin 1991 dans *Elektor n°156*, p. 52, décrit dans le détail la construction d'un tel appareil).

9.8.4 Microphones de mesure

Pour qu'un appareil de mesure quelconque puisse relever avec précision une courbe de réponse, il est indispensable qu'en premier lieu il soit muni d'un microphone dont la courbe de réponse en fréquence soit suffisamment plate et fiable. La liste suivante classe par prix décroissant des microphones qui peuvent être considérés comme microphones de mesure. Les quatre premiers sont des microphones de mesure de précision, essentiellement utilisés par des professionnels, et dont le prix se situe environ entre 8000 et 20.000 F pour la capsule du microphone, le corps du microphone qui fait préamplificateur et l'alimentation. Les quatre derniers sont des microphones meilleur marché dont la précision est suffisante pour qu'ils soient inclus dans cette liste et dont le prix se situe environ de 900 à 3300 F.

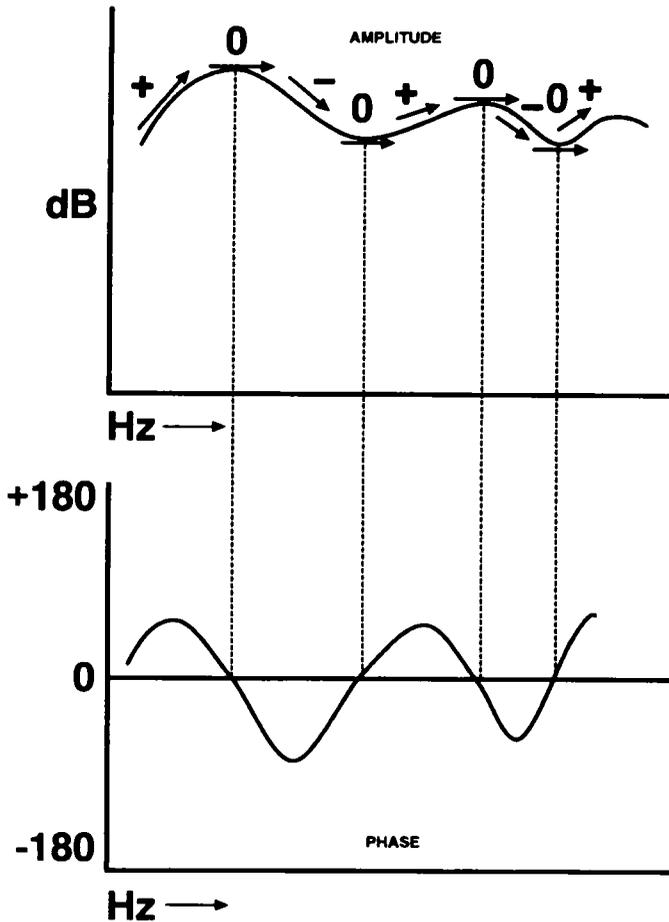


Figure 9.16 : Relation entre l'amplitude et la phase en fonction de la fréquence.

Liste des microphones de précision

1. Bruel & Kjaer modèle 4133
2. Rion Industries modèle UC-31 [22]
3. Larson-Davis modèle 2540 [23]
4. ACO Pacific modèle 7012 [24]
5. AKG C460B (capsule CK 62) [25]
6. Josephson Engineering [26]
7. Neutrik 3382 [27]
8. Mitey Mike (Old Colony Sound) [28]

De cette liste, deux microphones se détachent comme étant de très bon rapport qualité prix. Dans le premier groupe des microphones professionnels, le microphone d'ACO Pacific est d'excellente qualité. Ses performances soutiennent la comparaison avec les autres microphones du groupe et son prix est bien inférieur à celui de ses concurrents. Parmi le groupe des microphones économiques, le Mitey Mike conçu par Joe D'Appolito et distribué par Old Colony Sound est d'une qualité qui correspond tout à fait à son prix.

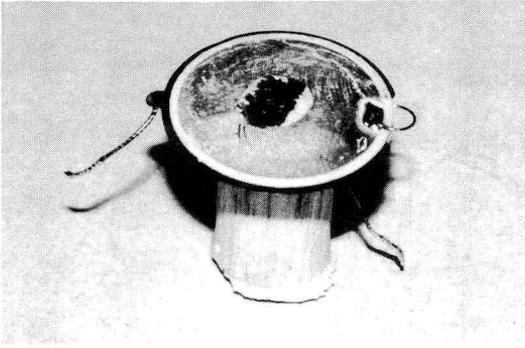


Figure 9.17 : Accéléromètre piézoélectrique.

9.8.5 Mesure des vibrations mécaniques des coffrets des enceintes acoustiques

La mesure des vibrations qui ont lieu dans les parois des enceintes acoustiques se fait avec des transducteurs appelés accéléromètres. Des accéléromètres calibrés sont des capteurs onéreux dont le prix oscille entre 1.200 et 3.000 F, voire d'avantage. Les accéléromètres sont habituellement constitués d'éléments piézoélectriques montés de telle manière qu'ils sont directement couplés à la vibration mécanique qu'ils doivent mesurer. Les mesures sont généralement effectuées en excitant l'enceinte à mesurer par un son pur ou par une impulsion, l'accéléromètre étant attaché à l'une des parois. La sortie de l'accéléromètre est branchée soit à un voltmètre, soit à un enregistreur. Les données de plusieurs accéléromètres peuvent être combinées pour définir, après traitement analytique adéquat par un logiciel, un modèle dynamique de la structure du coffret de l'enceinte acoustique [30].

Il y a cependant quelques solutions moins onéreuses. L'une d'entre elle est l'accéléromètre de type PVDF (polyvinylidène) économique (environ 210 F) et moins sensible aux problèmes de résonance que les modèles plus chers (cela provient de la nature du matériau utilisé, le PVDF) [29].

Il n'est pas calibré en décibels comme la plupart des accéléromètres plus onéreux, mais il est néanmoins capable de faire des mesures relatives pour déterminer l'efficacité d'une technique de renfort de structure appliquée à un coffret ou pour observer l'effet d'un traitement amortissant sur une paroi. Ce transducteur peut être utilisé avec un simple générateur sinus et un voltmètre ou branché à l'un quelconque des analyseurs automatiques décrits au paragraphe 9.8.2.

Un accéléromètre encore plus économique peut être fabriqué avec un budget de l'ordre de 90 F. Le transducteur, illustré sur la figure 9.17, utilise un élément piézoélectrique d'un tweeter piézoélectrique de Motorola [31]. Démontez le tweeter et dessoudez les fils reliant l'élément piézoélectrique au bornier du tweeter. Séparez l'élément piézoélectrique, de la taille d'une grande pièce de monnaie, du cône en papier du haut-parleur. Puis coupez un morceau de 20 mm de long d'une tige en bois de 10 mm de section, et collez-en la tranche sur le centre de l'élément piézo avec de la colle époxy. Une fois sec, cet accéléromètre de fortune pourra être fixé sur la paroi de l'enceinte à l'aide de cire de bougie chaude ou de cire d'abeille, ou collé provisoirement à la colle blanche (étant entendu que le coffret de l'enceinte n'a pas encore reçu sa finition) et pourra être utilisé de la même manière que l'accéléromètre PVDF. Le niveau de tension délivré par ces deux accéléromètres est plutôt faible et demandera probablement une amplification supplémentaire (20 dB).

9.8.6 Mesure de la température de la bobine mobile en fonction du temps

La performance dynamique d'un haut-parleur est fortement affectée par des variations de température de la bobine mobile qui provoquent de grandes variations de sa résistance. Le changement aléatoire de la résistance de la bobine mobile altère non seu-

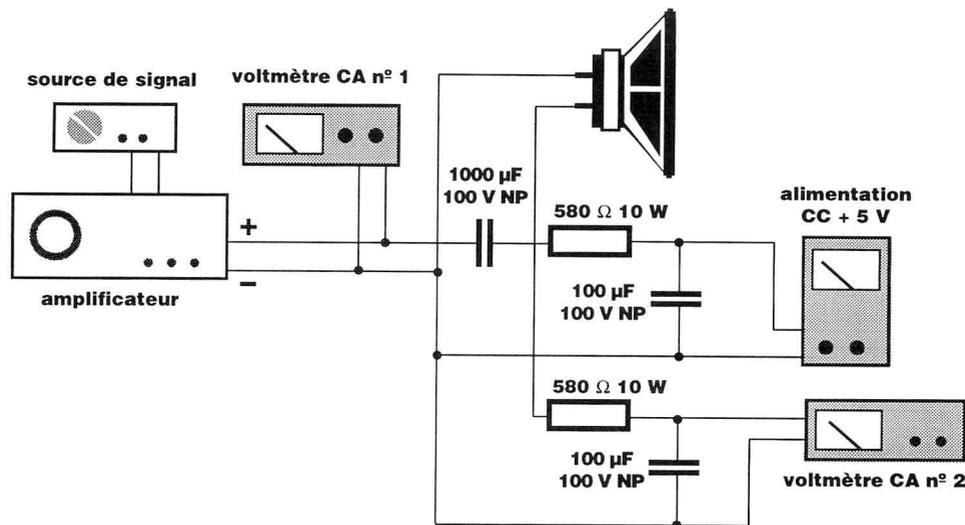


Figure 9.18 : Montage pour la mesure de la température de la bobine mobile d'un haut-parleur.

lement la performance en basses fréquences et l'amortissement du haut-parleur, mais a en général un effet négatif sur le bon fonctionnement du filtre conçu pour opérer sous une résistance fixe. La société Ferrofluidics Corporation, dont les produits sont spécialisés dans la dissipation thermique des bobines mobiles, a mis au point une mesure indirecte pour déterminer le changement exact de température quand la bobine mobile commence à chauffer. Le montage pour cette mesure est illustré en figure 9.18. Le signal d'excitation peut être soit un générateur sinus ou un générateur de bruit rose à bande étroite. La préférence va généralement au bruit rose à bande étroite, qui est le type de signal que les fabricants de haut-parleurs utilisent pour tester la tenue en puissance d'une enceinte acoustique. Si vous utilisez un générateur sinus, la fréquence du signal devra être choisie juste au-dessus de la fréquence de résonance du haut-parleur, là où l'impédance atteint son minimum. Pour limiter la largeur de bande du bruit rose, on peut utiliser un filtre électronique passe-haut dont la fréquence de coupure est variable. Habituellement, la fréquence de coupure du filtre passe-haut est placée une octave au-dessus de la fréquence

de résonance du haut-parleur, ce qui pour des haut-parleurs de graves ferait environ 100 Hz, pour les médiums peut-être 200 Hz et autour de 2 kHz pour les haut-parleurs d'aigus.

Le niveau du signal source (mesuré avec le voltmètre 1) variera avec la puissance supposée du haut-parleur à tester. Pour les haut-parleurs de graves, une tension comprise entre 10 et 20 V devrait suffire, la tension de 20 V étant réservée aux bobines mobiles de grands diamètres, qualifiées de forte puissance. Pour les haut-parleurs d'aigus et les médiums à petites bobines mobiles, une tension de 6 à 7 V devrait convenir. Vous connaîtrez la limite en tension que supporte votre haut-parleur d'une manière empirique quand la bobine mobile aura brûlé !

Ce test s'effectue en mesurant la tension aux bornes du condensateur avec le deuxième voltmètre et en appliquant la formule suivante :

$$T_1 = 1 \left[\frac{V_s - V(T_0)}{a V_s - V(T_1)} \times \frac{V(T_1) - 1}{V(T_0)} \right] + T_0$$

Où :

a = coefficient thermique de la résistance du fil de la bobine mobile. Pour le fil de cuivre, prenez comme valeur 0,00385 et 0,00401 pour le fil d'aluminium.

T_0 = La température nominale de la bobine mobile avant tout échauffement (prenez 25°C comme température ambiante).

T_1 = La température élevée due à l'échauffement qui est l'inconnue.

$V(T_0)$ = Tension mesurée avec le deuxième voltmètre au début du test (tension correspondant à la température ambiante).

$V(T_1)$ = Tension mesurée avec le deuxième voltmètre durant la procédure (cette mesure a lieu à intervalles réguliers, comme toutes les 10 mn, 30 mn, 60 mn, etc...).

La procédure est très simple. La tension est mesurée aux bornes du voltmètre 2 au début du test et, avec cette valeur, on calcule une valeur de départ T_1 avec la formule ci-dessus. À des intervalles de temps précis, on refait des mesures de la tension aux bornes du deuxième voltmètre et à chaque fois on applique la formule précédente. Une fois la saisie et le calcul de toutes les valeurs terminés, un graphe sera dessiné avec comme axe horizontal le temps et comme axe vertical la température. Ce graphe montre la montée en température en fonction du temps du haut-parleur testé. L'une des applications de cette mesure serait par exemple la détermination, en fonction de différentes fréquences de coupure de filtre ou de différentes pentes de filtrage, du type de protection nécessaire pour un haut-parleur.

9.9 Quelques facteurs de conversion

Longueurs

$$1 \text{ mm} = 0,03937''$$

$$1 \text{ cm} = 0,3937''$$

$$1 \text{ m} = 39,37''$$

$$1 \text{ m} = 3,2808'$$

$$1'' = 25,4 \text{ mm}$$

$$1'' = 2,54 \text{ cm}$$

Surfaces

$$1 \text{ cm}^2 = 0,155 \text{ in}^2$$

$$1 \text{ in}^2 = 6,452 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 929,0341 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 10,76307 \text{ ft}^2$$

Volumes

$$1 \text{ mm}^3 = 6,1 \cdot 10^{-5} \text{ in}^3$$

$$1 \text{ litre} = 0,0353 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ ft}^3 = 28,317 \text{ litres}$$

$$1 \text{ ft}^3 = 0,02831 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ ft}^3 = 1728 \text{ in}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 35,314 \text{ ft}^3$$

Conventions

$$X^{-1} = \frac{1}{X}$$

$$X^{1/2} = \sqrt{X}$$

Bibliographie

1. **N. Crowhurst**, *Audio Measurements Course, Part 15, Audio*, 8 / 76
2. **V. Dickason**, *How to Plot and Understand Complex Impedance, SpeakerBuilder 2 / 88*, p. 15
3. **LEAP** (Loudspeaker Enclosure Analysis Program), Version 3.1, Operating Manual, by Audio Teknology
4. **R. Small**, *Direct Radiator Loudspeaker System Analysis*, JAES, 6 / 72
5. **J. N. White**, *Loudspeaker Athletics*, JAES, 11 / 79
6. **H. J. J. Hoge**, *Switched on Bass*, Audio, 8 / 76
7. **R. Small**, *Vented-Box Loudspeaker Systems*, JAES, 6-10 / 73
8. **J. Graver**, *Acoustic Resistance Damping for Loudspeakers*, Audio, 3 / 65
9. **R. C. Cabot**, *Automated Measurement of Loudspeaker Small Signal Parameters*, 81^e convention de l'AES, publication préliminaire n° 2402
10. **M. R. Gander**, *Ground-Plane Acoustic Measurement of Loudspeaker Systems*, JAES, 10 / 82
11. **D. B. Keele, Jr.**, *Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound Pressure Measurement*, JAES, 4 / 74
12. *Voice Coil*, 12 / 89
13. *Voice Coil*, 11 / 88
14. **L. R. Fincham**, *Refinements in the Impulse Testing of Loudspeakers*, JAES, 3 / 85
15. **Rife & Vanderkooy**, *Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences*, JAES, 6 / 89
16. *Voice Coil*, 3 / 90
17. *Voice Coil*, 4 / 89
18. **Lipshitz, Scott & Vanderkooy**, *Increasing the Audio Measurement Capability of FFT Analyzers by Microcomputer Postprocessing*, JAES, 9 / 85
19. **Janse & Kaizer**, *Time-Frequency Distributions of Loudspeakers: The Application of the Wigner Distribution*, JAES, 4 / 83
20. **Verschuur, Kaizer, Druyvesteyn, & de Vries**, *Wigner Distribution of Loudspeaker Responses in a Living Room*, JAES, 4 / 88
21. **Vanderkooy & Lipshitz**, *Uses and Abuses of the Energy-Time Curve*, JAES, 11 / 90
22. *Voice Coil*, 11 / 89
23. *Voice Coil*, 6 / 90
24. *Voice Coil*, 7 / 89
25. *Voice Coil*, 5 / 89
26. *Voice Coil*, 9 / 89
27. *Voice Coil*, 6 / 89
28. **J. D'Appolito**, *Mitey Mike: For Loudspeaker Testing*, *Speaker Builder*, 6 / 90, p. 10
29. *Voice Coil*, 2 / 91
30. **Hoffman, Matthiessen & Veirgang**, *Measurement of Operating Modes on a Loudspeaker Cabinet*, présenté à la 87^e Convention de l'AES, preprint no. 2848
31. Patent pending by Genesis Technology Inc.

10 Enceintes acoustiques pour salle de projection vidéo domestique

10.1 Sonorisation de salle de projection vidéo domestique contre stéréophonie binaurale

Les enceintes acoustiques diffèrent non seulement d'après leur application par les propriétés des haut-parleurs qui les équipent, mais encore d'après les exigences générales de la conception d'un système. Les enceintes acoustiques destinées à la sonorisation sont largement différentes de celles appropriés à l'écoute domestique, qui elles-mêmes se distinguent des modèles installées dans les automobiles. Une nouvelle catégorie de systèmes a récemment été créée pour la reproduction à domicile des pistes sonores cinématographiques dans ce que l'on appelle maintenant la «salle de projection vidéo domestique» («home theater» en anglais).

Des critères de conception spécifiques sont apparus pour répondre aux exigences nouvelles posées par la sonorisation de salle de projection vidéo domestique. Les haut-parleurs qui y sont utilisés seront-ils ou pas ceux que de la stéréophonie binaurale ? La réponse à cette question n'est pas simple. Il est tentant, puisque la bande sonore des films est constituée pour l'essentiel de musique, de penser que les enceintes acoustiques de la salle de projection vidéo domestique n'ont donc rien de spécifique par rapport aux enceintes en usage pour la stéréophonie. Ces deux systèmes doivent reproduire l'un comme l'autre la musique et la parole. Un examen plus attentif du mixage du son pour le cinéma fait cependant apparaître, entre ces deux types de reproduction sonore, des divergences fondamentales.

L'essentiel de la musique enregistrée pour les disques compacts est mixée dans des studios de dimensions réduites comparées à celles

d'un studio cinématographique. L'ingénieur du son se trouve à moins de trois ou quatre mètres des moniteurs principaux, et à un ou deux mètres de ceux posés sur la console. La musique est donc mixée en champ proche. La disposition physique d'un studio de doublage et de post-synchronisation cinématographique est très différente. Les pistes sonores de films sont mixées dans de petites salles de projection, où la console se situe à dix ou douze mètres des moniteurs et de l'écran, voire vingt-cinq mètres dans le cas des studios Disney. Mixé dans un volume acoustique important, le résultat sonne formidablement dans une grande salle de projection équipée de ses imposants haut-parleurs à pavillon, égalisés selon la «courbe X» ou la «home curve» (courbe domestique) SMPTE A202M/ISO 2969 qui compense l'acoustique du local par une accentuation de 3 dB/octave à partir de 2 kHz [1]. Reproduite par un enregistreur vidéo ou une platine laser, la même bande son donne un son excessivement brillant comparé à celui des enregistrements conventionnels ; cet effet est plus perceptible lorsque l'image (et donc le son) font appel à des effets spéciaux.

Les pistes sonores de films ne sont malheureusement pas post-synchronisées pour être reproduites dans une pièce d'habitation normale, si bien qu'il faut résoudre ce problème en fin de chaîne de reproduction. Cette observation mena Tom Holman à mettre au point la norme domestique THX (*Tomlinson Holman eXperiment*) [2]. Sa réponse fut d'introduire une certaine égalisation des fréquences élevées dans le processeur sonore (basé sur la même puce *Dolby Pro Logic* que l'équipement non spécifiquement destiné au THX), qui consiste en une désaccentuation des fréquences élevées pour les haut-parleurs fron-

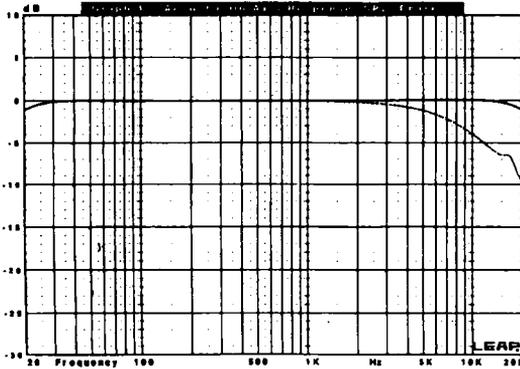


Figure 10.1 : Courbes de réponse du système "Dolby Pro Logic" (courbe continue) et du processeur THX (pointillés) pour les signaux des haut-parleurs frontaux et central dans le mode "large".

taux de 3 dB à 10 kHz et 6 dB à 20 kHz (figure 10.1).

Cela relève davantage de l'égalisation que de la conception des enceintes acoustiques, mais nous donne une idée des différences entre les haut-parleurs destinés à l'écoute musicale et ceux destinés à la vidéo. L'équilibre spectral des enceintes destinées à la vidéo est encore plus critique que celui du matériel stéréophonique usuel. Au minimum, une courbe de réponse plate est exigée et une accentuation de l'extrémité aiguë du spectre sonore doit spécifiquement être évitée. Au contraire, une légère atténuation de l'aigu, souvent favorisée par les audiophiles, constitue un compromis valable pour les deux types de musique. D'où l'on peut conclure que l'égaliseur par tiers d'octave a sa place dans les systèmes sans processeur THX.

La directivité ne fait pas non plus l'unanimité. Les enceintes directives, utilisées depuis longtemps dans volumes acoustiques importants afin d'accroître l'intelligibilité (en limitant les réflexions) et pour y produire un champ sonore uniforme, n'ont jamais été populaires pour l'audition dans des espaces restreints,

comme par exemple l'auditorium domestique ou le studio d'enregistrement. Cependant, des expériences conçues pour mettre en lumière la différence entre systèmes directifs et systèmes omnidirectionnels utilisés dans les salles de cinéma inspirèrent dans une certaine mesure Tom Holman lorsqu'il mit au point le système THX pour le cinéma, et plus tard lorsque furent établis les critères pour le système THX de la salle de projection vidéo domestique.

Aucun conflit substantiel n'oppose les recommandations des laboratoires Dolby (producteur de toutes les puces pour le matériel des salles de projection vidéo domestiques, qu'il réponde ou non aux normes THX) et les équipements produits sous licence Lucasfilm, il existe néanmoins quelques différences marquées [3]. Ce qui suit indique des directives générales utiles pour la conception des enceintes acoustiques destinées à la salle de projection vidéo domestique.

10.2 Aperçu des enceintes acoustiques de la salle de projection vidéo domestique

Les systèmes destinés à la salle de projection vidéo domestique comprennent tous quatre éléments de base: les enceintes frontales gauche et droite, une enceinte centrale équidistante des deux précédentes, les enceintes arrière gauche et droite pour le son ambisonique, et une enceinte subsonique comme l'illustre la figure 10.2. Si la configuration typique comprend six enceintes, de nombreuses variantes existent aussi: élimination de l'enceinte subsonique et son remplacement par deux systèmes à large bande pour les enceintes avant gauche et droite, ou utilisation de deux enceintes subsoniques plutôt que d'une pour arriver à un système à sept

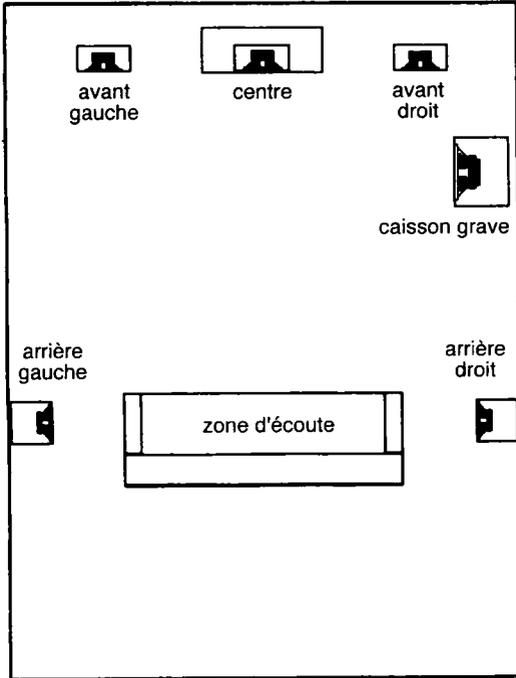


Figure 10.2 : Placement typique des enceintes acoustiques dans la salle de projection vidéo domestique.

enceintes... Quoi qu'il en soit, le système à six sources est dérivé des quatre canaux du processeur *Dolby Pro Logic* (gauche, droite, centre et ambiance) et des 5 + 1 canaux du format AC-3 (frontaux gauche et droite, central, arrière gauche et droite, ambiance qui constitue le canal supplémentaire).

Indépendamment des questions de configuration, il est généralement admis que les enceintes frontales gauche, droite et centrale doivent avoir au moins le même timbre. Afin de satisfaire cette exigence, elles doivent toutes être pourvues des mêmes haut-parleurs de grave, de médium et d'aigu, ainsi que de filtres répartiteurs identiques, et leurs courbes de réponse doivent être semblables. Les enceintes arrière idéales devraient également comprendre les mêmes éléments d'aigu, de médium et de grave que les

enceintes frontales, mais cette exigence n'est pas aussi stricte que pour les sources frontales. Comme l'industrie se convertit au système numérique à 5 + 1 canaux *Dolby AC-3*, il sera davantage nécessaire que les timbres des enceintes acoustiques arrière soient identiques à celui des enceintes frontales, parce que la reproduction des effets ambiophoniques nécessite pour cette norme une large bande passante.

10.3 Enceintes frontales latérales

La hauteur (géométrique) des enceintes frontales gauche, centrale et droite constitue l'un des paramètres les plus importants. La figure 10.3 représente l'agencement idéal par rapport à l'écran vidéo : les enceintes sont toutes alignées dans un même plan horizontal. Cela établit une référence horizontale précise pour les effets spéciaux, comme par exemple dans le cas d'une voiture qui se déplace d'un bord à l'autre de l'écran. Lorsqu'une grande différence existe entre la hauteur des enceintes frontales gauche et droite et celle de l'enceinte centrale, comme l'illustre la figure 10.4, l'image de l'objet en mouvement paraît confuse et manque de naturel à cause de la variation de hauteur de l'image sonore. Un décalage modéré, de 30 cm ou moins, reste acceptable.

La hauteur est un facteur important pour le dimensionnement de toutes les enceintes frontales et le choix de la disposition de leurs haut-parleurs. Les enceintes frontales ne sont pas aussi distantes que dans le cas de la stéréophonie binaurale, où l'angle idéal pour la restitution d'une bonne image sonore est de 60°. Un angle aussi large a tendance à créer une image trop étendue pour la vidéo, si bien que 45° sont généralement préconisés (figure 10.6) [4,5,6].

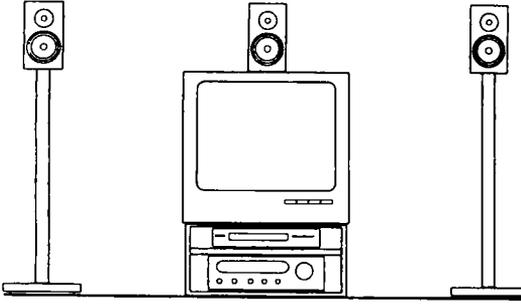


Figure 10.3 : Installation correcte des enceintes frontales gauche et droite et de l'enceinte centrale.

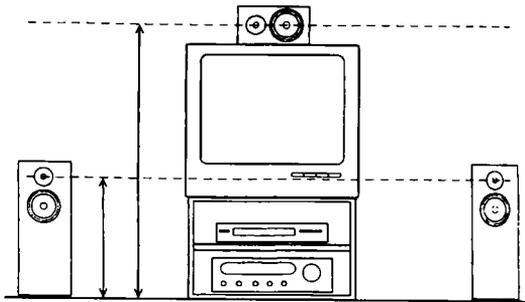


Figure 10.4 : Installation erronée des enceintes frontales gauche et droite et de l'enceinte centrale.

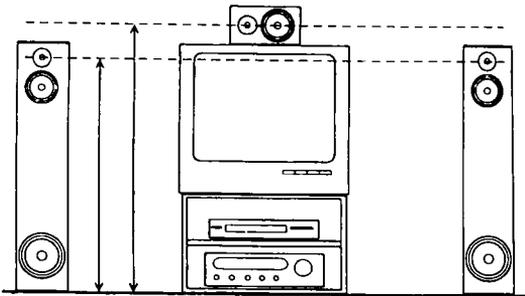


Figure 10.5 : Compromis acceptable pour l'installation des enceintes frontales gauche et droite et de l'enceinte centrale.

10.4 Blindage magnétique

Le principe de fonctionnement et la construction des tubes à rayons cathodiques qui équipent la plupart des récepteurs de télévision (les équipements à projection arrière ou frontale constituent un infime pourcentage de ces appareils) impose de les protéger contre l'intense champ rayonné par l'aimant des haut-parleurs. Le fort champ magnétique provoqué par un haut-parleur placé à proximité de l'écran suffit pour entraîner des distorsions de l'image et des couleurs. Si le tube reste exposé suffisamment longtemps, cette distorsion de l'image persistera même après éloignement de la source du champ. Il sera alors nécessaire de démagnétiser l'écran. Plus l'écran est large, plus il sera sensible à cet effet, les tubes de 70 cm et plus étant les pires à cet égard. Les nouveaux tubes dont le rapport d'aspect est 16 x 9 sont plus sensibles que les anciens tubes de proportions 4 x 3 [7, 8].

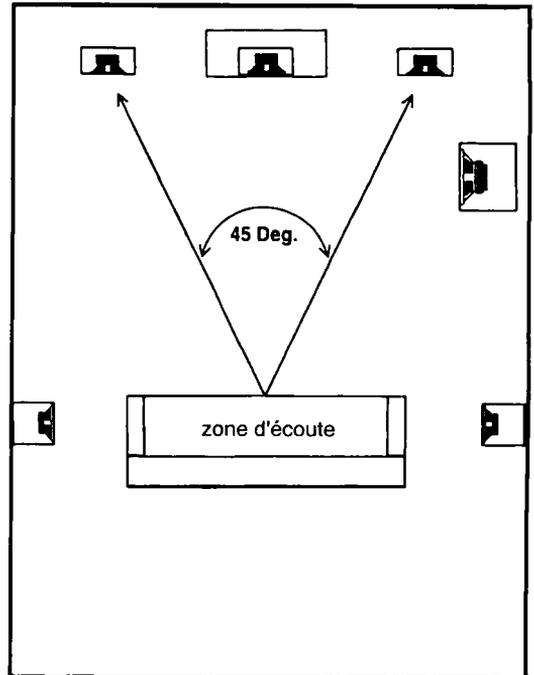


Figure 10.6 : Angle de placement des enceintes frontales gauche et droite par rapport à la position centrale dans la zone d'écoute.

Le blindage magnétique est une absolue nécessité pour l'enceinte centrale, et il est vivement recommandé pour les enceintes frontales gauche et droite. Les haut-parleurs des enceintes subsoniques doivent également être blindés s'ils sont disposés à l'avant du local à proximité du tube à rayons cathodique ou proches d'un système de projection, généralement posé à même le sol à l'arrière de la salle.

La figure 10.7 illustre deux méthodes de blindage contre le champ magnétique d'un haut-parleur. Dans la première, un aimant additionnel de compensation (*bucking magnet* en anglais) est fixé au culot du circuit magnétique, la polarité de son champ magnétique étant opposé à celle de l'aimant principal. Sa taille, plus petite, est déterminée expérimentalement. Cet aimant supprime le champ magnétique latéral du haut-parleur, mais n'influe pas le champ axial. L'aimant de compensation est suffisant pour les enceintes frontales gauche et droite, ainsi que pour les enceintes infra-graves si elles sont placées à au moins 30 ou 60 cm de l'écran, d'après la sensibilité de celui-ci. Généralement, cet aimant n'affectera pas notablement les paramètres de Thiele et Small du haut-parleur, du moins pas assez pour être pris en considération lors de la conception d'une enceinte.

Un blindage plus efficace met en jeu un aimant de compensation ainsi qu'un pot de blindage en métal ferromagnétique qui enferme tout le circuit magnétique du haut-parleur. Mettre au point un haut-parleur correctement blindé n'est pas facile et demande bien des tâtonnements, surtout lorsqu'il faut à la fois concilier des valeurs données des paramètres de Thiele et Small et une courbe de réponse déterminée, et atteindre le degré de blindage requis.

Un certain nombre de critères importants déterminent l'efficacité du blindage. La dimension de l'aimant de compensation restera sensiblement la même pour un haut-

parleur blindé avec ou sans pot en matériau magnétique. Si les parois du pot sont trop fines, le blindage sera insuffisant. En général, on ne peut pas non plus simplement coller le pot de blindage à l'arrière de l'aimant de compensation. Selon les caractéristiques voulues du haut-parleur et l'intensité du champ de l'aimant principal, il faudra souvent que le bord du pot entre en contact avec la plaque frontale du circuit magnétique, ce qui nécessite inmanquablement un usinage particulier de celle-ci. Les paramètres de Thiele et Small du haut-parleur s'en trouveront considérablement modifiés. Atteindre des valeurs identiques à celles du haut-parleur sans blindage relève du tour de passe-passe appliqué aux caractéristiques de la bobine mobile et des éléments du circuit magnétique.

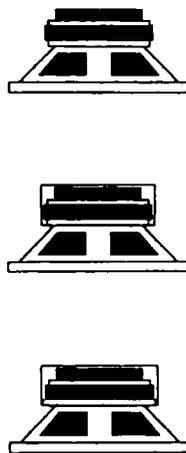


Figure 10.7 : Blindage magnétique des haut-parleurs.

Tous les haut-parleurs de l'enceinte centrale doivent être entièrement blindés, mais cela risque de ne pas suffire pour les enceintes posées directement sur un récepteur de télévision à grand écran, donc sensible aux champs magnétiques. L'utilisation de haut-parleurs multiples peut créer des régions où les champs résiduels interagissent en s'additionnant ou se soustrayant. Même si les haut-parleurs sont suffisamment bien blindés que pour ne provoquer individuellement aucune distorsion visible de l'image, l'installation de

plusieurs haut-parleurs à proximité l'un de l'autre peut créer un champ composite qui perturbera l'image. Recouvrez les parois intérieures de l'enceinte à l'aide de feuilles d'acier galvanisé pour atténuer ce phénomène.

10.5 L'enceinte centrale

L'enceinte centrale est probablement l'élément le plus important dans l'installation de la salle de projection vidéo domestique, et elle délivre près des deux tiers de toute l'énergie acoustique du système [9]. Le canal central non seulement reproduit les dialogues, mais centre sur l'écran la présentation de l'image acoustique. En plus d'une courbe de réponse et de haut-parleurs identiques pour chacune des enceintes frontales, elles doivent être disposées selon une géométrie semblable (par géométrie, entendez la disposition et l'ordre des haut-parleurs sur un axe de symétrie verticale ou horizontale). Les systèmes THX respectent ce critère, mais de nombreux fabricants de systèmes qui ne répondent pas à la norme THX vendent des équipements où les géométries sont mixtes (figure 10.5). Dans ce dernier exemple, les enceintes gauche et droite présentent la même géométrie verticale, parce que tous les haut-parleurs sont superposés. Les figures 10.8 à 10.11 illustrent deux arrangements typiques pour l'enceinte centrale posée sur un récepteur de télévision, avec un ou deux haut-parleurs de graves dans une géométrie verticale ou horizontale. L'enceinte centrale est habituellement disposée horizontalement, à la différence des enceintes frontales gauche et droite. Des considérations d'ordre strictement esthétique justifient cela : la plupart des utilisateurs préfèrent un rapport hauteur/largeur identique pour le récepteur de télévision et pour l'enceinte acoustique. Dans le cas des enceintes à un seul élément de graves comme celle de la figure 10.9, il en résulte une annulation du signal aux environs de la fréquence de

coupure pour les auditeurs situés hors de l'axe du système, comme l'indique la figure 10.12. En comparaison avec la réponse régulière obtenue avec la géométrie verticale, cela se traduit, pour un auditeur situé à 30° de l'axe du système, par une atténuation de 15 dB dans une bande de fréquences relativement étroite centrée sur la fréquence de coupure, puisque les haut-parleurs de grave et d'aigu rayonnent en opposition de phase. L'ouïe humaine ne fonctionne pas à partir d'un point unique comme le fait un microphone de mesure ; pour l'auditeur installé suffisamment hors de l'axe du système, la réponse en fréquence est donc (un peu) modifiée. La solution parfaite consiste à respecter sans compromis les spécifications THX et de placer l'enceinte comme indiqué sur la figure 10.8 en dépit des considérations esthétiques.

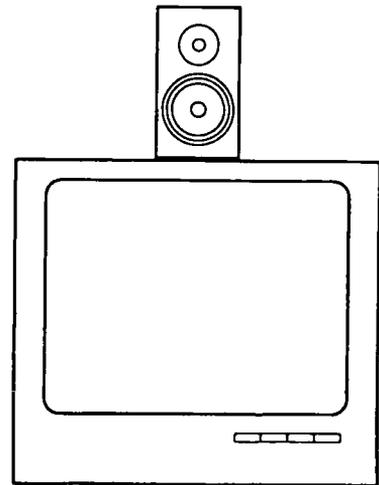


Figure 10.8 : Placement vertical d'une enceinte à un seul haut-parleur de graves pour le canal central.

Les processeurs basés sur le système *Dolby Pro Logic* offrent le choix entre une enceinte centrale à bande large (20 Hz à 20 kHz), ou avec un filtrage passe-haut à 100 Hz (figure 10.14). Comme de nombreux systèmes utilisent une configuration qui élargit le cen-

tre de l'image sonore, les enceintes à deux transducteurs de graves se sont popularisées, principalement parce que le doublement de la surface radiante permet une meilleure reproduction des transitoires basse fréquence. Malheureusement, ce type de disposition pour l'enceinte centrale double le problème posé par les enceintes à un seul haut-parleur de graves (figure 10.15). Comparée à la réponse hors axe régulière de l'enceinte à géométrie verticale (figure 10.16) cette configuration est plutôt inélégante, à cause de la hauteur de l'enceinte et d'un rapport d'aspect différent de celui du téléviseur, comme cela apparaît sur la figure 10.10), le système à deux haut-parleurs de graves à géométrie horizontale présente une courbe de réponse avec des maxima d'atténuation provoqués par l'annulation des signaux provenant des éléments de grave et d'aigu ainsi que d'interférences destructives des ondes émises par les deux haut-parleurs de grave. La fréquence à laquelle apparaît l'annulation du signal hors axe est fonction de la distance entre les deux haut-parleurs de grave. Dans cet exemple, l'atténuation la plus critique atteint 25 dB à 1,5 kHz et 30° de l'axe du système.

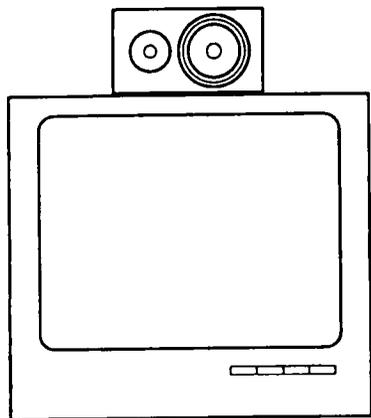


Figure 10.9 : Placement horizontal d'une enceinte à un seul haut-parleur de graves pour le canal central.

Une amélioration est néanmoins possible, même avec une enceinte à double haut-parleur de graves et à géométrie horizontale : l'atténuation hors axe provoquée par la disposition physique des transducteurs est moins marquée quand les haut-parleurs forment un dièdre de 20° à 30° , orienté vers l'arrière de l'enceinte, comme sur la figure 10.17. Les réponses verticales et horizontales d'un tel système avec un angle de 20° sont représentées sur les figures 10.18 et 10.19. (La complexité de la construction explique la rareté de telles réalisations). Les courbes indiquent, pour la géométrie horizontale, des maxima d'atténuation limités à 10 dB, ce qui représente une amélioration de 15 dB par rapport à un montage coplanaire. (Le maximum d'atténuation très étroit est dû au filtre répartiteur, parce que cette construction se base sur des transducteurs et un filtre différents de ceux de la figure 10.16). La firme Reinkus Heinz produit un logiciel dénommé ALS-3 qui permet de déterminer les lobes dans la réponse hors axe [10]. Il per-

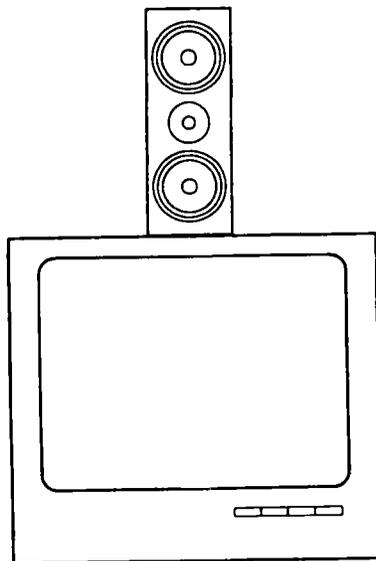


Figure 10.10 : Placement vertical d'une enceinte à deux haut-parleurs de graves pour le canal central.

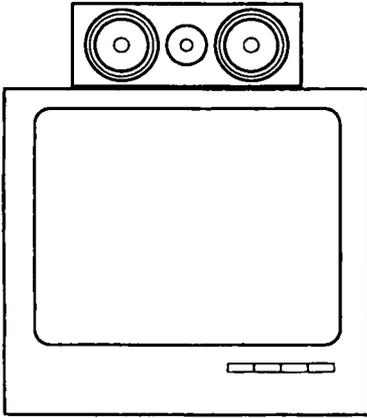


Figure 10.11 : Placement horizontal d'une enceinte à deux haut-parleurs de graves pour le canal central.

met la modélisation de différentes enceintes, comme celle présentée ci-dessus (voir l'article paru dans *Voice Coil* de juillet 1993).

10.6 Utiliser la directivité verticale

Lors du développement de la norme THX pour le cinéma et pour la salle de projection vidéo domestique, il a été établi expérimentalement que des enceintes acoustiques directives optimisées pour couvrir la zone d'audition et pour réduire le rayonnement acoustique dans les autres directions (notamment au-dessus et en dessous du plan où se situent les auditeurs) améliorent l'intelligibilité des dialogues. La norme approuvée par Lucasfilm, dont la licence est accordée aux constructeurs de systèmes THX domestiques, tient compte de cette observation. Les figures 10.20 et 10.21 illustrent deux dispositions qui produisent la directivité verticale recherchée.

Une combinaison de deux éléments d'aigu comme celle représentée sur la figure 10.20 n'a jamais convaincu en haute-fidélité à cause

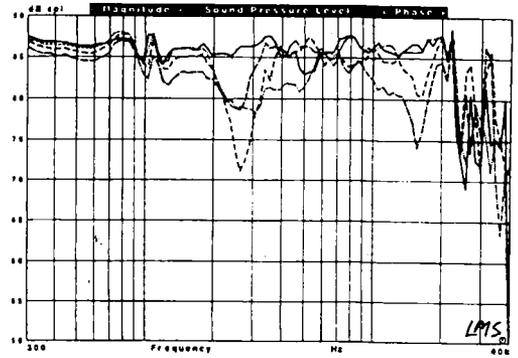


Figure 10.12 : Réponse en fréquence dans l'axe et hors axe d'une enceinte à un seul haut-parleur de graves disposée horizontalement (0 = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

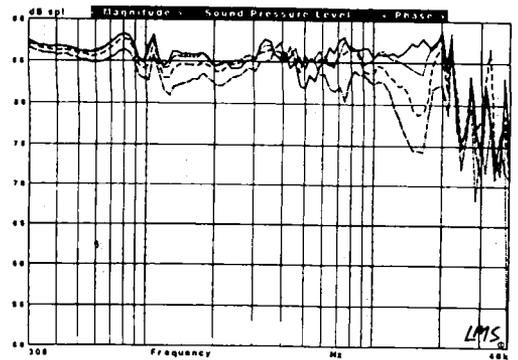


Figure 10.13 : Réponse en fréquence dans l'axe et hors axe d'une enceinte à un seul haut-parleur de graves disposée verticalement (0 = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

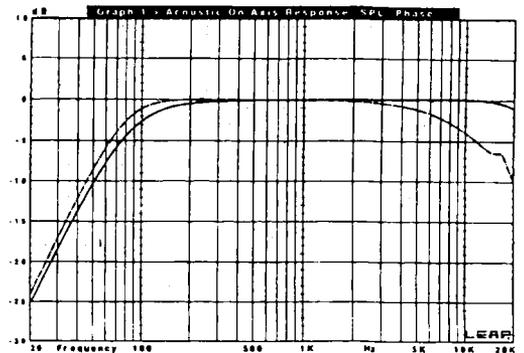


Figure 10.14 : Courbe de réponse des processeurs pour les systèmes Dolby Pro Logic (trait continu) et THX (trait mixte) pour le canal central en mode normal.

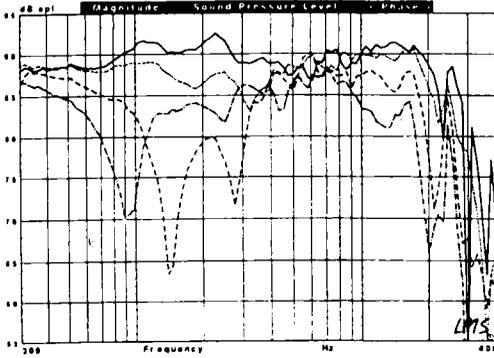


Figure 10.15 : Réponse en fréquence dans l'axe et hors axe d'une enceinte à deux haut-parleurs de graves disposée horizontalement (0 = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

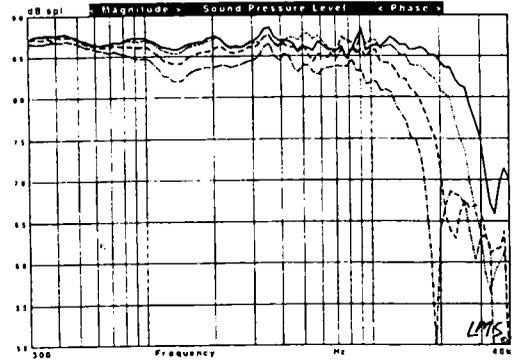


Figure 10.18 : Réponse en fréquence dans l'axe et hors axe d'une enceinte à deux haut-parleurs de graves montés sur dièdre disposée verticalement (0 = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

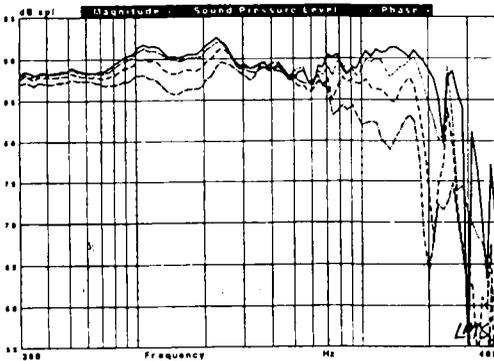


Figure 10.16 : Réponse en fréquence dans l'axe et hors axe d'une enceinte à deux haut-parleurs de graves disposée verticalement (0 = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

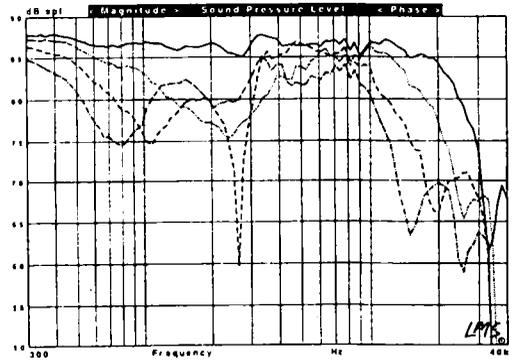


Figure 10.19 : Réponse en fréquence dans l'axe et hors axe d'une enceinte à deux haut-parleurs de graves montés sur dièdre disposée horizontalement (0° = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

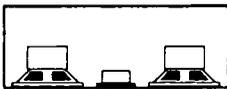


Figure 10.17 : Comparaison entre le montage coplanaire ou avec dièdre des deux haut-parleurs de graves d'une enceinte pour le canal central.

de l'effet de filtre en peigne qui apparaît aux fréquences élevées. Cet arrangement est pourtant assez commun pour des enceintes acoustiques de haut de gamme. Des fabricants comme B&W, Snell et Duntech ont utilisé des systèmes à trois voies construits selon la configuration préconisée par D'Appolito depuis un certain nombre d'années. Un renforcement de la directivité verticale est une conséquence inévitable de ce type de géométrie, particulièrement lorsque la

fréquence de croisement médium-aigu se situe dans la gamme de fréquences les plus élevées que peut transmettre le haut-parleur médium. Cela n'a pas empêché Lucasfilm d'être propriétaire de la spécification exacte pour ce type d'enceintes. Cette disposition permet d'obtenir un rapport hauteur / -largeur esthétiquement favorable, tout en conservant une géométrie identique à celle des enceintes frontales gauche et droite. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une fréquence de séparation entre les parties grave et médium du spectre aussi basse que possible (200 à 400 Hz). Que l'on optimise ou non le système en fonction de la directivité verticale, il est opportun de tenir compte de la disposition des haut-parleurs lors de la conception d'un système pour la salle de projection vidéo domestique.

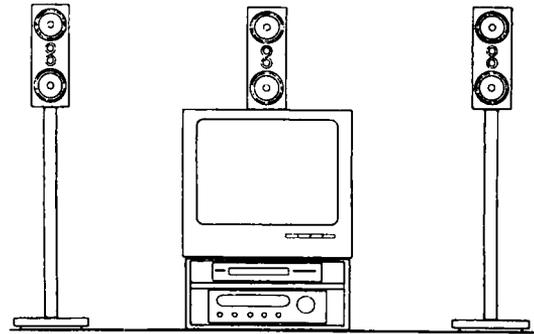


Figure 10.20 : Configuration d'enceintes à deux voies à directivité contrôlée.

10.7 Enceintes arrière pour le son ambiophonique

Dans une vraie salle de projection vidéo, la disposition des enceintes acoustiques des canaux ambiophoniques est substantiellement différente de celle des salles de projection vidéos domestique (figure 10.22). Pour assurer une couverture sonore homogène du vaste volume d'une salle de cinéma, de nombreuses enceintes sont disposées régulièrement le long des murs latéraux et du fond, en hauteur par rapport aux auditeurs. Des lignes à retard compensent les retards de propagation qui pourraient compromettre l'intelligibilité du son. Il importe de noter que, à l'opposé du procédé *Dolby Pro Logic*, les canaux arrière dans la salle de projection vidéo sont enregistrés séparément et ne sont pas obtenus par traitement des canaux frontaux dans un système matriciel. Pour le standard *Dolby AC-3*, les canaux arrière sont enregistrés séparément, si bien que cette différence est moins marquée.

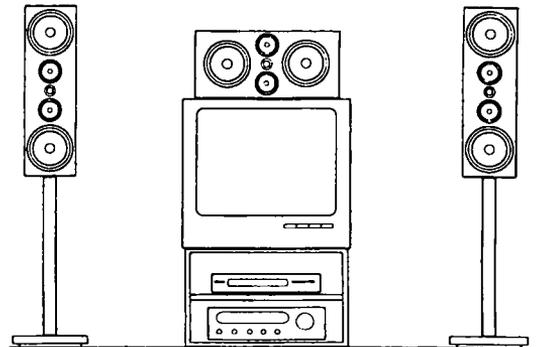


Figure 10.21 : Configuration d'enceintes à trois voies à directivité contrôlée.

Que le système matriciel *Dolby Pro Logic* ou le système *Dolby AC-3* à canaux enregistrés individuellement soient utilisés dans la salle de projection vidéo domestique, l'objectif est d'y reproduire le même effet acoustique que dans un vrai cinéma. Les enceintes ambiophoniques doivent être à même de produire un champ sonore diffus et enveloppant, qui donne au spectacle sa dimension spatiale, et qui contribue à la spatialisation des effets spéciaux. Ce but complexe est atteint au mieux lorsque les sources acoustiques ne peuvent être localisées par l'auditeur. À cette fin, les processeurs *Dolby Pro Logic* modifient la

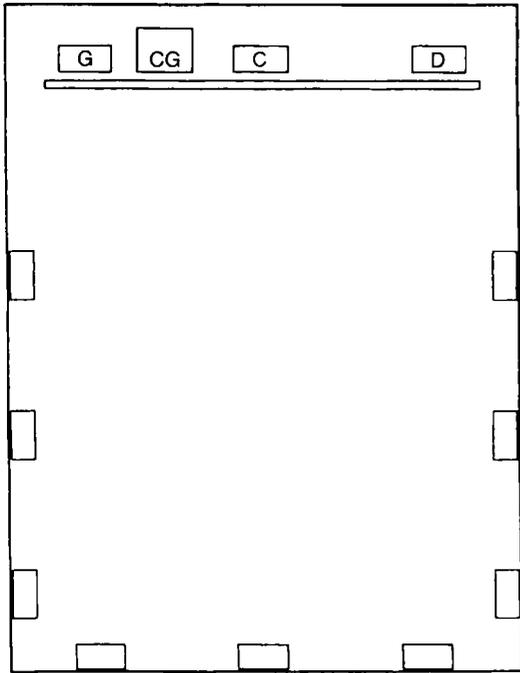


Figure 10.22 : Disposition des enceintes ambiophoniques dans une salle de cinéma typique.

réponse en fréquence des canaux ambiophoniques en désaccentuant les fréquences élevées à partir de 7 kHz (figure 10.23). Le processus par lequel l'audition humaine repère les sources sonores est assez complexe, et il a été constaté que la localisation est plus difficile si les fréquences au-dessus de 5 kHz, gamme couverte par les haut-parleurs d'aigu, sont atténuées.

La courbe d'égalisation THX corrige également le problème posé par la variation de timbre, lorsque le son se déplace des enceintes frontales vers celles des canaux ambiophoniques. Le processeur *Dolby Pro Logic* désaccentue également les fréquences inférieures à 100 Hz, si bien que la bande passante des canaux d'ambiance s'étend de 100 Hz à 7 kHz. Le standard *Dolby AC-3* offre pour les canaux ambiophoniques le choix entre une réponse large bande de 20 Hz à

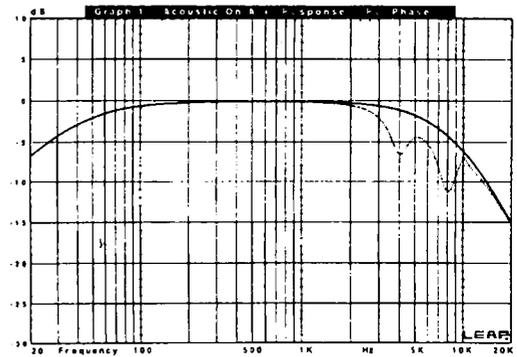


Figure 10.23 : Courbe de réponse des processeurs pour les systèmes *Dolby Pro Logic* (trait continu) et *THX* (trait mixte) pour les canaux arrière.

20 kHz, une bande limitée de 100 Hz à 7 kHz ou des effets d'ambiance plus localisés [12]. Le standard AC-3 prévoit bien des canaux séparés pour les signaux d'ambiance, mais cela ne signifie pas qu'un monopôle à directivité contrôlée soit nécessaire pour les reproduire. Dans un dialogue sur Internet en avril 1995, Tom Holman déclara que les expériences initiales relatives au système THX et les investigations plus récentes dans le cadre de la norme AC-3, effectuées par Kevin Voecks de la firme Snell Acoustics, indiquent que les auditeurs, qu'ils soient expérimentés ou pas, préfèrent le son rayonné par un dipôle, caractérisé par sa zone d'annulation du champ, à celui d'un transducteur monopolaire à large bande orienté vers la zone d'audition.

Les laboratoires Dolby préconisent d'installer les enceintes ambiophoniques latéralement, directement orientées vers la zone d'audition, à une hauteur de 60 cm à 1 m au-dessus des auditeurs, comme l'indique la figure 10.24. La fréquence à partir de laquelle la partie supérieure du spectre sonore est désaccentuée est située de sorte que cette pratique reste acceptable. Si un moyen de créer un champ plus diffus existe, il aura la préférence. Afin de ren-

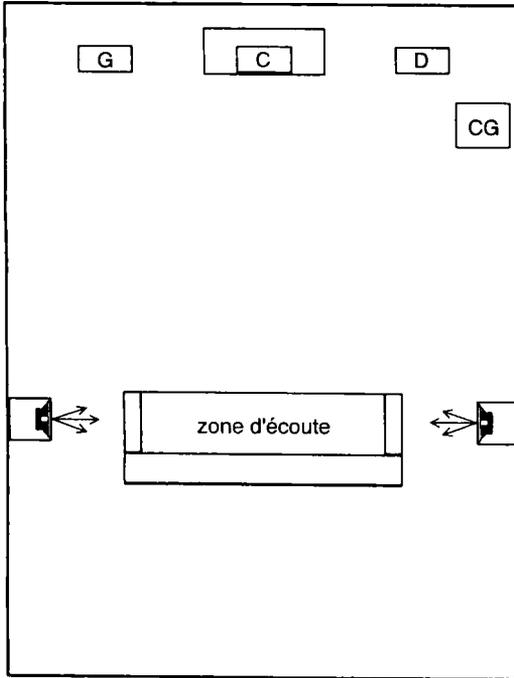


Figure 10.24 : Placement préconisé pour les enceintes des canaux ambiophoniques arrière.

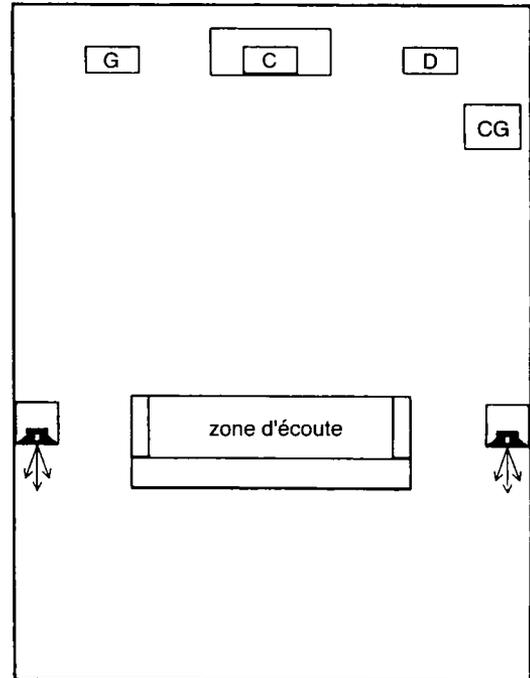


Figure 10.25 : Placement alternatif (orientation vers le fond du local) pour les enceintes des canaux ambiophoniques arrière.

forcer la diffusion, il est possible d'orienter une enceinte de type monopôle vers la paroi du fond ou le plafond du local (figures 10.25 et 10.26).

Les enceintes dipolaires pour le son ambiophonique constituent une catégorie tout à fait distincte de transducteurs. Elles sont la propriété intellectuelle exclusive de Lucasfilm (brevets américains 5 222 059 et 5 109 416). Dans tout transducteur dipolaire, comme par exemple l'écran *Magneplan*, l'interférence destructive des ondes avant et arrière crée une zone d'annulation de la pression acoustique dans un plan normal à l'axe du système, comparable au diagramme en huit des micros à ruban. Lucasfilm n'est pas à l'origine des premiers brevets de reproduction du son ambiophonique par des enceintes dipolaires, mais cette compagnie a affiné et promu l'utilisation domestique de cette technique, et

défend l'opinion que le dipôle simule le mieux les enceintes installées aux murs gauche, droite et arrière d'un cinéma.

Pour opérer efficacement, les enceintes dipolaires d'ambiance doivent être situées latéralement par rapport à l'emplacement des auditeurs, qui se trouvent dans la zone d'annulation de la pression acoustique, comme l'illustre la figure 10.27. Les haut-parleurs dont le mouvement est positif doivent être orientés en direction des enceintes frontales. Le mouvement est dit positif si la membrane se déplace vers l'avant lorsqu'on fait passer un courant continu dans la bobine mobile en appliquant le pôle positif de la pile sur la borne «+».

Pour concevoir des enceintes dipolaires ambiophoniques, il ne suffit pas d'inverser la polarité d'un des jeux de haut-parleurs. Selon

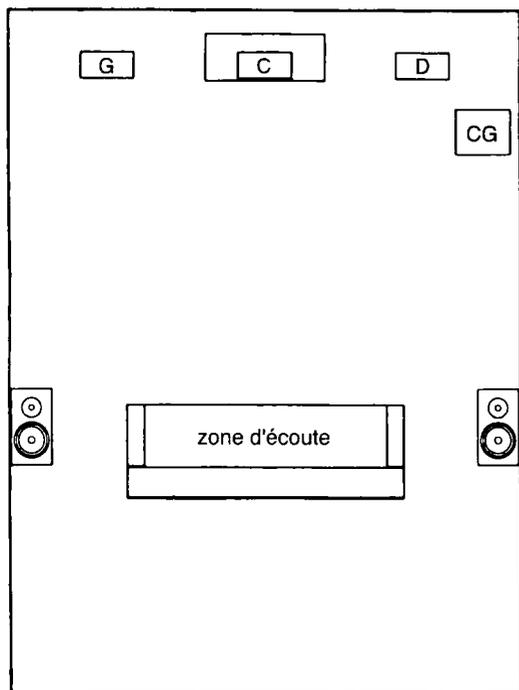


Figure 10.26 : Placement alternatif (orientation vers le plafond) pour les enceintes des canaux ambiophoniques arrière.

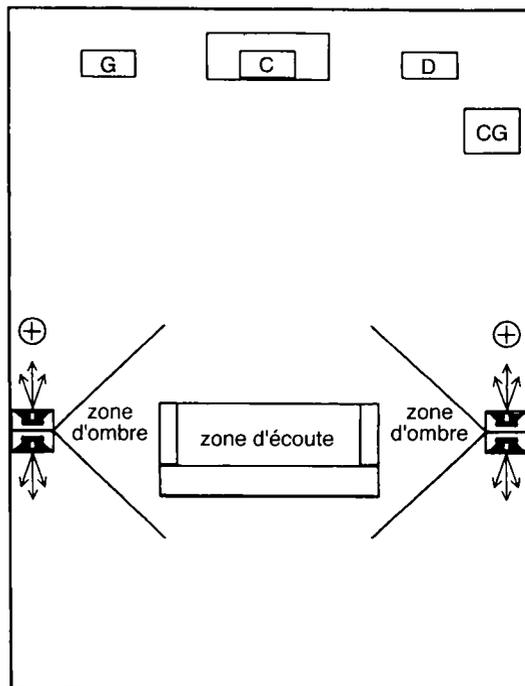


Figure 10.27 : Placement pour les enceintes de type dipôle des canaux ambiophoniques arrière.

la distance entre haut-parleurs, déterminante pour la réponse en fréquence et l'atténuation maximum, il sera nécessaire ou non de revoir le filtre répartiteur pour chacun d'entre eux. Il existe dans le commerce de nombreuses enceintes à la conception desquelles a présidé le thème du dipôle (figure 10.28). Il est primordial que les haut-parleurs de grave soient dans des volumes séparés, sans quoi les fréquences les plus basses seraient supprimées. Certains constructeurs placent avant l'un des haut-parleurs de grave un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure est établie entre 100 et 200 Hz, afin d'atténuer l'évanouissement des fréquences les plus basses et de renforcer la réponse du système dans ce registre.

La figure 10.29 représente la réponse en fréquence d'une enceinte dipôle (type 7 de la figure 10.28) mesurée au point d'atténuation

maximum dans la zone d'annulation du champ acoustique, à 0° du plan de symétrie et à 45° de l'axe d'une paire de transducteurs. L'atténuation maximum apparaît clairement pour des fréquences supérieures à 2 kHz. On notera que ce système construit sous licence THX (par *Triad Speakers*) présente également une désaccentuation intentionnelle de l'aigu au-delà de 10 kHz (mesurée dans l'axe d'un des jeux de haut-parleurs), suggérant que l'effet désiré est de délocaliser davantage la source sonore. Cette atténuation supplémentaire n'est pas une propriété caractéristique des dipôles. De nombreuses réalisations, y compris les premiers modèles produits par Snell sous licence THX, ont une réponse plate jusque 20 kHz, sans aucune atténuation supplémentaire (superflue avec le processeur *Pro Logic*, mais qui peut se révéler utile pour le système AC-3).

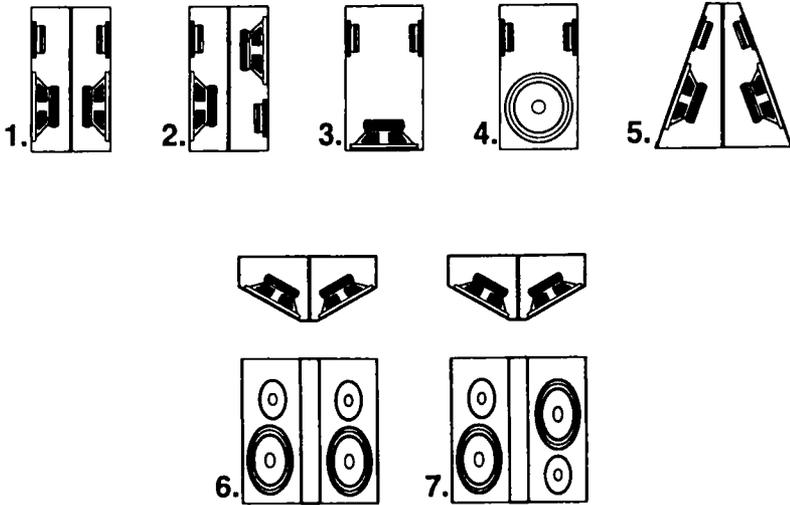


Figure 10.28 : Différentes constructions d'enceintes dipôles pour les canaux ambiophoniques arrière.

La figure 10.30 montre la réponse en fréquence à 0° , 15° , 30° et 45° du plan de symétrie et indique que la zone d'annulation du champ est assez étroite. Certains constructeurs offrent la possibilité de commuter les haut-parleurs afin de les remettre en phase et de passer d'une configuration dipolaire à une configuration bipolaire. Pour obtenir un bon diagramme de rayonnement bipolaire il ne suffit pas nécessairement d'inverser la polarité, et certains systèmes bien conçus, disponibles dans le commerce, ont des sections graves et aigus séparées pour les deux jeux de haut-parleurs afin de produire une réponse régulière en des points situés largement hors axe. Les bipôles permettent une meilleure spatialisation que les dipôles, et créent aussi un champ ambiophonique diffus. Certains fabricants sont allés jusqu'à connecter les haut-parleurs de grave en phase, alors que seuls les deux transducteurs d'aigu peuvent être commutés de manière à obtenir un rayonnement dipolaire ou bipolaire. Cela permet de choisir une plus ou moins grande localisation, tout en conservant une charge normale pour les graves dans les deux situations.

10.8 Enceintes subsoniques

Les enceintes subsoniques utilisées en vidéo sont appelées à reproduire beaucoup plus que les notes graves du pédalier d'orgue ou d'un synthétiseur. De nombreux effets spéciaux du cinéma sont très exigeants dans le domaine des basses fréquences, et comportent des sons tels que des explosions, des tremblements de terre, le bruit d'une escadrille d'avions à réaction en rase-mottes ou même le fracas des pas d'un *tyrannosaurus rex* (que l'on écoute donc *Jurassic Park* à un niveau sonore de 105 dB !). Non seulement ces effets sont par définition exigeants quant à l'extension du spectre vers l'extrême grave, mais en plus les producteurs de films les exagèrent lors du mixage de la bande son afin d'accentuer encore le caractère hyper-réaliste de leurs œuvres, de sorte que les enceintes pour le registre grave extrême sont encore sollicitées davantage. Par conséquent, le besoin d'une excursion linéaire aussi longue que possible de la membrane des haut-parleurs est encore plus grand que pour l'écoute musicale.

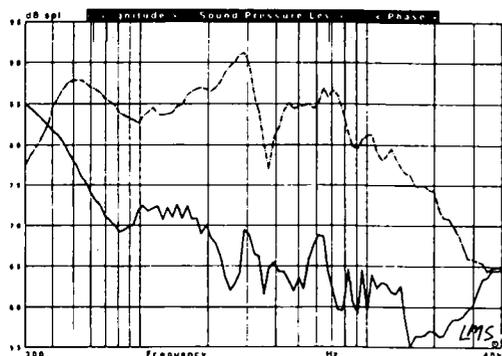


Figure 10.29 : Réponse en fréquence d'une enceinte dipolaire pour canal ambiophonique (trait continu = axe d'annulation de la pression acoustique ; trait mixte = dans l'axe des transducteurs du canal gauche).

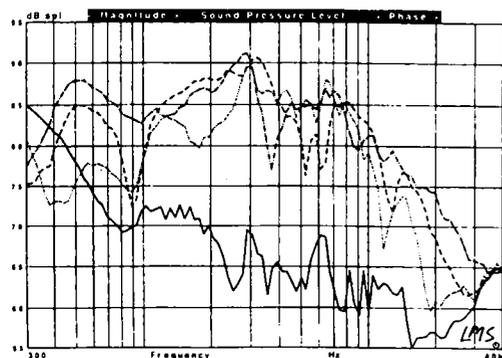


Figure 10.30 : Réponse en fréquence d'une enceinte dipolaire pour canal ambiophonique (0° de l'axe d'annulation de la pression acoustique = trait continu ; 15° = trait pointillé ; 30° = trait interrompu ; 45° = trait mixte).

La spécification pour le niveau dans le registre infra-graves en vidéo exige -3 dB à 30 Hz, ce qui n'est pas trop difficile à obtenir d'une enceinte de dimensions modérées. Ce sont simplement l'excursion de la membrane et la réponse transitoire qui posent le problème. Dans ce type d'application, le mieux est d'utiliser les haut-parleurs de petit diamètre (15, 20 et 25 cm) par paires, mais il ne faut pas s'attendre que les enceintes subsoniques

équipées de haut-parleurs de 15 cm produisent, dans de grandes pièces, un niveau acoustique important aux fréquences inférieures à 50 Hz. Pour obtenir un niveau acoustique élevé dans de grands locaux (plus de 100 m^3), il faut au minimum deux haut-parleurs de graves de 30 ou 38 cm par enceinte [13]. Les fabricants de matériel vidéo équipent souvent leurs produits d'une paire de haut-parleurs de 25 cm ou un élément unique de 30 ou 38 cm.

Le lecteur intéressé par l'ambiance très spéciale et mal connue du mixage au cinéma en trouvera une belle évocation dans le numéro 46 7/8 des Cahiers du Cinéma (mai 1993). Cela se passe à l'Auditorium 1 des Studios de Billancourt, lors du mixage du film *Ma saison préférée* d'André Téchiné, avec Catherine Deneuve et Daniel Auteuil.

Bibliographie

1. T. Holman, *New factors in sound for cinema and television*, JAES, 7-8/91
2. T. Holman, *Home THX: Lucasfilm's approach to bringing the theater experience home* Stereo Review, 4-94
3. Dolby Laboratories information: *Speakers systems for multi-channel audio* Dolby Laboratories, réimpression n° S88/8272
4. R. Dressler, *Important considerations for Dolby Surround S & VC*, 9/91
5. T. Holman, *The center channel*, Audio, 4/93
6. *A listener's guide to Dolby surround*, Dolby Laboratories Réimpression n° S94/10258
7. *User friendly shielding plots*, Vifa Newsletter, hiver 1995
8. *Speakers for surround sound - stray fields and to maintain them*, Peerless International Newsletter, 1/94

9. **D. Kumin**, *Center field: the right speaker for the critical center channel*, *Stereo Review*, 4/93
10. ALS-3 Software, Renkuz-Heinz, 17191 Armstrong Ave., IRVINE CA 92714, USA
11. **F. Alton Everest**, *The master handbook of acoustics*, troisième édition, Tab Books, 1994
12. **R. Dressler**, *The (near) future of multichannel sound*, *Dolby Laboratories*, 1994, Réimpression n° S94/10009, p. 51
13. **R. A. Greiner**, *Lowdown on subwoofers*, *Audio*, 8/93

11 Enceintes acoustiques pour l'auto

11.1 Enceintes pour voitures et matériel domestique

Selon qu'elle est destinée à une salle de cinéma publique ou à une salle de projection domestique, ou encore à une automobile, les bases de conception d'une enceinte acoustique ne seront évidemment pas les mêmes. Les enceintes pour voiture posent un défi unique en son genre, en plaçant le concepteur dans un environnement pour ainsi dire hostile. Concevoir des enceintes pour voitures revient à «adapter des petites boîtes dans une boîte à peine plus grande».

Les questions les plus souvent posées ces dernières années lors de conférences pour des groupes d'installateurs de sonorisation pour voiture se rapportent à la validité des paramètres de Thiele et Small pour les enceintes de basses et à la manière de créer une aussi bonne image stéréophonique que pour les systèmes domestiques de haute qualité. Ce chapitre traite des principaux sujets qui interviennent lors de l'installation de haut-parleurs haute-fidélité dans les automobiles.

11.2 Champ acoustique libre et champ clos

Lorsque un haut-parleur se trouve dans un vaste espace acoustique ouvert, comme par exemple suspendu dans l'air à 15 m du sol, il n'y a pas de réflexions. Des mesures effectuées dans ces conditions rendront compte uniquement des caractéristiques propres du haut-parleur et de l'enceinte. Cette situation est définie comme le «champ libre» ou l'environnement anéchoïque, qui a été présenté dans la section 8.8.1 du chapitre 8.

Tout volume fermé où se propage le son constitue un espace acoustique, dont il existe en gros deux catégories : les grands volumes au nombre desquels on compte les palais des sports et les auditoriums, et les petits volumes comme les studios d'enregistrement ou les pièces d'une habitation, ou encore, cas extrême, l'habitacle d'une Ferrari 348. Ce sont tous des exemples de champ fermé. Lorsque les dimensions d'un local décroissent et qu'avec elles le champ acoustique diminue par rapport à la longueur d'onde des sons à reproduire, les ondes stationnaires, les réflexions et les effets aux interfaces jouent un rôle prépondérant dans la réponse en fréquence du lieu. Dans des espaces de la taille d'une automobile moyenne, l'acoustique peut être décrite comme un champ dissipatif [1].

Un champ de pression parfait serait délimité par des parois rigides, qui ne transmettraient aucune vibration, comme par exemple des murs en béton de 30 cm d'épaisseur. Les voitures ont des parois métalliques minces, flexibles, et qui vibrent, d'où le qualificatif «dissipatif». Dans un champ de pression parfait, le niveau de pression acoustique aux basses fréquences serait constant, mais comme certaines parties de la voiture vibrent plus que d'autres, il existe une variation imprévisible (3 à 6 dB) du niveau sonore aux basses fréquences. C'est là un défaut acoustique des automobiles dont il faut être conscient.

Lorsqu'une enceinte est installée dans un champ de pression, il en résulte un relèvement considérable du niveau de la partie basse du spectre. Par exemple, une pièce d'appartement usuel provoquera un accroissement de 3 à 5 dB du niveau à 20 Hz. Dans une voiture, cet accroissement modeste sera nettement renforcé. Ce phénomène dérouté

de nombreux constructeurs d'enceintes de basses pour automobile. Les prédictions basées sur la méthode Thiele et Small, qu'elles soient établies à l'aide d'une calculette d'après les méthodes de calcul exposées dans cet ouvrage ou avec un ordinateur, sont réellement très précises, mais ne valent qu'en champ libre. Elles ne tiennent pas compte de l'environnement acoustique dans lequel sera placée l'enceinte.

11.3 Effets du champ clos sur les performances des haut-parleurs de grave

Quelques mesures simples permettent d'évaluer l'influence d'un champ clos sur les performances d'une enceinte de basses. Les paramètres opérationnels intéressants sont l'impédance, l'excursion de la membrane et la réponse en fréquence. Si leurs modifications lors du passage d'un champ libre à un champ clos dissipatif dans un volume restreint sont connues, il est alors possible d'exploiter rationnellement les paramètres de Thiele et Small pour la conception d'une enceinte.

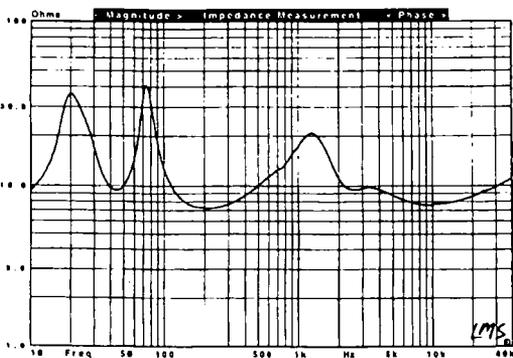


Figure 11.1 : Courbe d'impédance en champ libre d'une enceinte à évent.

La figure 11.1 représente la courbe d'impédance d'une enceinte à évent mesurée en champ libre. Plaçons-la ensuite dans

l'habitacle d'une petite voiture, dont le volume avoisine 4 m^3 , répétons la mesure de sa courbe d'impédance et superposons-la au diagramme de la figure 11.1 : comme l'indique la figure 11.2, aucun changement n'apparaît. Le champ clos n'a donc aucune influence sur l'impédance de l'enceinte. Comme les facteurs de qualité sont calculés sur base de l'impédance, il est raisonnable de supposer que Q_{ts} et Q_s de l'enceinte ne changent pas en champ clos.

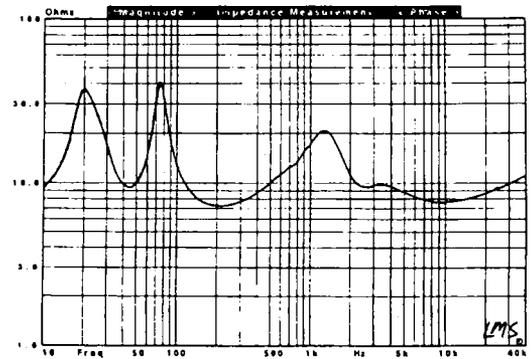


Figure 11.2 : Comparaison des courbes d'impédance en champ libre (trait continu) et en espace clos (trait pointillé).

L'excursion de la membrane, directement liée à la puissance qui peut être délivrée ainsi qu'à la distorsion, est un aspect important des performances de l'enceinte. La figure 11.3 représente une simulation, réalisée à l'aide du programme LEAP, de l'amplitude de l'excursion de la membrane d'un haut-parleur de grave Kenwood HQW300 de 30 cm installé dans une enceinte de dimensions restreintes. Un petit accéléromètre piézoélectrique similaire à ceux du chapitre 9 a été couplé à la membrane du haut-parleur, et l'accélération en champ libre a ensuite été mesurée avec un analyseur LMS LinearX. En la divisant deux fois par la pulsation, on la convertit en amplitude de l'excursion (courbe non calibrée), qui est représentée sur la figure 11.4. Comme la mesure de l'excursion semblait correcte, l'enceinte a été installée ensuite dans

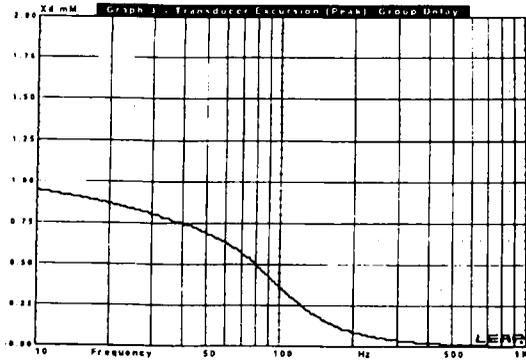


Figure 11.3 : Simulation de l'amplitude de l'excursion en champ libre de la membrane.

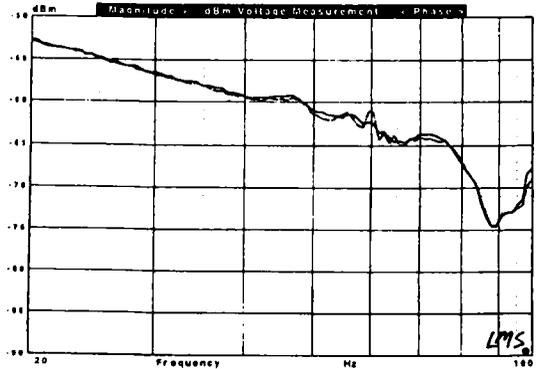


Figure 11.5 : Comparaison des courbes d'amplitude de l'excursion en champ libre et en espace clos.

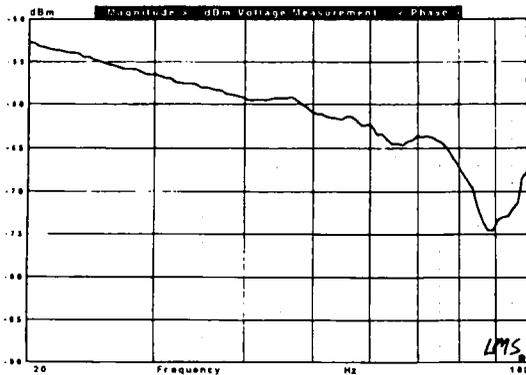


Figure 11.4 : Mesure en champ libre de l'amplitude de l'excursion en champ libre de la membrane.

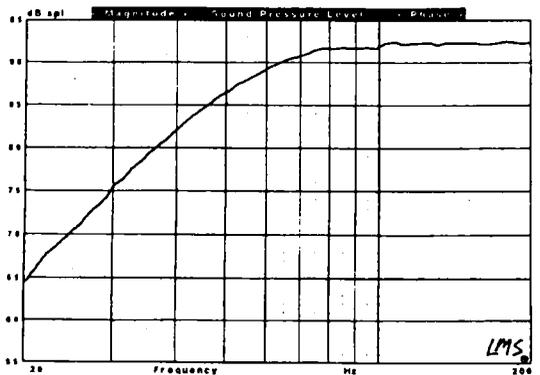


Figure 11.6 : Mesure de la réponse en fréquence en champ libre de l'enceinte de la figure 11.1.

l'habitacle de 4 m^3 du véhicule pour mesurer à nouveau l'accélération de la membrane, qui a encore été convertie en valeurs d'excursion. La figure 11.5 permet de comparer la courbe originale mesurée en champ libre à celle mesurée en champ clos. On en déduit que le champ clos n'a pas d'influence sur l'amplitude de l'excursion de la membrane du haut-parleur. Les prédictions concernant l'excursion et le facteur de qualité de l'enceinte basées sur le modèle de Thiele et Small restent valables jusqu'à présent, autant pour les grands que pour les petits espaces acoustiques.

Examinons maintenant les changements de la réponse en fréquence, qui est probablement le critère le plus aisé à appréhender. La figure 11.6 représente la réponse en fréquence en champ libre du haut-parleur de 18 cm utilisé pour effectuer les mesures d'impédance. (Le haut-parleur de 30 cm a été utilisé pour les mesures d'accélération, parce que la masse de sa membrane est plus élevée que celle de l'accéléromètre, si bien que ses caractéristiques n'ont pas été affectées.) Cette courbe est pratiquement aussi parfaite que si elle provenait d'un programme de simulation du modèle de Thiele et Small, et la courbe mesurée ne se distinguerait probablement

pas de la courbe obtenue par calcul. Dès lors que cette enceinte à évent est installée dans l'habitacle de voiture de 4 m³, le résultat est radicalement différent de la réponse en champ libre. Le graphe de la figure 11.7 représente la réponse en fréquence (en fait une moyenne obtenue en sommant les signaux d'un certain nombre de microphones placés sur et à proximité du siège du conducteur), parfois appelée «fonction de transfert du véhicule» (lorsque les valeurs de la réponse de l'enceinte ont été soustraites), qui se caractérise par un accroissement de 7 à 8 dB à 40-50 Hz et de 20 dB à 20 Hz, ce qui est considérable. Lorsque l'on considère l'énorme marge de puissance et la gamme dynamique d'un amplificateur nécessaire pour obtenir électroniquement des performances identiques, ceci n'est pas loin d'être spectaculaire.

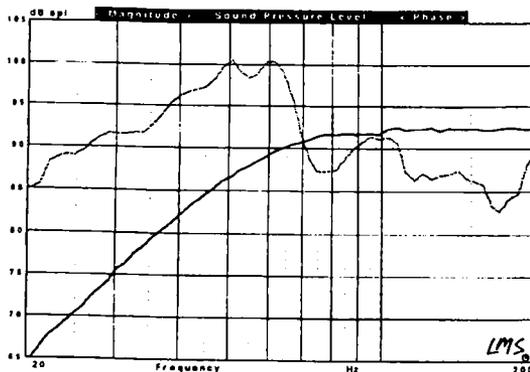


Figure 11.7 : Comparaison de la courbe de réponse en champ libre de la figure 11.6 à la courbe de réponse mesurée en espace clos.

Ces mesures expérimentales permettent de conclure que l'espace réduit d'une voiture ne modifie que le niveau de pression acoustique du haut-parleur. Si les valeurs calculées de la fréquence de coupure f_3 et de la réponse en fréquence sont complètement erronées, les autres paramètres tels que l'amortissement ou l'excursion de la membrane restent fiables.

11.4 Simulation par ordinateur du fonctionnement en champ clos

Afin d'évaluer l'influence de la fonction de transfert du véhicule sur la réponse en champ libre d'une enceinte, il est utile d'examiner l'effet de différents volumes d'habitacles sur divers types d'enceintes, chacune caractérisée par une fréquence et une pente de coupure distinctes. Il serait particulièrement fastidieux de construire une série d'enceintes différentes et de chacune les mesurer dans une gamme de véhicules allant de la Toyota MR-2 au Dodge Caravan. Heureusement, le programme LinearX LEAP possède une fonction de simulation du champ clos dans sa section de conception rapide d'enceintes (*Quick Cabinet Box Design*). Elle permet d'obtenir une assez bonne représentation des changements de niveau de pression acoustique apportés par le champ clos (au moment de la publication de l'édition américaine, LEAP de LinearX était le seul logiciel du marché susceptible de calculer une simulation en champ clos. Un autre programme, TermPro, permet à l'utilisateur de mesurer la fonction de transfert du véhicule et de la superposer à différents simulations de réponse d'enceintes).

La section *Quick Cabinet* du logiciel LEAP est un programme annexe de calcul qui fait appel aux paramètres de Thiele et Small (la section principale est plus complexe, et utilise un certain nombre de paramètres dépendants de la fréquence qui ne se trouvent pas dans le modèle d'ordre 4 de Thiele et Small). Le programme permet la conception d'enceintes pour une gamme de paramètres des haut-parleurs en champ libre ou en champ limité. La modélisation en champ limité permet de spécifier le volume de l'espace clos et un facteur de pertes comme par exemple le fait de fermer une fenêtre ou d'ouvrir une porte.

Afin de vérifier l'exactitude des prévisions, deux enceintes différentes ont été utilisées :

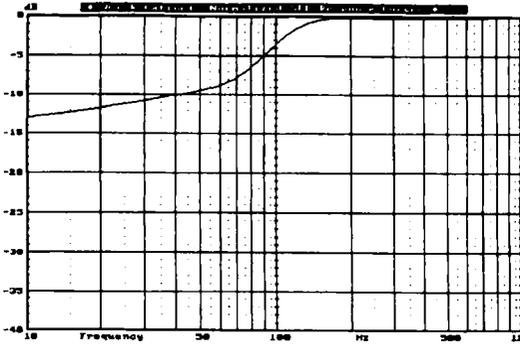


Figure 11.8 : Simulation par ordinateur de la courbe de réponse en espace clos d'une enceinte close.

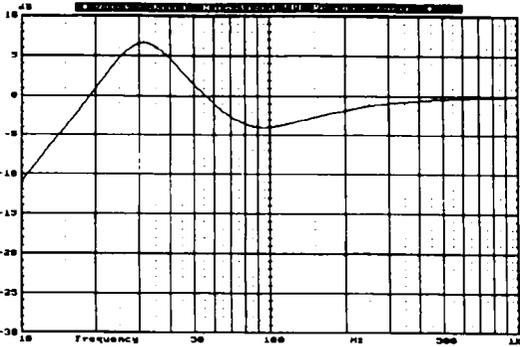


Figure 11.9 : Simulation par ordinateur de la courbe de réponse en espace clos d'une enceinte à évent.

un haut-parleur de 10 cm dans une petite enceinte close, ayant une réponse à -3 dB à 100 Hz en conditions anéchoïques, et un haut-parleur de 20 cm installé dans une enceinte à évent dont la coupure à -3 dB se situe à 29 Hz. Cela fournirait deux profils de réponses, d'une part une enceinte close avec une fréquence de coupure élevée et une pente douce, et d'autre part une enceinte à évent avec une fréquence de coupure basse et une pente raide, qui serviraient à tester la réponse dans les deux octaves inférieures.

Les figures 11.8 et 11.9 représentent les prédictions du logiciel *Quick Cabinet* respective-

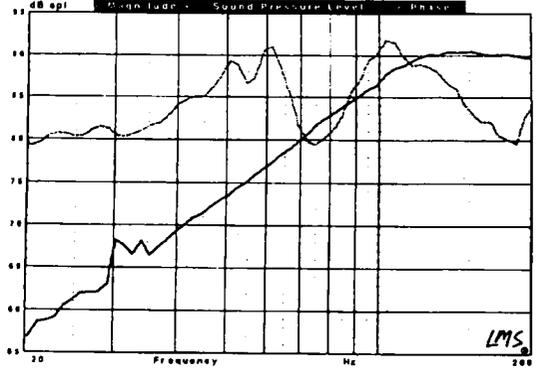


Figure 11.10 : Comparaison de la réponse en champ libre ou dans un espace clos de la courbe de réponse de l'enceinte utilisée pour la simulation en champ clos de la figure 11.8.

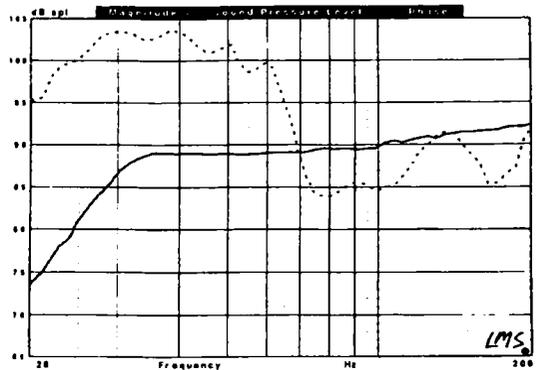


Figure 11.11 : Comparaison de la réponse en champ libre ou dans un espace clos de la courbe de réponse de l'enceinte utilisée pour la simulation en champ clos de la figure 11.9.

ment pour l'enceinte close munie du haut-parleur de 10 cm ainsi que pour l'enceinte à évent munie du haut-parleur de 20 cm lorsqu'elles sont installées dans l'habitacle de 4 m^3 de la Nissan 240SX (à pertes nulles). Les figures 11.10 et 11.11 permettent de comparer les mesures anéchoïques à celles effectuées dans l'automobile pour chacune de ces enceintes. Pour les besoins de la démonstration, j'ai placé le microphone dirigé vers l'avant au niveau du siège du conducteur et à hauteur de tête, tandis que l'enceinte de basses était disposée à l'arrière extrême du

véhicule (une position typique pour une enceinte de basses pour voiture).

Les prédictions de LEAP et les mesures réelles sont assez bien corrélées. Dans le cas du haut-parleur de 10 cm, la mesure met en évidence deux modes en onde stationnaire à 80 et 190 Hz, qui provoquent des creux dans la courbe de réponse. La prédiction de -12 dB correspond assez bien à la valeur mesurée de -11 dB à 20 Hz. Pour le haut-parleur de 20 cm, la simulation par ordinateur de la figure 11.9 indique un pic centré sur 40 Hz, et un creux centré sur 90 Hz. Cela correspond assez bien à la forme de la courbe mesurée de la figure 11.11. Les ondes stationnaires ne sont pas prises en compte, mais les simulations à l'aide de *Quick Cabinet* donnent une assez bonne image de la réponse en champ libre et sont assez proches des mesures pour permettre d'arriver à quelques conclusions générales.

Comme l'ordinateur fournit une image relativement fidèle des phénomènes acoustiques en champ clos, les simulations suivantes donneront une assez bonne idée de l'effet du volume intérieur de différentes autos sur le rendu de quelques types d'enceintes. Cette courte étude se base sur quatre constructions d'enceintes de grave : enceintes closes, enceintes à évent, enceintes à réponse passe-bande avec volume arrière clos ou équipé d'un évent. Le volume de l'habitacle des véhicules est compris entre 2 et 10 m³. Pour chaque enceinte, l'alignement sera sous-critique, critique ou supercritique. Dans le cas de l'enceinte close, cela correspond à un facteur de qualité global dont les valeurs sont respectivement de 0,5, 0,7 et 1,1. Pour les enceintes à évent, cela correspondra à des alignements de type sub-Chebyshev / Bessel, quasi-Butterworth 3 et Chebyshev (dénommé *Extended Bass Shelf* dans le programme Leap). Ce dernier alignement est caractéristique d'enceintes volumineuses, dont la fréquence de résonance est basse, et dont la pression acoustique à la fréquence de coupure est

inférieure à la pression acoustique nominale du haut-parleur. Les enceintes de type passe-bande se basent sur trois compromis : bande étroite et haut rendement, largeur de bande moyenne et rendement moyen, bande large (fréquence de coupure basse) et faible rendement.

Le volume des véhicules où est testé chaque alignement sera de 2 m³ (petite deux places du type Toyota MR-2), 3 m³ (voiture d'importation moyenne), 4 m³ (Toyota Camry), 6 m³ (Cadillac ou Lincoln Town Car) et 10 m³ (le "Van" moyen). Le volume acoustique dans l'habitacle d'une automobile est assez difficile à définir, non pas à cause des formes particulières qui le délimitent, mais parce qu'il dépend dans une certaine mesure de la fréquence. Par exemple, dans une auto « trois volumes », la barrière que constitue les sièges arrière entre le coffre et l'habitacle est pratiquement transparente aux basses fréquences. Les figures 11.12 à 11.35 représentent les courbes de réponse obtenues pour chacun des types d'enceintes de graves dans les différents volumes d'habitacle (la fréquence de coupure f_3 correspond à l'amortissement nominal dans chacun des exemples).

Quelques conclusions générales se dégagent de ces simulations. Les enceintes closes permettent d'obtenir une réponse plate et régulière jusqu'à 10 Hz pour des alignements supercritiques et des fréquences de coupures élevées. Les industriels utilisent d'ailleurs des haut-parleurs de grave de grand diamètre (25 ou 30 cm) à faible facteur de qualité, normalement conçus pour de grandes enceintes à évent, dans de petites enceintes très fortement amorties. Des haut-parleurs de grave dont le facteur de qualité est faible (Q_{ts} de 0,15 à 0,25) placés dans des enceintes de dimension se caractérisent non seulement par une courbe de réponse régulière et précise, mais aussi par une bonne tenue en puissance si leur suspension supporte les forces pneumatiques produites à niveau élevé. Grand

Enceinte close ($f_3 = 50$ Hz)

Famille d'alignements :

Enceinte close à caractéristique passe-haut

Paramètres du système : $F_s = 31,0$ Hz ;

$Q_{ts} = 0,456$; $V_{as} = 41,9$ l ; $Q_b = 7,0$

Trait continu : alignement Butterworth

Trait pointillé : alignement sous-critique

Trait interrompu : Alignement Bessel

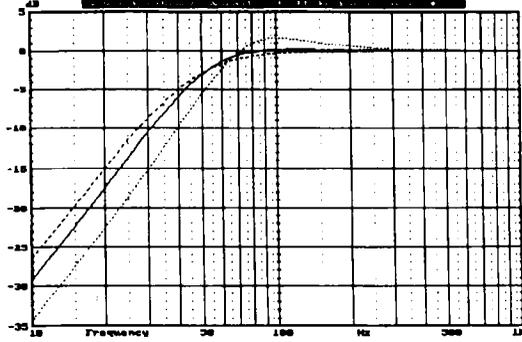


Figure 11.12 : Champ libre

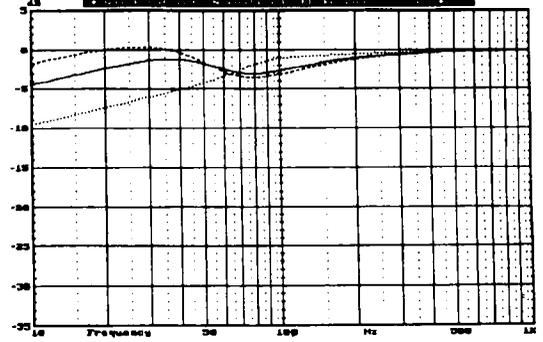


Figure 11.15 : 4 m³

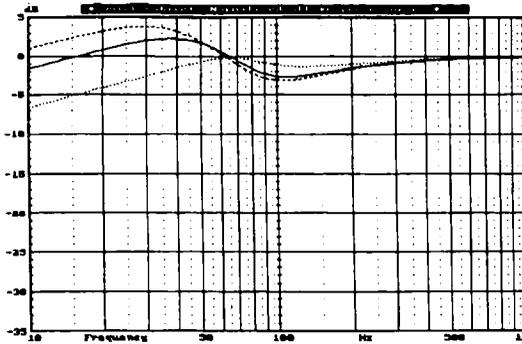


Figure 11.13 : 2 m³

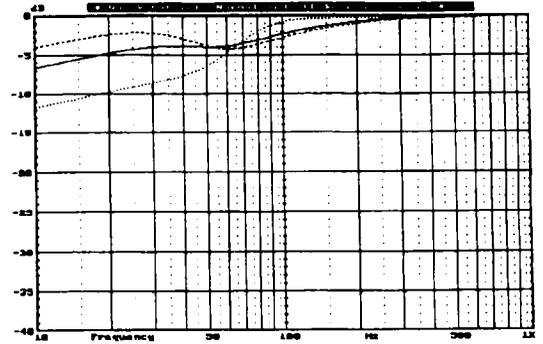


Figure 11.16 : 6 m³

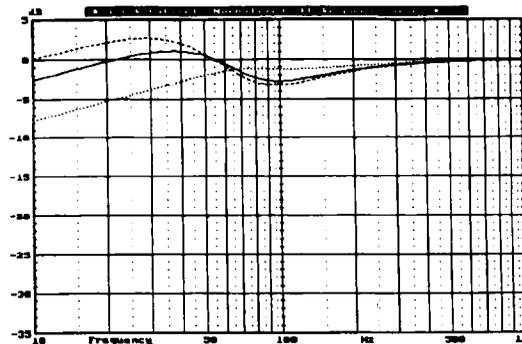


Figure 11.14 : 3 m³

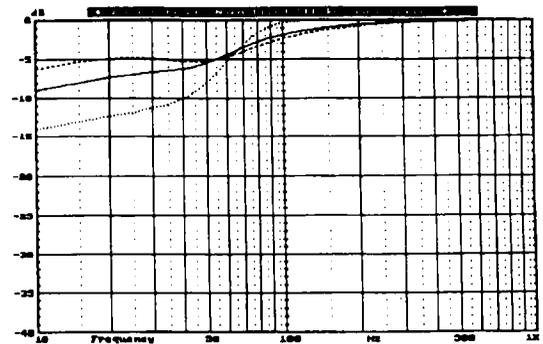


Figure 11.17 : 11 m³

Enceinte à évent ($f_b = 40$ Hz)
 Famille d'alignements : Enceinte à évent ;
 caractéristique passe-haut
 Paramètres du système : $F_s = 29,0$ Hz ;
 $Q_{ts} = 0,343$; $V_{as} = 73,9$ l ; $Q_0 = 7,0$

Trait continu : alignement Quasi-Butterworth
 d'ordre 3
 Trait pointillé : alignement Chebychev
 Trait interrompu : Alignement
 Sub-Chebychev/Bessel

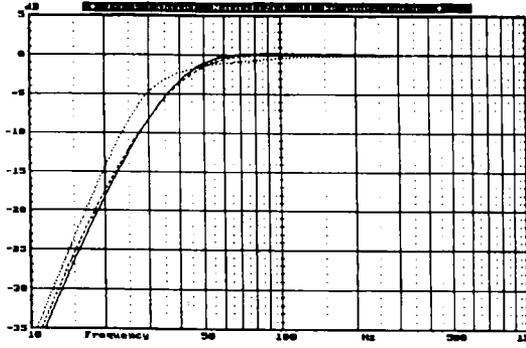


Figure 11.18 : Champ libre

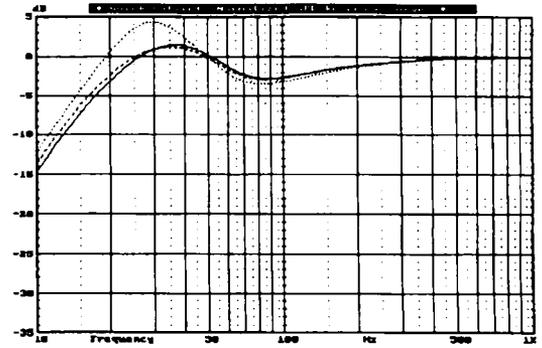


Figure 11.21 : 4 m³

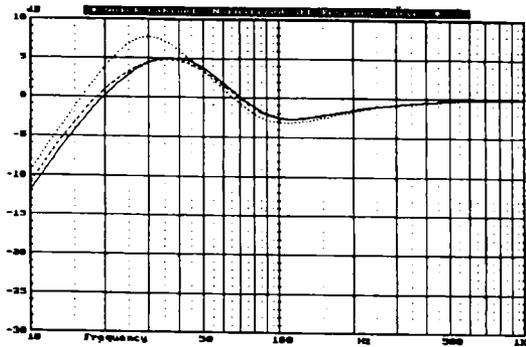


Figure 11.19 : 2 m³

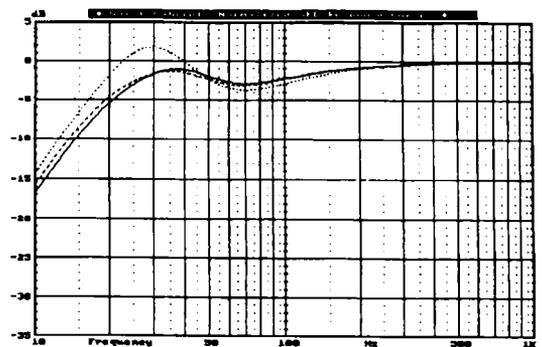


Figure 11.22 : 6 m³

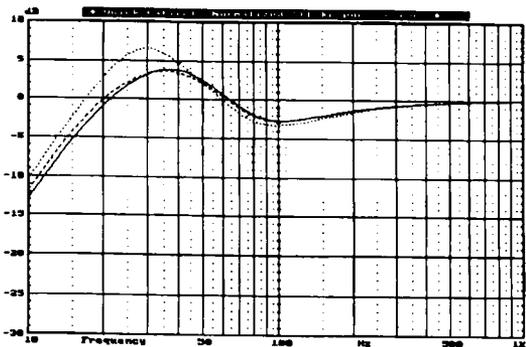


Figure 11.20 : 3 m³

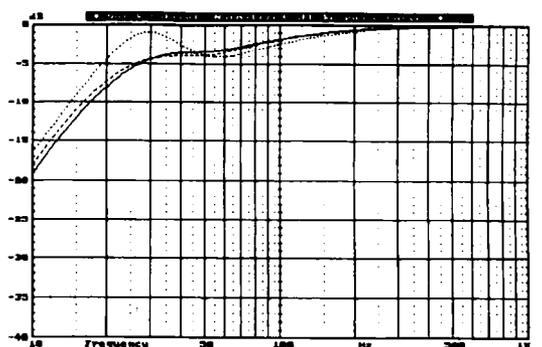


Figure 11.23 : 11 m³

Enceinte de type passe-bande sans évent
($f_3 = 30$ Hz).

Famille d'alignements : Enceinte de type
passe-bande à alignement Butterworth d'ordre 4.

Paramètres du système : $F_s = 25,0$ Hz ;

$Q_{ts} = 0,377$; $V_{as} = 137,3$ l ; $Q_b = 7,0$

Trait continu : $K_v = 0,5$

Trait pointillé : $K_v = 1,0$

Trait interrompu : $K_v = 1,5$

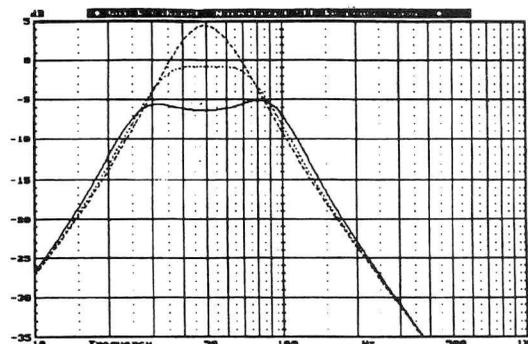


Figure 11.24 : Champ libre

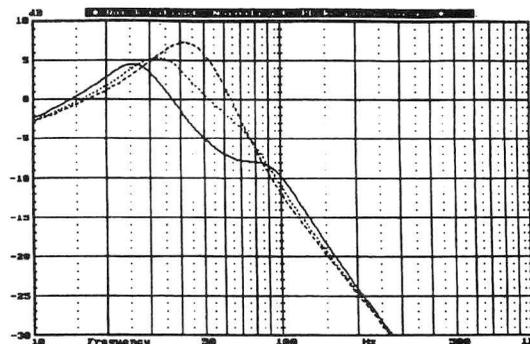


Figure 11.27 : 4 m³

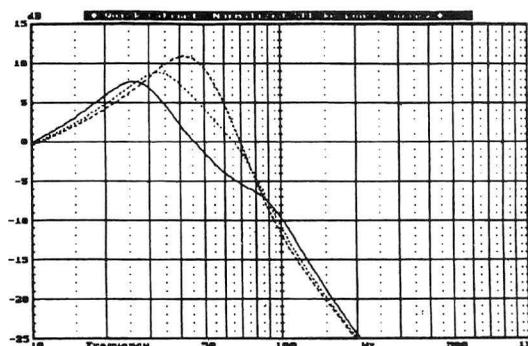


Figure 11.25 : 2 m³



Figure 11.28 : 6 m³

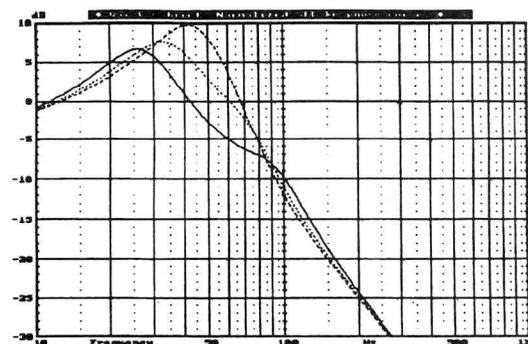


Figure 11.26 : 3 m³

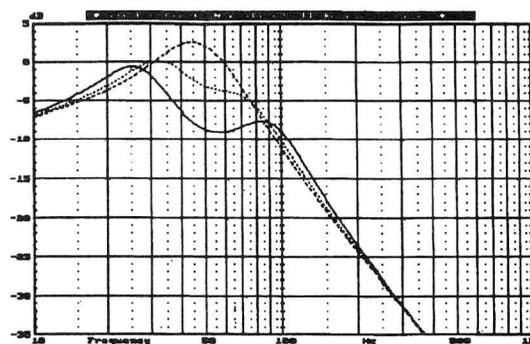


Figure 11.29 : 11 m³

Enceinte de type passe-bande à évent
($f_3 = 25$ Hz).

Famille d'alignements : Enceinte de type
passe-bande à évent.

Paramètres du système : $F_s = 25,0$ Hz ;
 $Q_{ts} = 0,377$; $V_{as} = 137,3$ l ; $Q_b = 7,0$

Trait continu : alignement Butterworth d'ordre 6,
large bande passante.

Trait pointillé : alignement Butterworth d'ordre 6,
bande passante moyenne.

Trait interrompu : alignement Butterworth
d'ordre 6, bande passante étroite

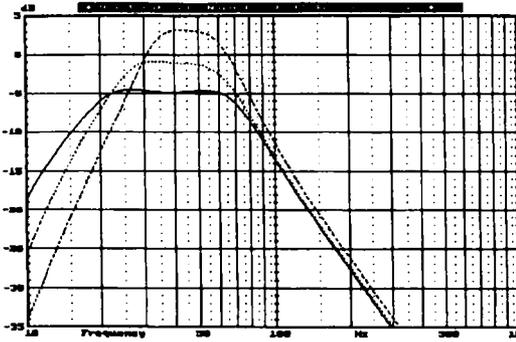


Figure 11.30 : Champ libre



Figure 11.33 : 4 m³

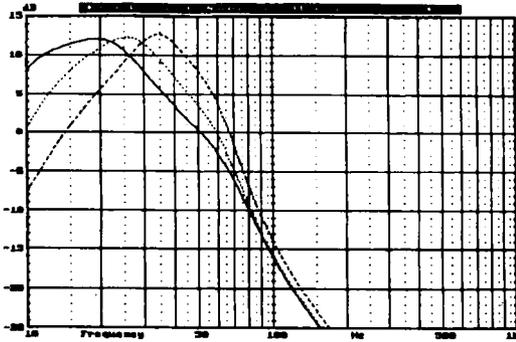


Figure 11.31 : 2 m³

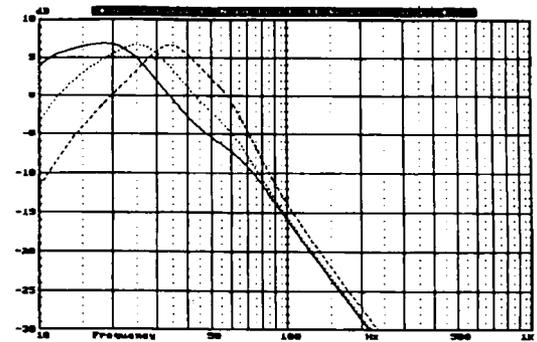


Figure 11.34 : 6 m³

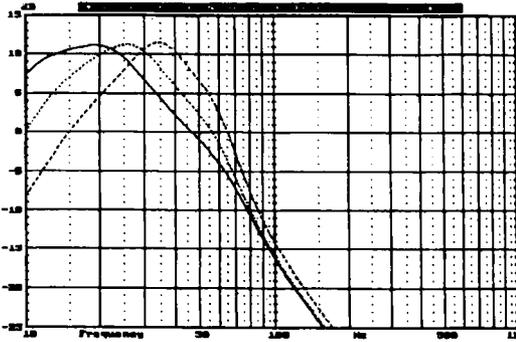


Figure 11.32 : 3 m³

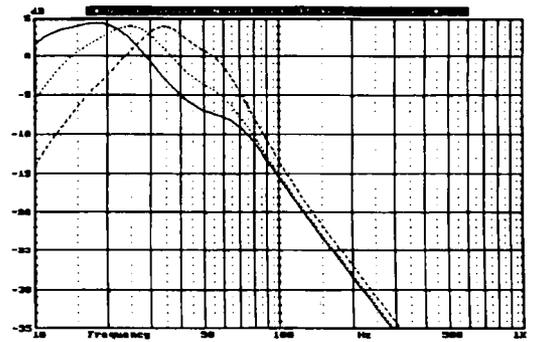


Figure 11.35 : 11 m³

avantage : ils ne nécessitent qu'un volume réduit, facile à caser dans une auto.

Les exemples d'enceintes à évent montrent une augmentation spectaculaire du niveau aux basses fréquences lorsque la fréquence de coupure et le volume de l'habitacle du véhicule décroissent. Pour l'alignement Chebyshev de la figure 11.17, dont la fréquence de coupure se situe à 40 Hz en conditions anéchoïques, on observe un pic de 8 dB centré sur 40 Hz. Il ne faut donc pas s'étonner du rendu exagéré des guitares basses et de la grosse caisse de la batterie, qui explique d'ailleurs l'effet "boum-boum", c'est-à-dire l'impression que l'on a, dans ou à proximité d'autos équipées d'enceintes à fréquence de coupure basse, d'entendre invariablement la même note de basse. Si on désire un niveau exagéré de l'extrémité inférieure du spectre audio, cette solution constitue assurément un choix excellent. Un autre point de vue serait également de corriger le pic à 40 Hz pour le ramener au niveau nominal produit par le reste du système, afin de ne pas pousser l'amplificateur dans ses derniers retranchements et d'éviter l'écrêtage aux volumes élevés.

Les deux types d'alignements passe-bande mènent à des observations similaires. Dans ce cas, il est clair que l'on peut difficilement se baser sur la réponse en fréquence des enceintes pour définir les fréquences et les caractéristiques des courbures de coupure entre les différentes voies d'un système, comme ce serait le cas dans une installation domestique. Il ne reste que l'alternative de mesurer la réponse dans le véhicule et d'ajuster le filtre d'égalisation en conséquence. La conclusion qui s'impose reste cependant que les enceintes de type passe-bande ou à évent se comportent de façon pratiquement identique. Plus la fréquence de coupure sera basse, plus l'amplitude de la réponse dans l'extrémité inférieure du spectre sera renforcée. La figure 11.27 représente la réponse d'une enceinte de type passe-bande

dont la fréquence de coupure est de 18 Hz : installée dans un habitacle de 2 m^3 : le renforcement des basses atteint pratiquement 20 dB à 20 Hz, et pour 10 m^3 , il serait encore de 12 dB à cette fréquence. Il faut ajouter qu'une telle configuration serait probablement impossible dans la pratique, sauf peut-être en installant l'enceinte sur le toit de l'auto !

S'il est possible de connaître d'avance l'influence du volume du véhicule sur la réponse des enceintes (donc de sa fonction de transfert), les techniques de conception de Thiele et Small sont plus faciles à mettre en œuvre. Un logiciel qui permet la simulation en champ clos, comme LEAP par exemple, est également un outil efficace. On peut même, pour se faire une idée de la situation avant de se lancer dans la conception, mesurer dans le volume aux caractéristiques inconnues la réponse d'une enceinte acoustique de propriétés connues.

11.5 Image stéréophonique dans l'auto

Une bonne installation stéréophonique doit donner l'impression d'une présence fantôme entre les enceintes acoustiques, avec un relief et des plans sonores bien distincts. A tel enseigne que dans l'évaluation des mérites d'une enceinte acoustique de haut de gamme, la profondeur, la largeur et la définition de l'image sonore restituée par elle jouent un rôle important [2]. L'un des aspects les plus captivants de la stéréophonie est bien sûr son aptitude à reconstituer entre les enceintes la disposition des musiciens sur la scène. Si l'on ne peut pas prendre le temps, comme le font les audiophiles, de s'asseoir devant les enceintes pour écouter, ce phénomène de spatialisation restera secondaire.

En revanche, l'automobiliste bloqué dans un embouteillage, lui, n'a pas le choix. Il lui faut

rester assis... et écouter de la musique. C'est alors qu'il se rend compte à quel point une bonne spatialisation stéréophonique est agréable. D'ailleurs, lors des concours IASCA, disputés selon des règles définies en 1993, l'appréciation des systèmes de sonorisation d'automobiles accorde une grande importance à leur aptitude à reconstituer l'image stéréophonique. Malheureusement, l'environnement acoustique usuel des véhicules n'est pas très propice pour obtenir de bons résultats.

Pour améliorer la reproduction stéréophonique dans les autos, on peut s'inspirer des critères de l'image sonore dans les installations domestiques :

1. L'auditeur et les deux enceintes doivent se situer aux sommets d'un triangle isocèle de 2 à 3 mètres de côté.
2. Pour chaque bande de fréquences, notamment pour l'aigu, n'utiliser qu'un seul haut-parleur par enceinte. Les enceintes infra-basses (en dessous de 80 à 100 Hz) et les systèmes à disposition symétrique des éléments médium et aigu peuvent faire exception à cette règle.
3. Les courbes de réponse des haut-parleurs de la paire stéréophonique idéale sont identiques, ou du moins appariées.

Si ces critères sont adoptés, les règles de base suivantes se dégagent pour l'optimisation de la reproduction stéréophonique dans l'habitacle des véhicules :

1. Les enceintes principales, qui délivrent l'information au-dessus de 100 Hz, doivent se trouver devant l'auditeur pour produire une bonne image stéréophonique. Ceci exclut donc les enceintes large bande installées sur la plage arrière, excellentes pour produire un son diffus, mais qui ne permettent pas une bonne spatialisation [3, 4].
2. D'habitude, la meilleure image est obtenue avec un satellite à deux voies pour chaque canal : un haut-parleur de médium et un haut-parleur d'aigu montés aussi près l'un de l'autre que possible. Des systèmes à trois

voies sont possibles, généralement leur encombrement les rendra néanmoins inutilisables. La multiplication des haut-parleurs médium et aigu à différents emplacements ne pourra que contribuer à la confusion du champ acoustique confus et compromettre toute possibilité de recréer l'image stéréophonique [5, 6, 7]. À l'instar des installations domestiques, les courbes de réponse des satellites devront être aussi proches que possible l'une de l'autre.

3. La position des haut-parleurs de médium et d'aigu, actifs au-dessus de 100 Hz, doit respecter autant que possible le critère d'équidistance par rapport aux auditeurs. Il existe trois possibilités : le montage des haut-parleurs dans les portes, au-dessus du tableau de bord ou latéralement sous le tableau de bord. Les figures 11.36 à 11.38 donnent une idée des distances relatives pour chacune de ces dispositions [8]. La plus proche de l'équidistance est la disposition latérale des haut-parleurs sous le tableau de bord. Cette position peut paraître trop basse pour fournir une hauteur correcte de l'image stéréophonique, mais le résultat est plus qu'acceptable. Son inconvénient majeur réside dans la nécessité de panneaux en plastique moulé de forme particulière pour orienter les haut-parleurs sous un angle correct vers la zone d'écoute.
4. Il n'est pas nécessaire pour la reproduction d'une bonne image stéréophonique de placer les enceintes de grave à l'avant du véhicule. Sous 80 à 100 Hz, l'oreille humaine a du mal à localiser les sources sonores. Le cerveau humain assimile alors la position des sources de basses fréquences à celle des sources de signaux de fréquence plus élevée, en l'occurrence les satellites à l'avant de l'habitacle. Les filtres passe-bas des enceintes de basses doivent être au moins du quatrième ordre et couper à 80 ou 100 Hz. Cela permet une atténuation maximum des fréquences élevées, et brouille la perception de la position réelle des haut-parleurs de graves. La place idéale de ces enceintes est aussi la plus pratique : dans le panneau situé

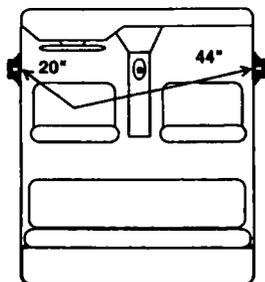


Figure 11.36 : Distance relative entre l'auditeur et les haut-parleurs installés dans les portières.

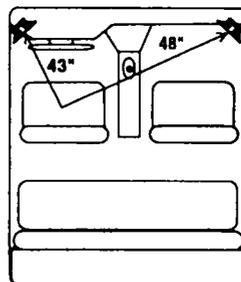


Figure 11.38 : Distance relative entre l'auditeur et les haut-parleurs installés latéralement sous le tableau de bord.

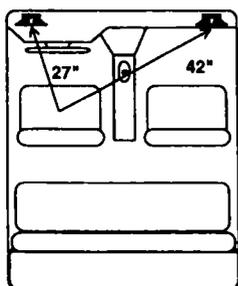


Figure 11.37 : Distance relative entre l'auditeur et les haut-parleurs installés au-dessus du tableau de bord.

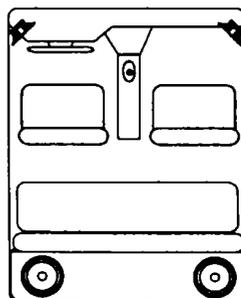


Figure 11.39 : Haut-parleurs de graves installés sous la lunette arrière.

sous la lunette arrière (figure 11.39). S'il existe des enceintes de graves destinées à être installées à l'avant du véhicule, elles ne contribuent nullement à la spatialisation stéréophonique.

Quel système global résulte de l'application de ces critères ? Typiquement, on aboutit à une sonorisation bi-amplifiée, dont la fréquence de coupure des haut-parleurs de graves situés à l'arrière est de 100 Hz, et qui comporte deux petits satellites équipés de haut-parleurs à deux voies passives de 10 ou 12 cm installés sous le tableau de bord. Correctement mise en œuvre, cette configuration ne constitue qu'un choix parmi d'autres pour reproduire une bonne image stéréophonique, mais elle s'adapte bien aux conditions particulières de la sonorisation automobile.

11.6 Chasse aux bruits parasites

Excepté les participants à des concours, qui ne reculent devant aucun effort pour diminuer le niveau de bruit de leurs véhicules, la plupart des gens négligent l'importance de l'élimination des bruits parasites dans l'amélioration de la qualité d'une sonorisation automobile. Le niveau de bruit ambiant des voitures, assez élevé, détériore considérablement la fidélité de la reproduction sonore. Les techniques de lutte contre le bruit les plus raffinées font appel à des dispositifs numériques d'échantillonnage et de traitement du bruit, réinjecté ensuite en opposition de phase dans l'habitacle pour neutraliser le bruit initial [11]. Une méthode plus abordable consiste à utiliser les techniques d'amortissement des vibrations de l'ébénisterie des enceintes acoustiques. Enlever les panneaux de garni-

ture des portes et de l'habitacle pour y appliquer des couches de matériau amortisseur (il s'agit en général de feuilles autocollantes en matériau bitumineu [12]) permet de réduire les vibrations parasites et d'améliorer considérablement l'acoustique. Un sonomètre permet de détecter d'autres sources de bruits gênants, comme par exemple des fuites dans la paroi entre l'habitacle et le moteur, qu'il suffira ensuite d'obturer à l'aide de joint aux silicones. Chaque voiture a ses cliquetis et ses grincements propres ; il faut donc déployer des trésors d'imagination créative qui heureusement se révéleront payants.

Bibliographie

1. **L. Klapproth**, *Acoustic Characteristics of the Vehicle Environment*, 77^e Convention de l'AES, 3/85, pub. préliminaire n° 2185
2. **J. Atkinson**, *As we see it*, *Stereophile*, 3/90,
3. **Clark & Navone**, *Center Stage*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 6-7/93
4. **W. Burton**, *Spatial Effects*, *Car Audio and Electronics*, 2/93
5. **Clark & Navone**, *The Energy Time Curve*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 12/91, 1/92
6. **Clark & Navone**, *An Ideal RTA Response*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 8-9/91
7. **D. Staats**, *Natural Sound*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 1/93
8. **Clark & Navone**, *Speaker Placement and Center Channel*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 9-11/91
9. **Clark & Navone**, *Bass Up Front*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 11/94
10. **W. Burton**, *Lost in Space : How Do We Hear Where Sounds Are Coming From ?*, *Autosound 2000 Tech Briefs*, 8-9/92
11. **R. Bisping**, *Psychoacoustics Shaping of Car Indoor Noises*, 91^e Convention de l'AES, 10/91, pub. préliminaire n° 3210
12. **M. Florian**, *From Sad to Sparkle : A SAAB Story*, *Speaker Builder*, 2/95, p. 10

12 Logiciels pour la conception d'enceintes acoustiques

Il y a quatre ans, à l'époque de la rédaction de la troisième édition de ce livre, les logiciels de conception d'enceintes acoustiques commençaient à se vulgariser. Depuis, de nombreux produits sont apparus sur ce marché hautement spécialisé. Si la liste de ces programmes s'est considérablement allongée, les techniques de modélisation se sont également raffinées. La suite du chapitre constitue une liste de l'offre disponible lors de cette révision de l'ouvrage. Les prix indiqués datent de l'été 1991.

Active Filter Designer **Fernando Garcia Viesca**

Ce programme calcule les valeurs de composants de filtres Butterworth d'ordre 2 et 3 à impédances de source et de charge purement résistives. Il est distribué par *Old Colony Sound* pour le prix de 17,50 \$US.

Box Model **Robert Bullock**

Ce programme qui a fait l'objet d'un article dans *Voice Coil* d'août 1990 permet l'analyse en petits et grands signaux des enceintes closes, à évent ou à radiateur passif dans la gamme des fréquences jusqu'à 400 Hz. L'auteur du programme a rédigé de nombreux articles parus dans le *Journal of the Audio Engineering Society*. Il a également écrit quelques unes des meilleures pages du périodique *Speaker Builder*, dans lesquelles il traite des enceintes ainsi que des filtres. Le programme produit des graphiques qui représentent les courbes d'amplitude et de phase du signal acoustique pour les petits et grands signaux, le module et la phase de l'impédance, l'amplitude de l'excursion du diaphragme, ainsi que la vitesse du déplacement de l'air dans l'évent ou de la membrane du radiateur passif, tout cela bien entendu par rapport à la fréquence.

La dernière mouture de *BoxModel*, le successeur de *BoxResponse* également créé par Robert Bullock, atteint un niveau certain de sophistication. Parmi les programmes basés sur les méthodes de Thiele et Small, il présente des fonctions particulièrement utiles et offre pratiquement ce que l'on peut obtenir de mieux dans cette classe de prix. Le programme est accompagné d'utilitaires de différents auteurs, qui permettent le calcul des valeurs de bobines d'inductances sans noyau, des filtres série réjecteurs de fréquence à bande étroite, des atténuateurs en "L", les dimensions des événements, etc. Ce logiciel est disponible pour le prix de 50 \$US chez *Old Colony Sound*.

CACD (Computer Aided Crossover Design) **Scientific Design Software**

Il s'agit ici d'un logiciel d'optimisation des filtres de voies décrit dans les éditions de mai et juin 1988 de *Voice Coil*. L'impédance des haut-parleurs est modélisée, le filtre est optimisé en fonction de leur situation dans l'espace pour atteindre la fonction de transfert globale qui a été fixée. La version originale parue en 1988 permet l'optimisation des filtres pour les haut-parleurs de grave et d'aigu séparément, mais elle ne traite pas le cas de la sommation des signaux. Une nouvelle version qui pallie ce manque devrait être distribuée sous peu. Pour de plus amples informations, contactez SDS, PO Box 3248, Chatsworth, CA 91313, USA

CALSOD (Computer Aided Loudspeaker System Optimisation and Design) **Witold Waldman**

Ce programme, qui fait l'objet d'un article dans *Voice Coil* de septembre 1988, est également un optimiseur de filtre de voie. Les bases de ce logiciel ont été décrites par l'auteur dans le *Journal of the Audio Engineering Society* de septembre 1988 sous le titre

Simulation and Optimisation of Multiway Loudspeaker Systems Using a Personal Computer. À l'instar de CACD, CALSOD crée un modèle des haut-parleurs et tient compte de leurs coordonnées dans l'espace pour optimiser le filtre et atteindre une fonction de transfert déterminée. CALSOD permet le traitement complet de la conception des filtres de voie et offre de nombreuses possibilités. Son interface utilisateur est principalement graphique, mais de nombreux paramètres sont également introduits sous forme de fichiers texte. Lors de sa parution sur le marché, ce programme coûtait 300 \$US, mais entre-temps, une version allégée est apparue et peut être obtenue pour 65 \$US chez Old Colony Sound. Dick Olsher s'est servi de CALSOD pour mettre au point son projet d'enceinte, le *Black Daliah*, proposé dans l'édition de novembre 1990 de *Stereophile*.

Driver Eval

Crossover Design - G. R. Koonce

Il s'agit ici d'un ensemble de deux programmes. La première disquette comprend un programme d'évaluation qui détermine si un haut-parleur est approprié pour une enceinte close, à événement ou à radiateur passif. La seconde disquette contient un programme de calcul de filtres d'ordre un à trois à charge résistive. Cet ensemble de logiciels est également distribué par *Old Colony Sound* pour le prix de 25 \$US.

Filter Designer 1

SpeakEasy

Encore un optimiseur de filtre de voie dont il a été question dans l'édition de juin 1991 de *Voice Coil*. Il est analogue à *Low Frequency Designer* du même producteur, dont il partage d'ailleurs l'interface de base. Les valeurs d'impédance et de phase sont introduites soit à l'aide de l'éditeur intégré, en donnant les valeurs point par point, soit en important un fichier ASCII préparé de façon analogue ou provenant d'un équipement de mesure Audio Precision. Une résolution de 1/3, 1/6 ou 1/12 octave peut être sélectionnée (respec-

tivement 31, 61 ou 121 points de mesure). La courbe de réponse désirée est définie de manière analogue, ou encore en définissant sa pente et sa fréquence de coupure. Le filtre électrique est construit sur base de la définition des connexions des éléments à ses noeuds et peut comprendre jusqu'à 40 composants actifs ou passifs. Lorsque toutes ces données ont été saisies, *Filter Design* va soit optimiser les valeurs de composants pour atteindre la fonction de transfert désirée, ou bien peut tracer une famille de courbes pour une variation dans une gamme donnée de la valeur de l'un des composants. Le programme fonctionne avec les cartes graphiques EGA et VGA ainsi qu'avec les imprimantes PCL. Il peut être obtenu pour le prix de 195 \$US chez

SpeakEasy, 46 Cook Street, Newton, MA 02158, USA

Loudspeaker

Maximum Effort Software

Ce programme de Max Knitel, principalement destiné à la conception des enceintes acoustiques est disponible depuis plusieurs années et a fait l'objet d'un article paru dans l'édition d'avril 1991 de *Voice Coil*. La version 5, qui est aussi la plus récente, peut calculer et donner une représentation graphique des paramètres d'enceintes closes, à événement, à radiateur passif et passe-bande à volume arrière clos et le cas échéant à charge composite. Ce logiciel peut également calculer les valeurs de composants pour les filtres de voie des types Linkwitz-Riley, Butterworth, Bessel et Chebychev (la charge est supposée résistive), ainsi que les filtres conjugués dont par exemple le «Butterworth acoustique». En plus des graphes, le programme fournit une représentation schématique des filtres. Il permet aussi l'impression sur les imprimantes HP LaserJet, est accompagné d'un manuel de 93 pages et offre de nombreuses possibilités pour son prix de 65 \$US. Il est disponible chez *Maximum Effort Software, 2701 Cedarwood Ave., Dept. LDC4, Bellingham, WA 98225, USA*

LEAP 4.1**LinearX**

Un article publié dans *Voice Coil* en février et en mars 1991 décrit ce logiciel, probablement le plus élaboré de tous ceux disponibles lors de la rédaction de ce chapitre. La version 4.1, qui offre un large éventail de possibilités, permet la conception d'enceintes et de filtres de voie. Qu'il s'agisse d'enceintes closes, à évent, à radiateur passif, du type passe-bande avec volume arrière clos ou pourvu d'un évent, ou encore avec haut-parleurs unique ou multiples, une analyse en grands signaux est effectuée pour tous les niveaux de puissance et pour toute température de la bobine mobile des transducteurs. Le programme se base sur un modèle très sophistiqué qui inclut de nombreuses variables dépendantes de la fréquence, comme par exemple l'inductance et la résistance de la bobine mobile, ordinairement considérées comme constantes dans le modèle de Thiele et Small. Les principes de base appliqués par l'auteur du programme ont été présentés à la 81^e Convention de l'*Audio Engineering Society* (novembre 1989 ; document préliminaire n° 2419).

LEAP effectue une analyse non linéaire du facteur B.l, de l'évent et de l'élasticité de la suspension de la membrane. Les résultats sont fournis sous forme de l'un des 19 types de diagrammes produits par ce logiciel, qui ont d'ailleurs été largement utilisés lors de la rédaction de cet ouvrage. Le programme calcule également les filtres de voie actifs ou passifs, et inclut une procédure d'optimisation. LEAP permet en outre l'importation de fichiers de données provenant d'un certain nombre d'équipements de mesure (Ariel, DRA, TEF et Audio Precision). Ce très puissant logiciel offre des prestations de niveau professionnel avec un minimum de moyens. Il fonctionne avec les cartes graphiques couleur CGA et EGA/VGA, ainsi qu'avec les cartes monochromes. Le programme complet coûte 895 \$US, mais il peut être obtenu en modules séparés, le prix de base étant de 295 \$US. Les imprimantes matricielles ou celles acceptant les commandes *LaserJet* ou

Postscript, ainsi que les tables graphiques compatibles HPGL peuvent être utilisées. LEAP 4.1 peut être obtenu chez *LinearX*, 7556 SW *Bridgeport Rd.*, *Portland*, OR 97224, USA

Low Frequency Designer**SpeakEasy**

Ce programme, qui a fait l'objet d'un article dans *Voice Coil* de décembre 1990, se base sur le modèle de Thiele et Small pour le calcul d'enceintes closes, à évent, à radiateur passif et de type passe-bande à volume arrière pourvu ou non d'un évent. Il permet en outre le calcul des enceintes passe-bande à accord série, dont le brevet est détenu par Acoustic Research. Le logiciel présente certaines caractéristiques uniques, telles que des procédures d'ajustement de courbe dont le but est de varier itérativement les paramètres de l'enceinte pour parvenir à une courbe de réponse déterminée ou pour générer automatiquement des familles de courbes. Les différents modes opératoires rendent LFDES utile non seulement pour la conception d'enceintes, mais encore pour définir les paramètres fondamentaux des haut-parleurs lors de leur mise au point. Le programme permet l'utilisation de cartes graphiques EGA/VGA ainsi que d'imprimantes matricielles ou de type *LaserJet*. Il peut être obtenu au prix de 195 \$US chez

SpeakEasy, 46 *Cook St.*, *Newton*, MA 02158, USA

LMP**Ralph Gonzalez & Sitting Duck Software**

Le *Loudspeaker Modelling Program* décrit dans les colonnes de *Voice Coil* en octobre 1989 est destiné à l'élaboration des filtres de voie. À la différence des programmes d'optimisation (XOPT, CALSOD, CACD, *Filter Designer 1* et LEAP 4.1) qui procèdent par itération pour atteindre une courbe de réponse déterminée (Linkwitz-Riley, Bessel, etc.), LMP combine une approximation de la courbe de réponse du haut-parleur avec des valeurs des éléments du filtre déterminées par l'utilisateur,

et affiche les résultats sous forme de courbes amplitude / fréquence et phase / fréquence. Si ce logiciel ne permet pas le calcul des valeurs des éléments du filtre, il offre cependant la possibilité de manipuler les paramètres afin d'arriver à la réponse souhaitée. La position géométrique des haut-parleurs et les pertes par diffraction sont prises en considération, mais le calcul des filtres se base sur des charges purement résistives, ce qui reste acceptable tant que l'on fait un judicieux usage des réseaux conjugués. Des filtres du premier au quatrième ordre ou à éléments LCR parallèles peuvent être mis en oeuvre. Si un optimiseur est hors de portée financière, ce logiciel constitue une alternative de choix. LMP est utilisable avec des cartes graphiques couleur CGA/EGA/VGA et existe en versions pour les ordinateurs compatibles IBM et Macintosh. Il peut être obtenu au prix de 49,50 \$US, mais une version sans graphisme destinée aux plate-formes IBM, Commodore, Apple II et Macintosh vendue pour 17,5 \$US existe également. Il est distribué par *Old Colony Sound*.

MacSpeakerz

True Image

MacSpeakerz est l'un des rares logiciels de conception d'enceintes acoustiques pour Macintosh. Il est basé sur le modèle de Thiele et Small et fournit des diagrammes d'amplitude du niveau acoustique, de l'excursion de la membrane, d'impédance, de délai de groupe et de la réponse en phase pour des combinaisons d'enceintes et de haut-parleurs. *MacSpeakerz* permet aussi le calcul des dimensions des événements, de filtres de voie à charge résistive et des dimensions de l'enceinte pour des sections parallélépipédiques ou trapézoïdales. Ce programme est disponible au prix de 249 \$US chez *True Image*, 349 W. Felicia Ave., Suite 122, Escondido, CA 92025, USA

ModelONE

TDR

C'est l'un des peux nombreux programmes destinés au calcul des installations électro-acoustiques pour les automobiles. Outre les habituels calculs basés sur la théorie de Thiele et Small, ce logiciel permet d'ajouter l'effet des caractéristiques acoustiques propres de 155 véhicules aux résultats des simulations. Comme cela a été noté dans l'article paru dans *Voice Coil* d'avril 1990, la variété des véhicules est impressionnante : cela va de la *Chevy* des années 50 à la *Mazda 300 ZX*, des *Volkswagen* aux *Cadillac*, *Mercedes* et autres *Rolls-Royce*, et cette impressionnante liste ne cesse de s'allonger. Bien que la position exacte des haut-parleurs dans l'habitacle de la voiture définira le son finalement obtenu, ce programme permet de se faire une idée de ce que l'on peut attendre. Il fournit la courbe amplitude-fréquence, la courbe d'amplitude d'excursion du diaphragme et de la pression interne dans l'enceinte. On peut se le procurer au prix de 288 \$US chez *TDR*, 6970 FM 1960 West, Suite B, Houston, TX 77069, USA

PXO

Bob Bullock

Ce programme permet exclusivement le calcul de filtres de voie passifs à charge résistive. Il est approprié au calcul de systèmes à deux ou trois voies du premier au quatrième ordre selon les alignements passe-tout, Butterworth, ou compromis.

Le programme est disponible pour 50 \$US chez *Old Colony Sound*.

Speak

DLC Design

Ce programme complet d'analyse des systèmes à plusieurs voies a été décrit dans les éditions de juillet et août 1990 de *Voice Coil*. Il permet le calcul d'enceintes closes, à évent, à radiateur passif et de type passe-bande à volume arrière clos ou muni d'un évent. L'analyse est effectuée pour différents niveaux de puissance et pour diverses tempé-

ratures de la bobine mobile (bien que cette propriété ne fasse pas partie du calcul de base). Si le programme se prête à l'analyse non linéaire lorsque les valeurs adéquates de différentes variables sont introduites, une véritable modélisation non linéaire n'est cependant pas possible, mais devrait apparaître dans les versions ultérieures du logiciel.

Les résultats graphiques comprennent la réponse en fréquence, la courbe d'impédance, et le courant en fonction de la fréquence (image de l'admittance). *Speak* fournit aussi des outils d'analyse des filtres de voie actifs ou passifs, tient compte de la position des transducteurs, mais n'effectue aucune optimisation. Les filtres passifs sont limités au quatrième ordre. La possibilité d'effectuer un calcul de la réponse impulsionnelle ou avec une distorsion simulée doivent être signalés parmi les caractéristiques intéressantes de ce logiciel. À l'instar de LFDS, *Speak* offre la possibilité de produire des familles de courbes. Il nécessite un coprocesseur mathématique et fonctionne avec les cartes graphiques EGA ainsi qu'avec les imprimantes matricielles ou de type LaserJet. *Speak* est disponible au prix de 395 \$US chez *DLC Design, 24166 Haggerty Rd., Farmington Hills, MI 48335, USA*

Speaker Designer

Stuart E. Bonney

Ce logiciel effectue le calcul d'enceintes closes ou à évent dans une gamme de fréquences comprise entre 10 et 300 Hz. Les résultats produits sont la courbe de réponse et la puissance maximum limitée par l'excursion de la membrane. Il est distribué par *Old Colony Sound* au prix de 19,50 \$US.

Two-Way Active Crossover Design

Gary Galo

Ce programme effectue le calcul de l'une des huit configurations d'enceintes à deux voies proposées par Robert Bullock dans l'édition 3/85 de *Speaker Builder*. Il est également distribué par *Old Colony Sound* pour le prix de 20 \$US.

XOPT

Peter Schuck

XOPT, l'un des premiers optimiseurs de filtre de voie disponible sur le marché, a été décrit dans les colonnes de *Voice Coil* en mars 1989. Il se base sur l'article publié dans le *Journal of the Audio Engineering Society* de mars 1985 sous le titre *Design of Optimized Crossover Networks Using a Personal Computer*. À la différence de CALSOD ou de CACD, XOPT ne nécessite pas un modèle des transducteurs, mais procède à une optimisation directe des paramètres de sortie. Le système peut comprendre jusqu'à cinq haut-parleurs et 33 composants par section. La courbe de réponse peut soit être sélectionnée parmi les classiques telles que Butterworth, Linkwitz-Riley, etc. ou encore introduite sous forme d'un polynôme. Le programme optimise la réponse dans l'axe du système ou pour un décalage de 15° dans le plan horizontal ou vertical.

XOPT peut optimiser séparément la réponse des registres aigu, médium et grave et les combiner en égalisant leur niveau. Le logiciel fonctionne avec les cartes graphiques CGA/EGA/VGA, avec ou sans coprocesseur mathématique, et imprime les résultats par le biais d'une copie d'écran DOS sur une imprimante matricielle. Pour obtenir une reproduction des écrans graphiques sur papier, un utilitaire approprié, comme par exemple hijack de Inset Systems, est nécessaire. XOPT est disponible pour le prix de 199 \$US chez *Peter L. Schuck Consultin, 1705 Rodin Way, Orleans, Ontario, Canada K1C 4Y9*

Pour clore ce chapitre, l'observation suivante s'impose : même si vous pouvez exploiter toute l'information contenue dans cet ouvrage et mettre en oeuvre les très puissants logiciels qui ont été décrits, cela ne suffira pas forcément pour parvenir à élaborer à coup sûr des enceintes acoustiques de qualité supérieure. Le respect des règles de l'art dans la construction d'un système correctement amorti est primordial, comme l'est la mise au point d'un filtre de voies adapté, mais il n'en

reste pas moins que le rendu sonore de l'ensemble dépendra également étroitement du choix des matériaux des transducteurs, des colles qui les assemblent et de la géométrie de leur aimant. Autant de paramètres dont la maîtrise échappe totalement à la plupart des concepteurs amateurs, la sélection méticuleuse des composants d'un système en fonction de leurs caractéristiques électriques revêt donc elle aussi une importance primordiale.

Pour construire des enceintes de qualité exceptionnelle, une étude soignée des transducteurs qui seront mis en oeuvre et la correction de leurs résonances parasites joueront un rôle de tout premier plan. L'art de la construction d'un système consiste en la combinaison adroite d'éléments pour parvenir à un timbre que l'oreille des auditeurs trouvera *musical*.

La cinquième plage du disque test publié par *Stereophile* (9,95 \$US plus les frais de port) illustre les difficultés auxquelles la conception d'enceintes en fonction de leur timbre vous exposera. Cette courte démonstration consiste en différents enregistrements de la voix de J. Gordon Holt (fondateur du périodique), effectués à l'aide de différents microphones de prise de son, caractérisés chacun par ses propriétés physiques, mécaniques et électriques. Ils ont tous des *sonorités* différentes, et chacun marque de son empreinte le contenu spectral d'une même source. Comment dès lors apprécier avec rigueur et objectivité le timbre des enceintes acoustiques ?

L'industrie électroacoustique est loin d'être capable de reproduire un signal sonore avec la précision rigoureuse d'une expérience en laboratoire. Répliquer un événement réel restera probablement longtemps encore un objectif utopique. Les moyens de reproduction, quels qu'ils soient, donnent au mieux une bonne illusion de l'événement original. Nous considérerons donc que l'idéal à attein-

dre, c'est de créer la meilleure illusion possible. L'audition de musique à l'aide d'enceintes que vous aurez conçues et construites vous même, est un but passionnant et gratifiant.

13 Appendice

CAO et enceintes acoustiques

par Götz Schwamkrug et Larry Kocek

Chez les professionnels, l'utilisation de l'ordinateur pour simuler et calculer les caractéristiques et les performances de haut-parleurs ne date pas d'hier. Beaucoup de travaux et de publications sur le sujet sont fondés sur des simulations par ordinateur. Il n'est pas exagéré de supposer que sans cet outil, la plupart de ces recherches n'auraient même pas vu le jour et n'auraient probablement pas abouti. Bien des connaissances aujourd'hui établies sont le fruit du traitement informatique d'énormes quantités de données et de relevés de mesure faits sur des prototypes de haut-parleurs et d'enceintes. Ce savoir a contribué non seulement à relever peu à peu les critères de qualité, mais il a aussi enrichi et affiné les modèles mathématiques de simulation. Quand par exemple certains défauts de linéarité apparaissent dans les caractéristiques d'un système en raison de phénomènes physiques incontournables, le concepteur-fabricant pourra au moins, grâce aux simulations, les compenser du mieux possible en prenant les mesures appropriées pour obtenir une « phase minimale ».

C'est ainsi qu'un bon programme de CAO (conception assistée par ordinateur) permet d'éliminer les défauts de phase tout en optimisant la linéarisation de la courbe de réponse du filtre. Ceci contribue non seulement à faciliter la réalisation finale du filtre mais aussi à l'amélioration de l'image sonore.

Sans aller jusqu'à affirmer que l'ordinateur est garant de la perfection des enceintes dont il aura facilité la conception, on peut le considérer comme indispensable. C'est du moins ce que pensent les professionnels qui amortissent leur coûts de recherche et de développement sur des séries entières d'enceintes.

Pour l'amateur motivé, les choses se présentent un peu autrement. Chez lui le temps n'est pas la denrée la plus rare, ce sont plutôt les fonds qui sont souvent plus limités. Quant à amortir les investissements que représentent les appareils de mesure et les programmes (sans parler de l'ordinateur lui-même) sur une demi-douzaine de paires d'enceintes (au mieux), c'est un mauvais calcul. Ne vaudrait-il pas mieux garder cet argent pour le consacrer à des haut-parleurs plus chers ou à une ébénisterie plus soignée ?

La situation serait sans issue s'il n'y avait pas des audiophiles microphiles (et inversement), c'est-à-dire des gens compétents aussi bien dans le domaine des haut-parleurs et des enceintes acoustiques que dans celui de l'informatique, préoccupés de forger des passerelles, à péage certes, mais d'un prix abordable, entre l'audio et la micro. Non seulement ces gens-là existent, mais en plus certains d'entre eux sont si futés que le résultat de leurs travaux n'a rien (ou si peu) à envier à ceux de leurs homologues professionnels.

Du fait que ces programmes ont été conçus pour des amateurs, ils s'appliquent à rester faciles d'accès. Ils cherchent à être agréables et efficaces, pour la saisie des données autant que pour leur affichage graphique après traitement et analyse. Lorsque la première édition du présent ouvrage est apparue aux Etats-Unis, les programmes de CAO pour le grand-public en étaient à leur balbutiements. Désormais, c'est devenu une catégorie de programmes bien fournie. Il importe d'attirer l'attention du lecteur intéressé sur quelques aspects de l'utilisation de ces outils.

Chaque calcul et chaque optimisation fait appel à des modèles mathématiques des haut-parleurs et des filtres et ne pourra par

conséquent jamais être plus précis que ne le sont les données du haut-parleur ou du filtre telles qu'on les aura fournies au programme. Exactitude et précision sont donc de rigueur. Tous les fabricants ne sont pas des arnaqueurs, mais il faut bien constater qu'il y en a qui ne s'embarrassent pas de scrupules. Vérifier toujours les valeurs de la courbe d'impédance !

Selon les caractéristiques du baffle sur lequel est monté le haut-parleur dont vous vérifiez la courbe de réponse en fréquence, vous n'obtiendrez pas forcément la même chose que ce qu'indique le fabricant dans sa notice. Gare aux conflits avec le filtre séparateur de fréquences ! Il serait profitable, dès lors, de pouvoir récupérer et de traiter les données fournies par un analyseur moderne à transformée de Fourier, comme le permettent les logiciels professionnels. L'amateur, pour l'instant, doit se contenter d'en rêver...

Pour le travail à domicile, un microphone de mesure sans prétention fera l'affaire, associé à un multimètre BF et un générateur de fonctions avec fréquencemètre. Les défauts de fabrication typiques des appareils de mesure onéreux, notamment des microphones, aux deux extrémités de la bande passante, ne pèsent que rarement sur la conception et la réalisation des filtres, car les fréquences de recoupement entre les registres se situent par définition plus près du milieu de la bande passante du microphone que de ses limites. De plus, il est aisé de simuler avec beaucoup de précision la réponse dans le registre grave à partir de la courbe d'impédance.

Deux types de problèmes résultent de la dissociation des calculs de l'enceinte de ceux du filtre.

1. Avec des filtres passifs, on constate souvent une interaction indésirable entre les haut-parleurs montés sur l'enceinte et les filtres, à tel point que la courbe de réponse en

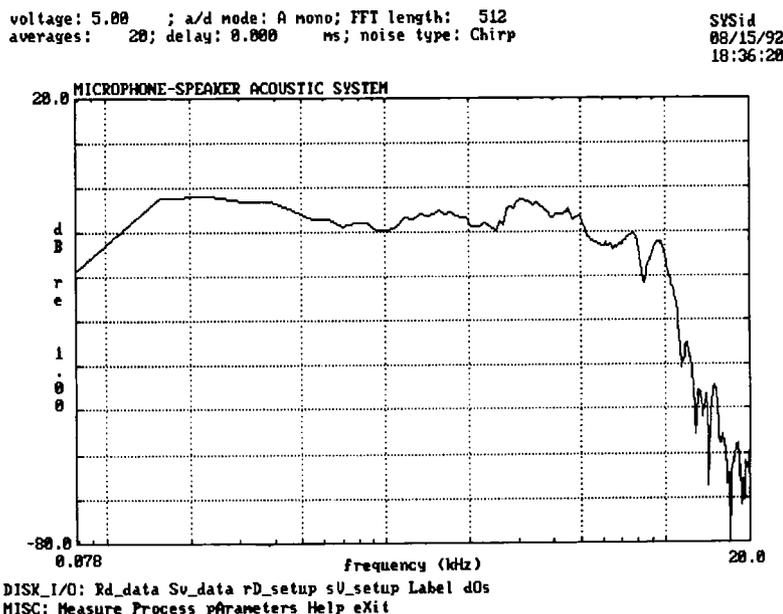


Figure 13.1a : Les procédés de mesure modernes permettent de tracer rapidement les courbes de réponse des haut-parleurs et des enceintes. Par après, le traitement et l'analyse des données peuvent prendre nettement plus de temps, en l'absence de fonction de transfert automatique des données vers le programme d'optimisation.

Dans le numéro 203 de la revue ELEKTOR, parue en mai 1995, est paru un article intéressant sur les *Systèmes de mesure audio pilotés par PC*.

Ce numéro est disponible auprès de l'éditeur, Publitronec, 22-23 rue des Ardennes, 75019 PARIS.

En France, la société Euphonie Audio-technique assure l'importation et la distribution de bon nombre de produits qui intéresseront les lecteurs de cet ouvrage.

Euphonie Audiotechnique

tél. : 56.78.91.30

fax. : 56.78.95.36

fréquence s'en trouve perturbée fortement et de façon inattendue. C'est précisément sur les systèmes acoustiques complexes et les filtres d'ordre élevé qu'il faut discerner ces problèmes surprenants.

Si un filtre passif est mis en oeuvre sans l'aide d'un programme d'optimisation, il y a tout lieu de s'attacher à linéariser l'impédance du haut-parleur.

2. La disposition des haut-parleurs n'est pas sans influencer sur la sommation des signaux des différents registres. Tous les circuits de filtrage classiques sont conçus pour une disposition de tous les haut-parleurs sur un même plan vertical. Or seules quelques-unes des combinaisons de haut-parleurs permettent d'obtenir cette disposition coplanaire. Dans tous les autres cas, il faut décaler les plans du baffle en fonction de la combinaison retenue. Cette complication est amplement justifiée car l'adaptation du filtre pour compenser le décalage des haut-parleurs serait, en l'absence de programme

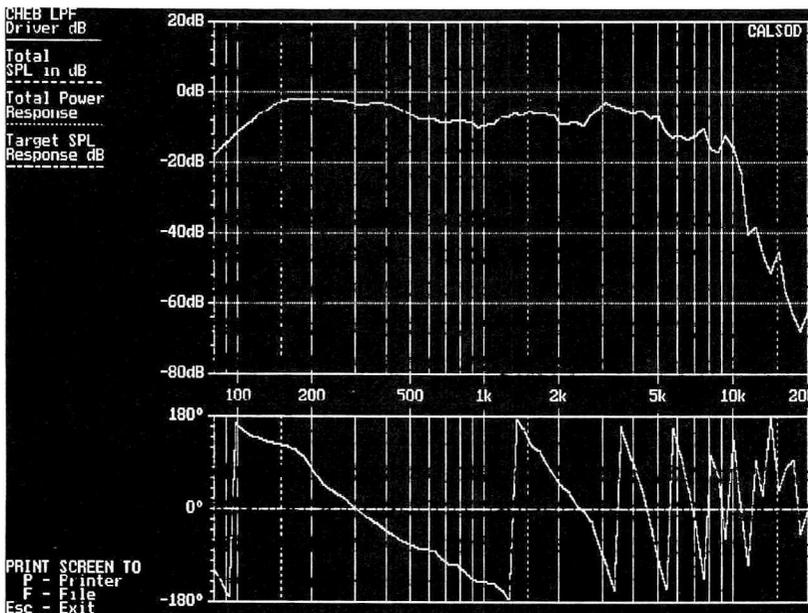


Figure 13.1b : Voici le résultat du transfert automatique des relevés de mesure de l'analyseur FFT ARIEL Sysid au programme d'optimisation CALSOD.

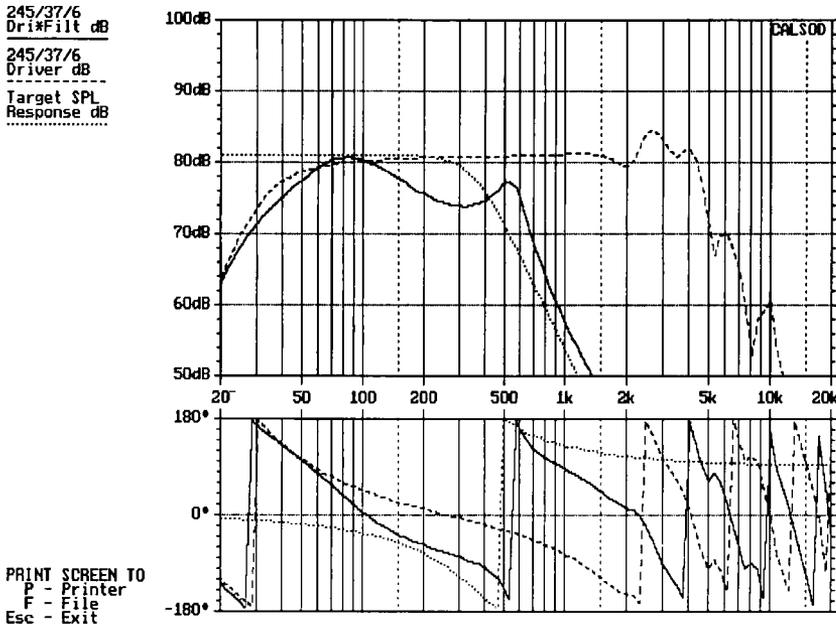


Figure 13.2 : Les résultats de l'interaction entre les haut-parleurs et les composants des filtres passifs conventionnels sont souvent frustrants. Ici le filtre Butterworth du troisième ordre influe également sur la reproduction des graves, de telle sorte qu'il a fallu procéder à un nouvel alignement de l'enceinte. Sans l'aide d'un programme d'optimisation, le chemin vers la solution de tels problèmes risque d'être long et tortueux.

d'optimisation, irréaliste, aussi bien parce qu'elle prendrait trop de temps que par ce qu'elle coûterait trop cher en composants de filtrage.

Ceci est vrai, que le filtre soit actif ou passif.

Lorsque l'écart entre haut-parleurs est grand, il conviendrait d'optimiser le système à l'aide du programme de CAO non pas pour une distance peu vraisemblable, à par exemple un mètre de l'enceinte, mais pour une position d'écoute réaliste.

Les différences ne sont pas toujours grandes, mais avec des filtres critiques, et une phase de 90° entre passe-haut et passe-bas ainsi que des fréquences de transition élevées, elles sont loin d'être négligeables.

Il est très important de faire appel à des haut-parleurs dont la plage de reproduction

linéaire est suffisamment large (voir ce qui a été dit à ce sujet dans les autres chapitres de ce livre). Les programmes les moins élaborés ne peuvent donner de bons résultats qu'avec de tels haut-parleurs. Si le filtre doit compenser l'atténuation ou le gain caractéristique d'un haut-parleur, il importe de pouvoir procéder à des simulations du couple châssis / filtre, à défaut de quoi il faudra se résoudre à bien des tâtonnements. Les gros problèmes se posent avec les haut-parleurs dont le fonctionnement n'est pas idéal. Les défauts de la membrane (*break up*) ont des effets complexes sur le fonctionnement du filtre et donnent du fil à retordre même aux programmes d'optimisation. La fréquence de transition devra se situer le plus loin possible de telles zones de turbulences.

L'influence de résistances externes (R_z) qu'introduisent les bobines des filtres, les fil

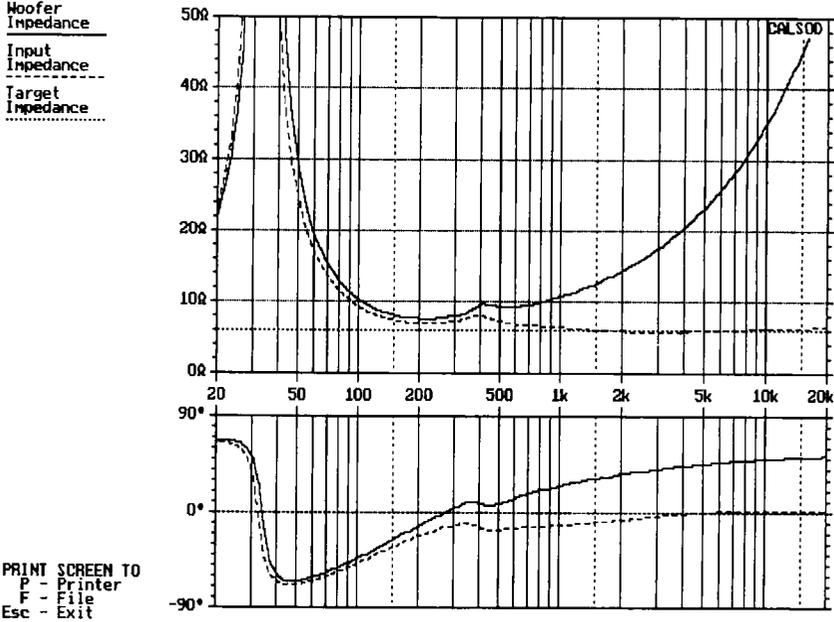


Figure 13.3a : Nombre de filtres passifs sont faits pour une charge ohmique réelle (par exemple 8 Ω). C'est pourquoi une linéarisation de l'impédance du haut-parleur s'impose. Les procédés de calcul courants ne fournissent que de piètres résultats.

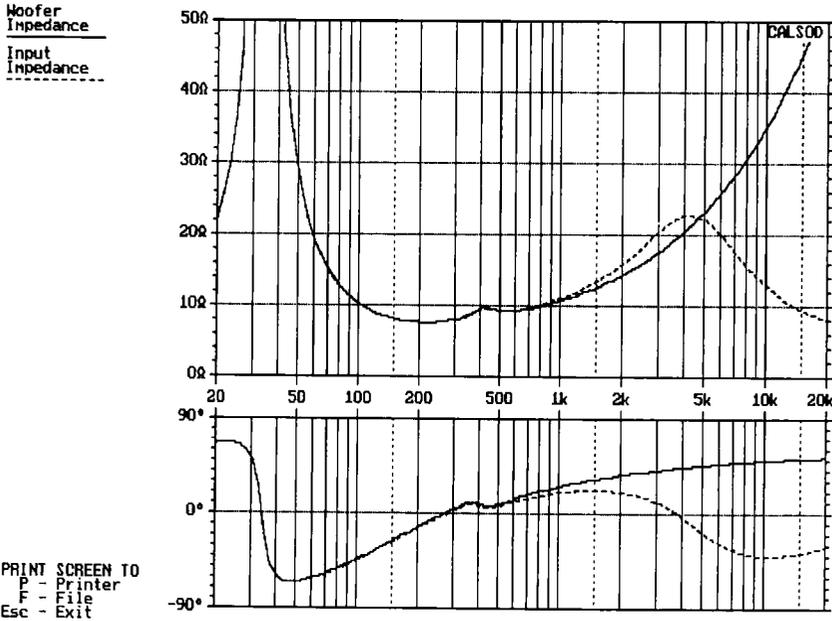


Figure 13.3b : Ici aussi la méthode d'optimisation assistée par ordinateur est un peu plus rapide que la méthode empirique des tâtonnements avec générateur de signal, appareils de mesure, et composants de valeurs différentes.

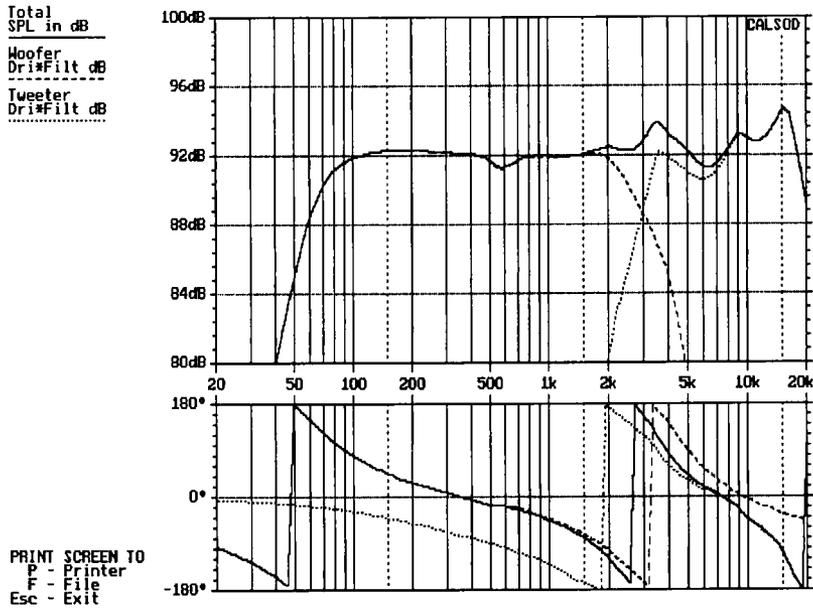


Figure 13.4a : Le retard acoustique introduit par le décalage du centre acoustique des haut-parleurs a des effets tels que la réalisation de filtres passifs ou actifs devient un vrai casse-tête, ou du moins un jeu de patience. Souvent même les filtres Linkwitz-Riley (haut-parleurs en phase) ne donnent pas satisfaction, et pour les solutions spéciales, nul recours à des tables de calculs n'est possible.

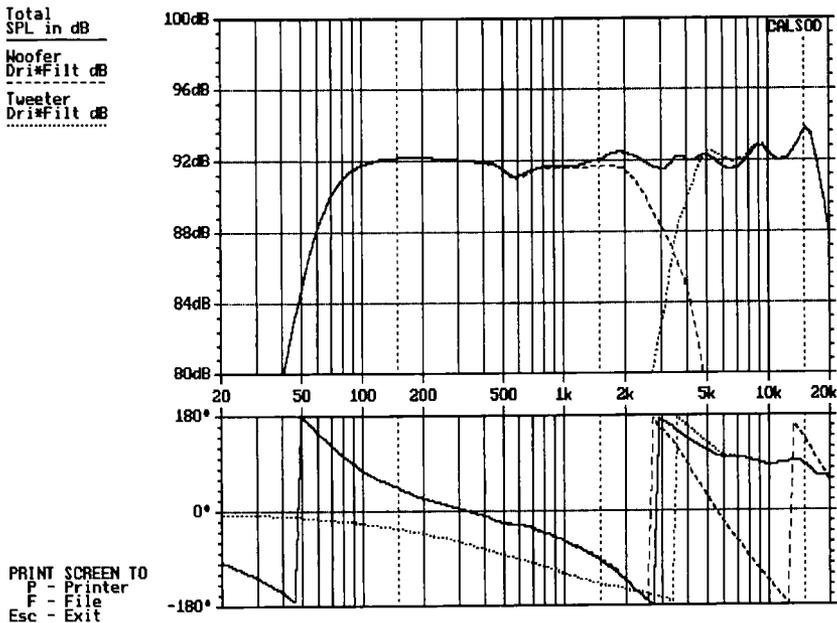


Figure 13.4b : C'est ici que les programmes d'optimisation des filtres font la preuve de leur efficacité ; si l'ordinateur est à la hauteur, le programme est capable de faire en quelques minutes le travail de journées (voire de semaines) de tâtonnements empiriques.

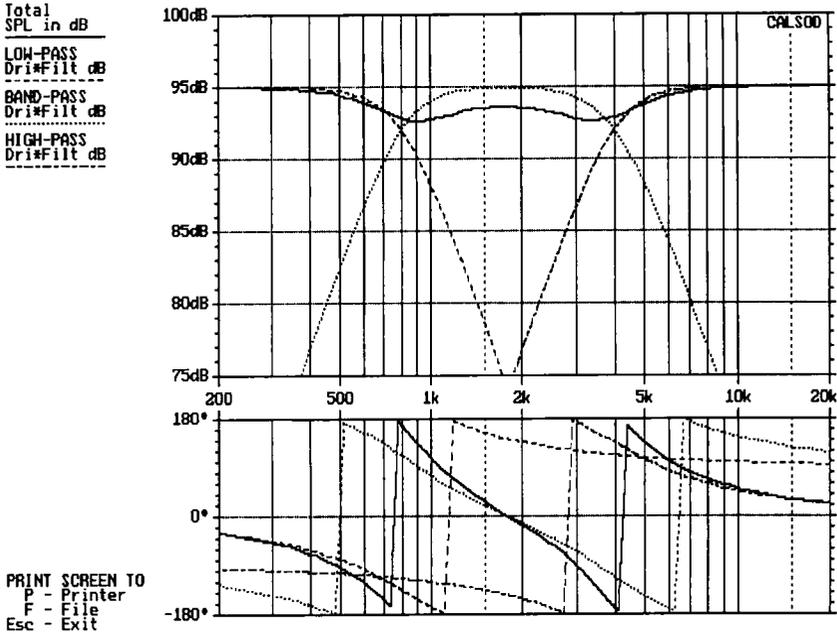


Figure 13.5 : Dans les systèmes à voies multiples, même les filtres de facture conventionnelle ne sont pas capables d'opérer une sommation satisfaisante des signaux. Rajoutez-y les haut-parleurs et le calcul sera encore plus compliqué !

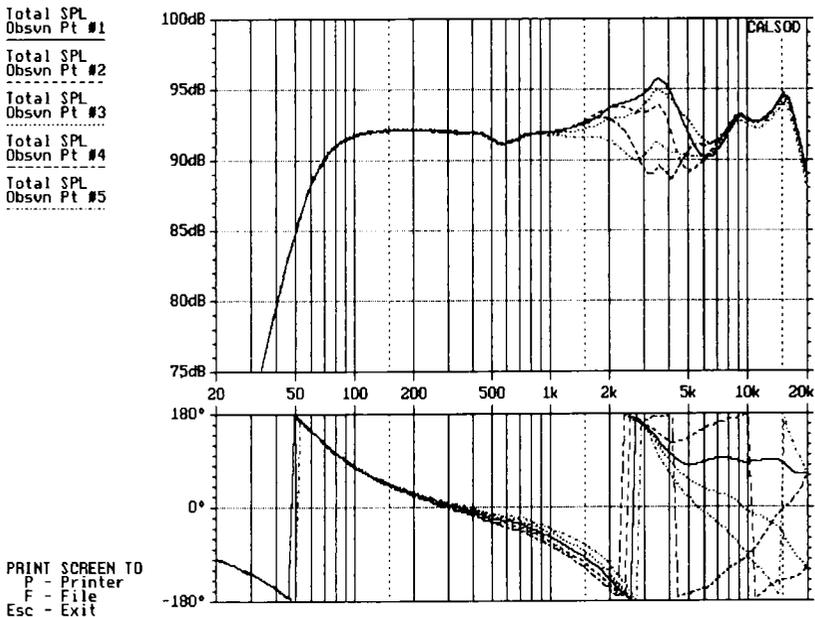


Figure 13.6 : Ce n'est pas seulement dans l'axe de symétrie que les constructions réussies doivent faire leurs preuves, mais aussi dans les régions situées de part et autre, sans défaut majeur des caractéristiques de reproduction. Les bons programmes de CAO renseignent sur les caractéristiques de rayonnement d'un système dès les premières phases de son élaboration.

de liaison, ou encore les connexions entre l'amplificateur et l'enceinte, est bien mise en évidence par les programmes de CAO. Ce qui pose un problème élémentaire à toute enceinte : le choix de la fréquence de transition et l'atténuation souhaitée du filtre passe-bas sont en corrélation, par l'intermédiaire de la résistance en continu des bobines, avec les dimensions requises pour l'enceinte, lesquelles sont à leur tour en corrélation, par l'intermédiaire de la taille du baffle (façade de l'enceinte), avec la réponse des haut-parleurs et par conséquent avec la fréquence de transition la mieux appropriée.

Les programmes de CAO donnent une vue d'ensemble de la situation, à ceci près que les programmes les plus modestes ne peuvent jamais simuler le filtre et l'enceinte que séparément, sauf le relativement bon marché programme CALSOD, qui dans sa version 1.4 permet non seulement de constater ces interactions, mais encore d'optimiser les filtres,

même dans des configurations très complexes, à plusieurs voies, et quelle que soit la disposition des haut-parleurs, et surtout permet d'optimiser ensemble tous les haut-parleurs. De telle sorte que les influences du décalage entre haut-parleurs pourront être compensées par des valeurs des composants de filtrage optimisées. Les creux et les bosses de la courbe de réponse en puissance et ceux de la courbe d'impédance des haut-parleurs peuvent être pris en compte également, de sorte que bien souvent l'égalisation devient superflue.

Les calculs et la représentation graphique effectués par le programme peuvent l'être en fonction de points d'écoute et d'éloignements différents. Ceci est de la plus grande importance lors de l'optimisation de haut-parleurs à haut-parleurs décalés, car le décalage, même sur des systèmes coaxiaux, devrait toujours être considéré en fonction de la distance réelle du point d'écoute.

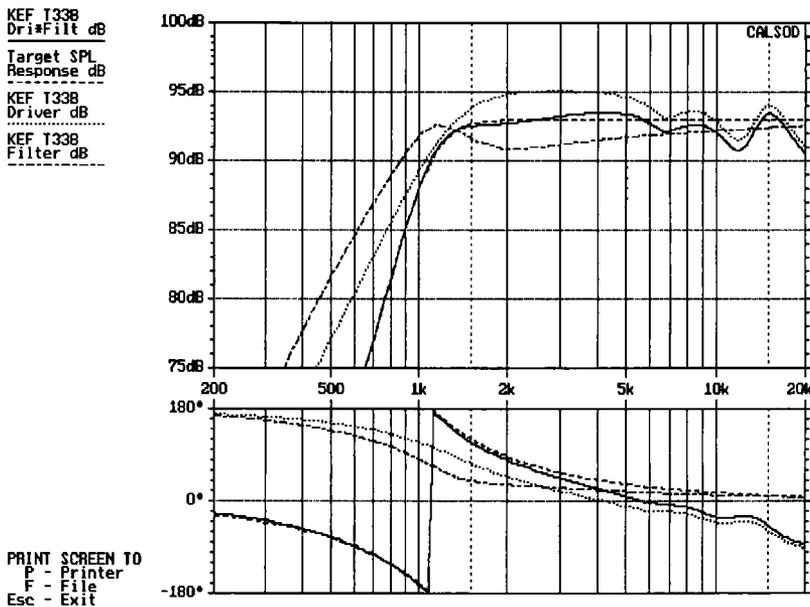


Figure 13.7 : Quelques composants suffisent pour obtenir des filtres à pente raide si l'on prend soin d'associer la caractéristique passe-haut des haut-parleurs à la fonction passe-haut du filtre. L'élaboration à partir de tables de calcul est possible, mais fortement limitée par les différences entre les paramètres mécaniques de hauts-parleurs. Là encore l'aide de l'ordinateur est précieuse.

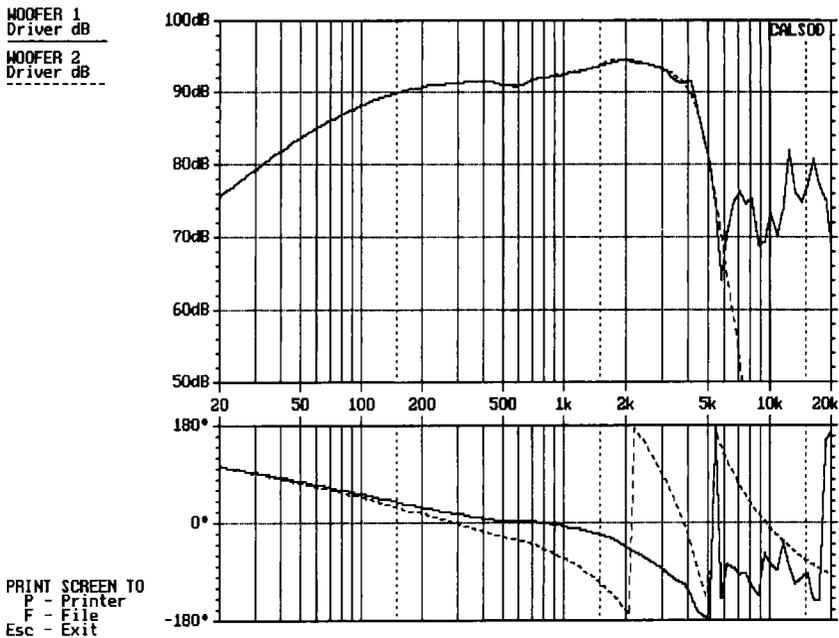


Figure 13.8 : Bien des programmes de CAO passent sous silence le défaut de linéarité des haut-parleurs à membrane en présence de fréquences élevées. Ces discontinuités et irrégularités des modes de résonance des membranes sont à l'origine de vibrations partielles (connues sous le nom de cone break up) qui elles-mêmes provoquent des problèmes dans l'élaboration du filtre, car elles influencent la phase de fréquences qui elles se situent dans le domaine nominal du haut-parleur. Quand le programme de CAO se contente de courbes approximatives pour la réponse des haut-parleurs, il convient de tenir compte de cet aspect.

Le programme ne fournit pas d'aide directe pour l'optimisation de caissons de graves, mais donne la représentation graphique des courbes de réponse pour des enceintes à évent et des enceintes closes.

Pour conclure, voici encore quelques exemples pour illustrer la puissance des programmes mentionnés ci-dessous. Les programmes de calcul des différentes variantes d'enceintes pour des haut-parleurs donnés et des applications particulières se distinguent par l'efficacité de l'aide et le gain de temps qu'ils représentent. A quoi s'ajoute la sécurité que représentent les innombrables calculs déjà faits avec succès par d'autres utilisateurs de ces programmes. La mise en oeuvre d'équations et de formules de calcul relevées dans la littérature spécialisée est loin de donner autant de satisfaction, notamment

à l'amateur auquel le petit nombre de ses réalisations ne permet pas d'acquérir rapidement une expérience et une routine suffisantes.

La liste ci-après complète celle du chapitre 12 de Vance Dickason, et donne surtout les programmes les moins chers actuellement disponibles. Les programmes professionnels LEAP4.5 et CALSOD3.1 font office ici de références pour les programmes plus modestes. Le prix de ces logiciels nous paraît rédhibitoire, même pour des amateurs chevronnés.

Le lien qui subsiste dans ce domaine entre prix et performances ne fait aucun doute, contrairement à ce qui est le cas dans d'autres domaines. Les caractéristiques les plus intéressantes d'un logiciel pour l'amateur ne sont heureusement pas forcément celles qui

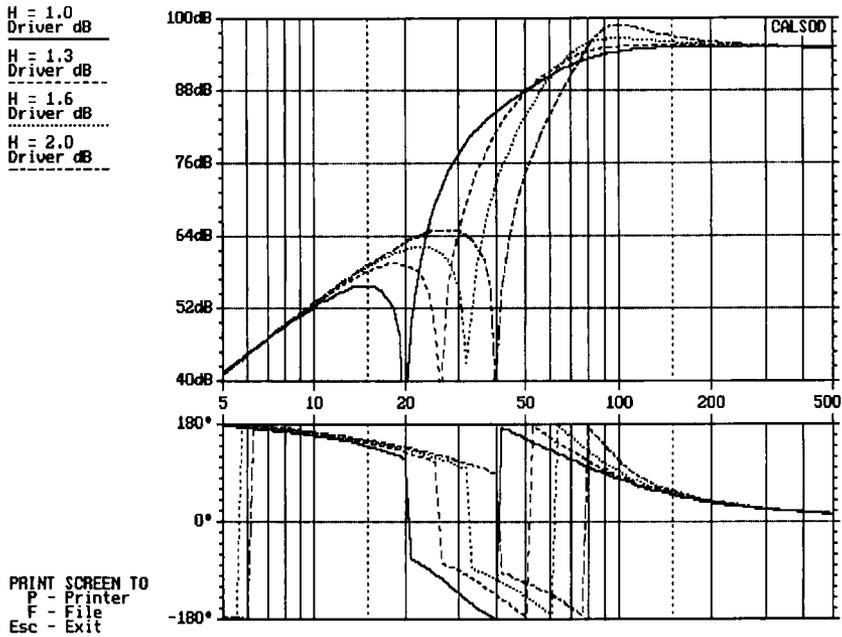


Figure 13.9a : L'aide apportée au concepteur par les programmes de CAO lors de l'affichage des courbes de réponse du système châssis/enceinte, lesquelles font appel à davantage de mathématiques, est précieuse. Il s'agit ici des courbes de réponse de caissons de graves à radiateur passif.

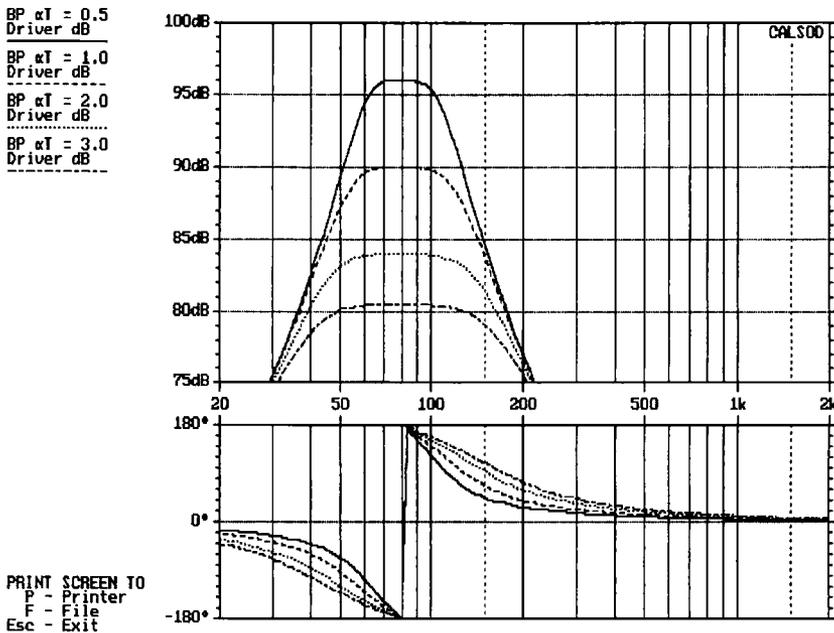


Figure 13.9b : Voici les courbes de réponse de diverses enceintes passe-bande. Cette variante d'enceinte demande de nombreux calculs que l'on a tout intérêt à confier à un programme de CAO.

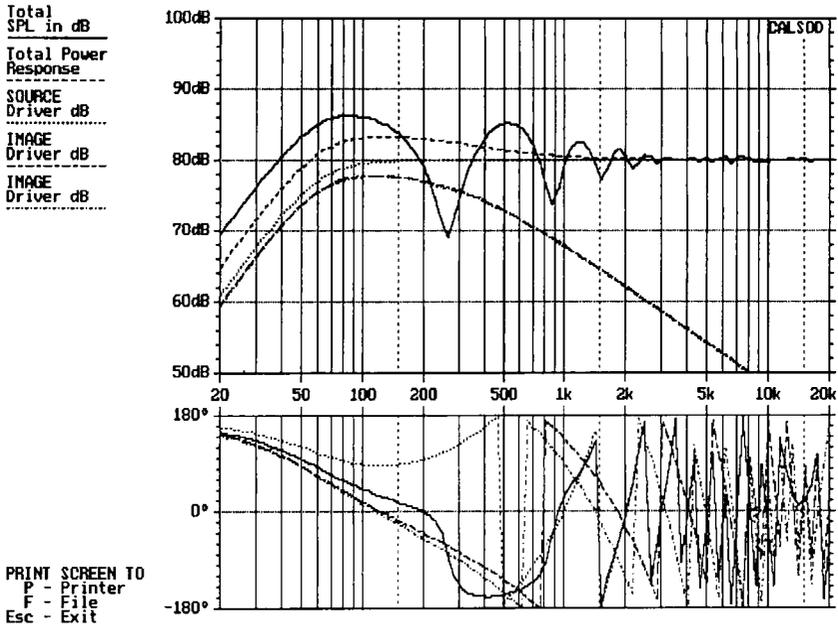


Figure 13.10 : Il n'est pas inutile de s'interroger sur les conséquences que les réflexions du lieu d'écoute auront sur la courbe de réponse.

justifie son prix élevé. Ainsi, autant il est primordial de réduire le nombre de composants du filtre au strict minimum dans une production en série pour en limiter les coûts, autant ce détail est sans intérêt pour l'amateur qui ne confectionne qu'une paire d'enceintes. L'abondance de possibilités, caractéristique des programmes professionnels, en fait des « usines à gaz » plutôt désagréables à utiliser pour qui n'a pas l'usage de tant de fonctions.

Voici, par ordre alphabétique, quelques programmes de CAO du domaine de l'acoustique.

Pour les programmes déjà mentionnés par V. Dickason, nous avons rajouté quelques copies d'écran représentatives.

Comme une grande partie de ces programmes est d'origine américaine ou anglo-saxonne, une connaissance des termes anglais est requise. Les programmes à interface graphique permettent une approche intuitive qui facilite pas mal les choses. Il y a aussi quelques programmes d'origine allemande, comme *Speaker* ou *Lasip*, ou encore *AkAbak* ; tout n'y est pas en anglais... notamment le mode d'emploi du dernier programme cité, qui compte 400 pages, et dont l'auteur Jörg Panzer a publié en français un ouvrage intitulé "Calcul des enceintes acoustiques" désormais épuisé.

A-Filter**Sitting Duck Software**

Conçu pour le calcul des différents filtres actifs à amplificateur opérationnel du célèbre *Active Filter Cookbook* de Don Lancaster, ce programme construit des filtres jusqu'au huitième ordre. Pour amateurs chevronnés et techniciens. Outre les filtres d'ordre 5 à 8, les filtres passe-bande à plusieurs étages, les filtres coupe-bande, ce programme compte un grand nombre de fonctions auxiliaires.

Prix : environ 35 \$

AkAbak 1**Jörg Panzer**

Le *nec plus ultra* des programmes allemands en matière de HP et d'enceintes électro-acoustiques. Dans sa version actuelle, AkAbak parle anglais. Les fonctions du programme sont si nombreuses qu'elles ne sauraient être présentées ici que superficiellement, car la structure modulaire à base d'éléments acoustiques et électriques autorise la simulation à la fois précise et flexible de toutes les combinaisons de haut-parleurs, d'enceintes et de filtres imaginables.

AkAbak simule un système électro-acoustique complet, depuis la source de tension jusqu'au point d'écoute en passant par tous les filtres, les réseaux et les éléments rayonnants possibles. Aucune limite vraiment restrictive n'est imposée en matière de filtres (jusqu'au trentième ordre (*sic*), jusqu'à soixante éléments par réseau de filtrage, jusqu'à 500 éléments électriques et acoustiques). Le programme permet de simuler des boucles de régulation et de réaction (*feedback*), avec éventuellement des transistors, des amplificateurs opérationnels et des gyrateurs. AkAbak s'accommode aussi bien de haut-parleurs dotés de deux bobines que de transducteurs piézo-électriques. Du côté de l'acoustique, il connaît, outre les modèles

courants, les enceintes les moins banales qui soient. AkAbak tient compte de certains phénomènes qui ne sont pas pris en considération dans le modèle de Thiele et Small. Son auteur, J. Panzer, est d'ailleurs le découvreur d'une famille d'alignements pour enceintes à évent avec filtre passe-haut d'ordre 2, qu'il a présentée en 1994 dans le numéro 5 du volume 42 du JAES, dans un article intitulé *Derivation of the Quasi-Butterworth 5 Alignments*, cosigné par J. Kreutz, l'un des traducteurs du présent ouvrage. Cette famille d'alignements se caractérise par une excellente réponse en basse fréquence, qui s'apparente aux familles Butterworth, mais permet une tenue en puissance plus élevée et conserve un bon comportement dans les transitoires.

La simulation opère à partir d'un script, à la manière de programmes comme SPICE. À l'heure des menus déroulants et des icônes, ce procédé peut paraître spartiate, mais cette impression cède rapidement devant la complexité des tâches qu'il permet de résoudre. À l'instar du programme australien CALSOD, dans le programme de Jörg Panzer, la combinaison du choix entre des modules standard associé et de la saisie de scripts ouvre des horizons sans limite, en tous cas autrement plus vastes que ceux de la plupart des programmes concurrents. Les sources d'erreur ne sont pas négligeables dans un tel contexte, de sorte que l'on ne peut que recommander la plus grande circonspection aux débutants, voire leur déconseiller de démarrer avec un programme aussi ambitieux. Il existe, pour le marché allemand, une version simplifiée : *AkAbak Light*. Une version anglaise (et qui sait, un jour française) devrait voir le jour bientôt.

La version *lourde* d'AkAbak est utilisée par de nombreuses universités, ainsi que par de nombreux industriels de renom (en France notamment).

Compte tenu de son prix raisonnable eu égard à ses multiples fonctions, ce programme ne s'adresse pas seulement aux professionnels. Les amateurs avertis auraient tort

Boxmodel v. 1.0, 1990

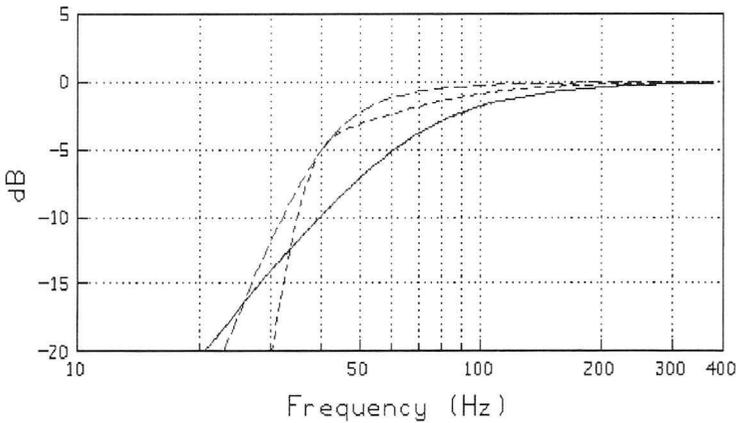
Press F1 for Item Help

DATA ENTRY				
Driver	Type	Losses	Box	Hp eq None
ID: Default	>Pr	QAS = 28.0	VB = 20.01 l	
fS = 40.0 Hz	Vented	QLS = 14.0	fP = 25.74 Hz	
VAS = 20.3 l	Closed	QFS = 28.0	VP = 28.30 l	
QES = 8.399				
QMS = 9.350				
RE = 6.00				
SD = 220.0 cm ²				
PE = 80.0 V				
xxx = 4.00 mm				
		V/pr	Keep	Recall
		Plot	pr	Scr
		Info	tMpkpr	
P-R AREA:		T = 21.0 °C		
220.0 cm ²		P = 750 mm Hg		
Quit				

MISCELLANEOUS PARAMETERS					
DRIVER		BOX		SYSTEM	
CMS = 0.42 mm/N	BI = 11.96 Tm	fB = 39.99 Hz	F3S = 51.59 Hz	Box & Equalizer	
MMS = 37.9 g	Sns = 88.5 dB	QBS = 7.0			
RMS = 1.02 kg/s	QTS = 0.3827	f3B = 51.59 Hz			

MAGNITUDE RESPONSE

- A
- - - B
- - - C
- - - D



Figures 13.11a+b. Boxmodel ; Menus pour la saisie et affichage graphique des courbes.

de sous-estimer les économies que des programmes de cette gamme de prix leur permettraient d'effectuer, en leur évitant d'acheter par exemple tel haut-parleur coûteux qui plus tard se révélerait inapproprié. Pour ce qui est du choix entre d'une part ce programme et d'autre part des programmes à menus déroulants plus chers, il dépendra en grande partie de la complexité des tâches et des préférences personnelles de l'utilisateur. Il existe la possibilité de faire connaissance au moyen d'une version de démonstration.

Environnement requis : 386 ou mieux, 4 Mo de MEV, 4 Mo sur le disque dur, Windows 3.1 ou plus.

La version disponible au moment de la parution de ce livre (juillet 1996), AkAbak 2, considérablement élargie par rapport à AkAbak 1, est vendue 1725 DM TTC. Pour les scolaires et les universitaires, ce prix est ramené à 495 DM. La version de démonstration est disponible pour 25 DM.

La version *AkAbak Light* se présente sous forme de livre avec un CD-ROM, édités par Franzis Verlag ; elle est vendue 70 DM en librairie en Allemagne, et sera disponible en anglais à la fin de l'année, et peut-être en français plus tard.

*Jörg Panzer & Partner, Steinstr. 15,
D - 81667 MÜNCHEN.*

Fax : 49 89 688 7072

Courrier électronique :

100753.320 @compuserve.com

Bassbox 5.1 for Windows Harris Technologies

Bassbox 5.1 permet non seulement de simuler les courbes de réponse d'un haut-parleur donné en fonction des différents types d'enceintes, mais encore de déterminer le niveau sonore le plus élevé obtenu avec chaque combinaison châssis/enceinte. Ceci permet de trouver rapidement l'enceinte

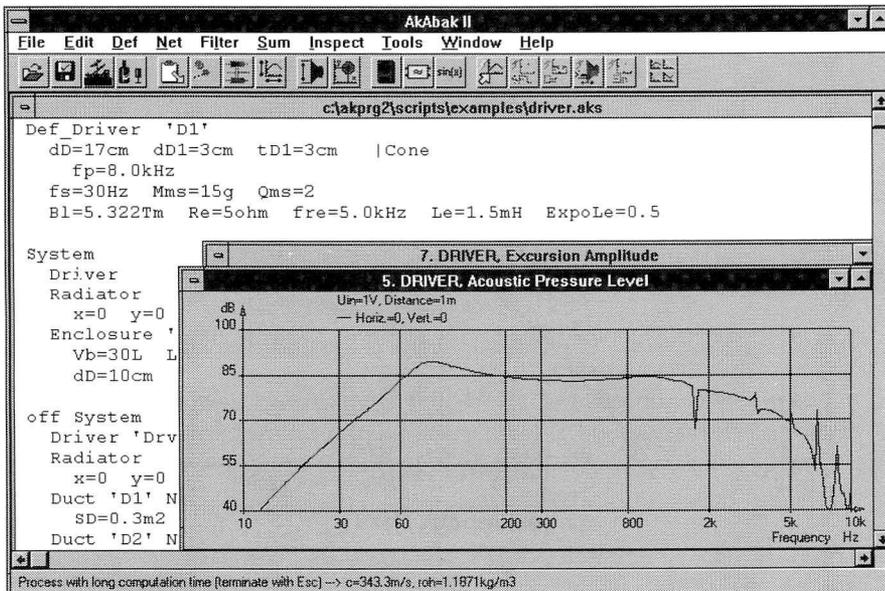


Figure 13.12 : Il faudrait cent copies d'écran comme celle-ci pour rendre compte de la puissance et de la versabilité d'AkAbak II.

optimale pour chaque haut-parleur. *BassBox* calcule aussi les dimensions de l'évent pour les enceintes *bass reflex*, de même que les dimensions de l'enceinte elle-même. La disquette comporte aussi des outils auxiliaires.

Environnement requis : Windows 3.1, environ 4 Mo sur le disque dur.
 Disponible pour 99\$ environ chez Old Colony Sound Lab
 P.O. Box 243 - Peterborough, New Hampshire
 03458-0243 USA
 Tel : (603) 924-371 ou (603) 924-6526
 Fax : (603) 924-9467

BBox-Speaker CAD **Bernd Wenzel**

Un programme de CAO bon marché, en allemand, pour effectuer les calculs et les simulations de base pour la conception d'enceintes acoustiques.

Environnement requis : PC 386, 640 K MEV, MS-DOS3.0, carte VGA.
 Disponible pour environ 60 DM chez Bernd Wenzel, Einsteinstr. 25, D - 73447 OBERKOCHEN.
 Version de démonstration (*shareware*) disponible.

BOXEN 5.1 **Michael Fischer**

Programme allemand disponible en version de démonstration qui permet de tester sérieusement avant d'acheter. La version complète est fournie avec un catalogue de quelque 3000 haut-parleurs qui à lui seul justifie le prix au demeurant raisonnable de ce programme (100 haut-parleurs dans le catalogue de la version de démonstration).

Environnement requis : XT ou AT, tous les modes vidéo

Disponible chez Michael Fischer, Hohne-mannstr. 14, D - 34130 KASSEL pour 40 DM (5 DM pour la version de démonstration).

Boxmodel 4.0 with Graphics **Robert M. Bullock III, Robert White**

Décrit pour la première fois dans *Voice Coil* en 1990, ce programme est l'un des plus vendus dans le monde. Il analyse la réponse aux fréquences très basses de haut-parleurs et d'enceintes de tous types, y compris à radiateur passif, en présence de signaux faibles ou forts. L'auteur a publié de nombreux articles dans le *JAES* et collabore régulièrement à la revue *Speaker Builder* à laquelle il a donné certains de ses meilleurs articles sur la fabrication d'enceintes et de filtres. Le niveau déjà élevé de la version précédente a été sensiblement relevé dans la version désormais disponible. Ses fonctions en matière d'enceintes selon Thiele / Small sont vraiment attrayantes et insurpassables à ce prix. Voici quelques-unes de ces caractéristiques.

- ◆ Calcul automatique dès qu'un paramètre est modifié
- ◆ Mémorisation simultanée des données de quatre systèmes différents (ou moins)
- ◆ Affichage simultané sur un même axe des paramètres de quatre systèmes différents (ou moins) afin de faciliter les comparaisons.
- ◆ Intégration d'un filtre passe-haut d'ordre 1 à 3 pour comparer les réponses avec et sans filtre
- ◆ Enceintes à radiateur passif, closes ou à événements
- ◆ Saisie séparée des facteurs de pertes (absorption, fuites, tunnel) pour déterminer rapidement l'influence de fuites éventuelles
- ◆ Saisie aisée de la température ambiante et de la pression atmosphérique, avec calcul automatique des paramètres affectés
- ◆ Aide en ligne pour la plupart des fonctions

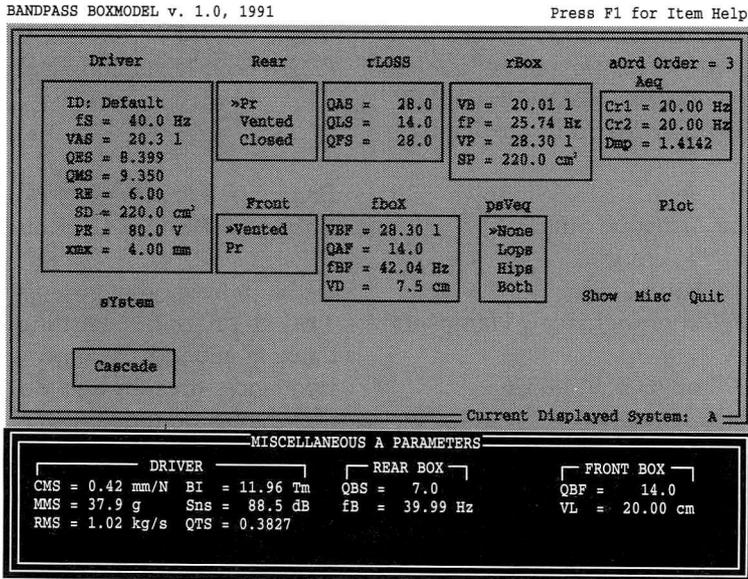


Figure 13.13 : BP-Boxmodel - Menu pour la saisie des données.

- ♦ Calcul de caractéristiques diverses, comme Cms, longueur du tunnel, α , h , δ .
- ♦ La nouvelle version présente en plus les fonctions d'affichage suivantes :
 - courbes de réponse en régime impulsionnel et du retard de groupe de l'enceinte
 - courbe d'impédance et phase
 - courbe de pression maximale et relative et de la réponse en phase acoustique
 - courbe de l'excursion de la membrane et du radiateur passif et de la vitesse de l'air dans le tunnel

Le programme donne des alignements optimisés à courbe de réponse plate et les coefficients de la fonction de transfert. L'interface améliorée reconnaît quelque 300 imprimantes différentes. Une version pour Windows est également disponible.

Environnement requis : Tout PC, coprocesseur optionnel.

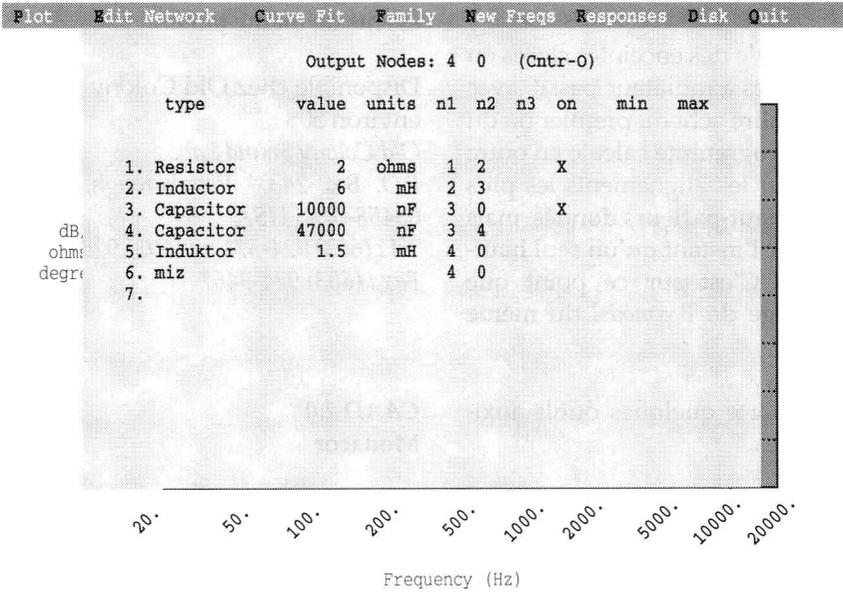
Disponible chez *Old Colony Sound Lab* pour environ 60\$ (75\$ pour la version Windows).
Old Colony Sound Lab.

P.O. Box 243 - Peterborough, New Hampshire
03458-0243 USA
Tel : (603) 924-371 ou (603) 924-6526
Fax : (603) 924-9467

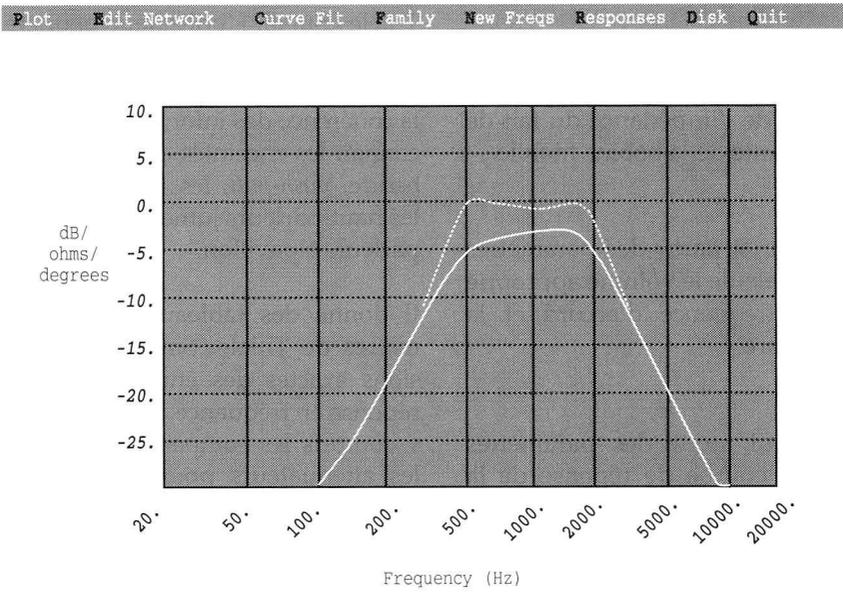
Bandpass BoxModel with Graphics
Robert M. Bullock III, Robert White

Version de *BoxModel* spécialisée dans le calcul d'enceintes passe-bande, caractérisées par la présence de deux chambres acoustiques, placées l'une devant, l'autre derrière le haut-parleur. Le rayonnement acoustique intervient par l'intermédiaire d'un tunnel ou d'un radiateur passif sur la chambre antérieure. Huit combinaisons acoustiques différentes peuvent être calculées.

Environnement requis : 384 K MEV, coprocesseur recommandé mais pas indispensable
Disponible chez *Old Colony Sound Lab* pour environ 50\$.



iter=001 count=000 rms error=2.722 press ESC to continue



iter=001 count=000 rms error=2.722 press ESC to continue

Figure 13.14a+b : Menu de saisie des données et affichage de la courbe de réponse.

Boxresponse with Graphics

**Robert M. Bullock III, Robert White,
Glenn Philips**

Ce programme calcule des enceintes closes ou à évent, des enceintes à radiateur passif, avec pour égaliseur un filtre actif du premier ou du second ordre. Ce programme calcule en outre les paramètres pour les alignements les plus linéaires pour des haut-parleurs donnés, mais ne peut traiter pour l'instant qu'un seul haut-parleur à la fois. C'est sur ce point que Boxresponse diverge de *Boxmodel* du même auteur.

La disquette comporte quelques outils auxiliaires des plus utiles.

Air Core

Un programme qui calcule la résistance en courant continu de bobines (selfs) à air, en fonction de leur inductance et de la section du fil utilisé.

Stabilizer

Un programme qui détermine la valeur des composants d'un réseau RC de compensation de l'augmentation de l'impédance du fait de l'inductance croissante de la bobine mobile.

Optimum Box

Un programme qui, à partir des paramètres de Thiele / Small, calcule le volume approprié de l'enceinte, la fréquence d'accord et la fréquence de coupure.

Response Function

Un programme qui, pour des paramètres donnés, calcule la courbe de réponse de la combinaison châssis / enceinte.

L-Pad

Un programme de Glenn Philips qui calcule la valeur des composants du circuit d'atténuation des niveaux des haut-parleurs des registres médium et aigu sans modification de l'impédance.

Vent Computation

Un programme de Glenn Philips qui calcule la longueur du tunnel pour un à quatre évents de même taille.

Disponible chez Old Colony Sound Lab pour environ 50\$

Old Colony Sound Lab.

*P.O. Box 243 - Peterborough, New Hampshire
03458-0243 USA*

Tel : (603) 924-371 ou (603) 924-6526

Fax : (603) 924-9467

CAAD 2.0

Monacor

Ce programme du Danois Niels Nörby est polyglotte et connaît le français. Son prix le met à la portée de tous. Il connaît toutes les caractéristiques des haut-parleurs du programme Monacor, compilées dans une banque de données avec les paramètres de Thiele / Small. L'utilisateur peut créer sa propre banque de données. L'écran de saisie est partiellement interactif, en ce sens qu'il vérifie la cohérence des informations. Le programme connaît les enceintes closes, *bass reflex*, passe-bande, *push-pull*, les lignes de transmission, les haut-parleurs jumelés, mais aussi les haut-parleurs à pavillon.

Il donne des tableaux complets des paramètres de Thiele / Small, calcule les dimensions exactes des enceintes, les courbes de réponse en fréquence, les filtres (d'ordre 1 à 4) y compris les compensation d'impédance et les atténuateurs pour compenser les différences de rendement entre haut-parleurs.

Environnement requis : 512 K de MEV

Disponible chez MONACOR,

Groupe SODEL, F - 32240 Miradoux

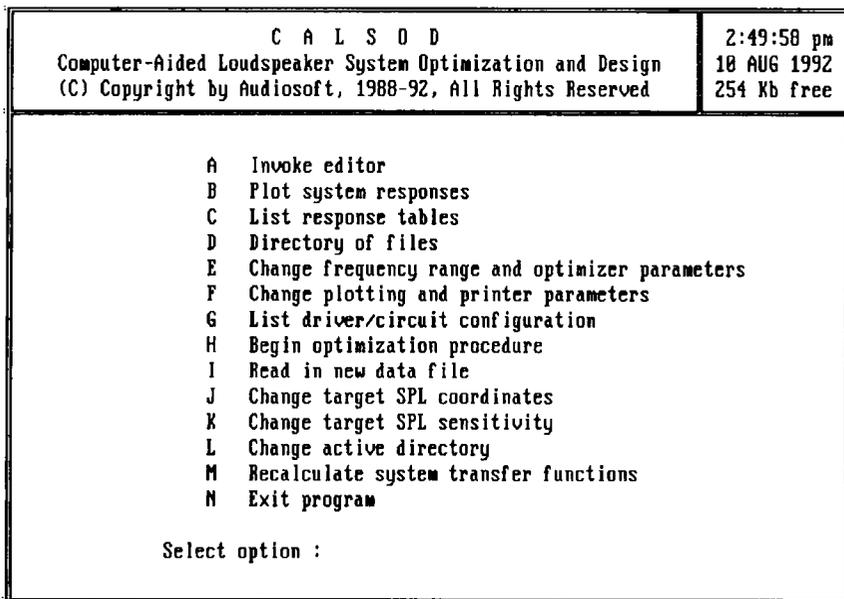


Figure 13.15 : CALSOD-Menu pour la saisie des données.

Lasip CarBass 2.0

Conrad Electronic

Un des rares programmes spécialisés dans la construction et l'installation d'enceintes pour l'auto. Fonctionne sous Windows et permet le calcul et la simulation d'enceintes closes, *bass reflex*, et passe-bande. Il simule aussi les conditions particulières du montage dans les portières et sous la vitre arrière, et affiche les informations suivantes :

- ◆ courbe de réponse en amplitude
- ◆ déplacement de la membrane en fonction de la fréquence
- ◆ pression sonore linéaire maximale
- ◆ caractéristiques d'amortissement

Les paramètres de l'enceinte peuvent être modifiés directement dans la représentation graphique. Deux haut-parleurs peuvent être traités simultanément mais indépendamment l'un de l'autre. Ils peuvent être combinés l'un avec un circuit passe-haut et l'autre avec un circuit passe-bas (6 dB à 24 dB par octave). Le programme permet en outre de calculer les paramètres de Thiele/Small à partir de

mesures d'impédance, au moyen soit de la modification de la masse de la membrane soit d'une enceinte de test.

Le programme comporte également une banque de données facile à utiliser, avec de nombreux haut-parleurs du catalogue Conrad, un utilitaire de dessin pour des enceintes parallélépipédiques (aux arêtes éventuellement chanfreinées) et cylindriques. Une fonction de mise en perspective est disponible, de même que des fonctions de vues en coupe, cotées, avec les compartiments et les raidisseurs. La seule possibilité de déterminer l'excursion de la membrane en fonction de la fréquence et la pression linéaire maximale pour une combinaison haut-parleur-enceinte donnée, rend ce programme bon marché très attrayant pour tous les amateurs passionnés. Compte tenu du fait que l'exiguïté de l'habitacle de la plupart des voitures ne permet pas d'y installer des enceintes volumineuses, et compte tenu aussi du fait que l'on en attend généralement des niveaux sonores néanmoins élevés, notamment aux fréquences les plus basses, le

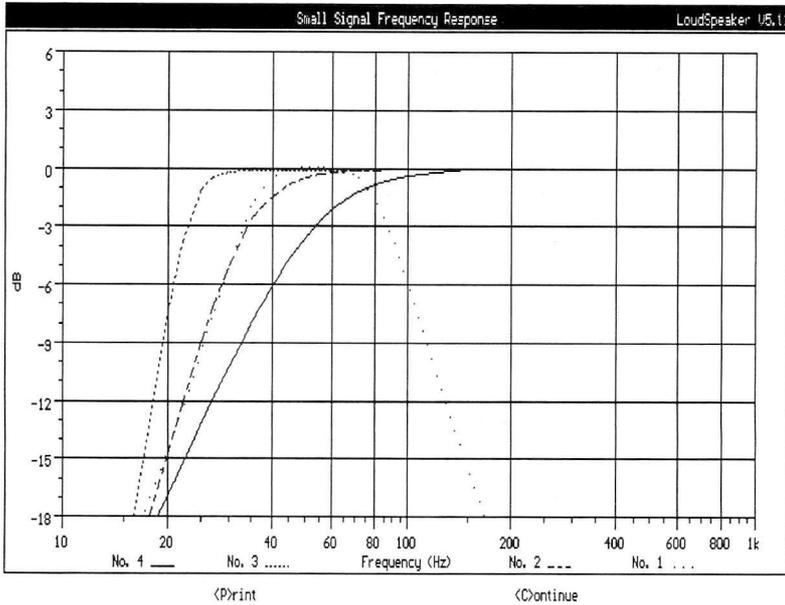


Figure 13.16 : Loudspeaker - Représentation graphique des courbes de réponse. Ce programme donne entre autres des indications sur la manière de dimensionner des enceintes passe-bande.

choix des haut-parleurs et l'adaptation de l'enceinte prennent une importance particulière. Si la robustesse électrique de la plupart des haut-parleurs modernes est à l'épreuve du niveau de puissance élevé des amplificateurs par lesquels ils sont alimentés, il n'en va pas toujours de même pour leur robustesse mécanique. Le programme *Lasip CarBass 2.0* permet de bien examiner cet aspect de l'adaptation du châssis aux conditions particulières dans lesquelles il doit être monté. Il est bien sûr possible de vérifier des installations existantes, du moins si les caractéristiques des haut-parleurs concernées sont connues. Tout cela à un prix qui n'atteint même pas celui des dommages que causerait une inadéquation des châssis.

Environnement requis : Windows 3.1 ou plus, environ 1,4 Mo sur le disque dur.
 Disponible chez *Conrad Electronic*
 (en France : *Decock Electronique*, 4, rue Colbert, 59800 LILLE, tél. 20.12.88.88).

Lasip 3.0 pour Windows **Conrad Electronic**

Un programme de simulation de haut-parleurs bien conçu, qui connaît non seulement les enceintes closes, *bass reflex* et passe-bande, mais aussi les enceintes à haut-parleurs de grave jumelés. La simulation du filtre répartiteur accepte jusqu'à quatre châssis, et ne se contente pas de calculer la courbe d'impédance, mais détermine aussi la réponse en phase, électrique et acoustique. Il est possible de tracer simultanément deux courbes de niveau, sous deux angles différents par rapport à l'axe de symétrie, par exemple 0° et 30°. Une fonction utile en pratique qui manque sur bien des programmes beaucoup plus prétentieux... et plus chers. Comme *Lasip CarBass 2.0*, ce programme comporte un utilitaire de dessin, avec mise en perspective des enceintes, qui accepte jusqu'à cinq châssis. Le programme dresse une liste

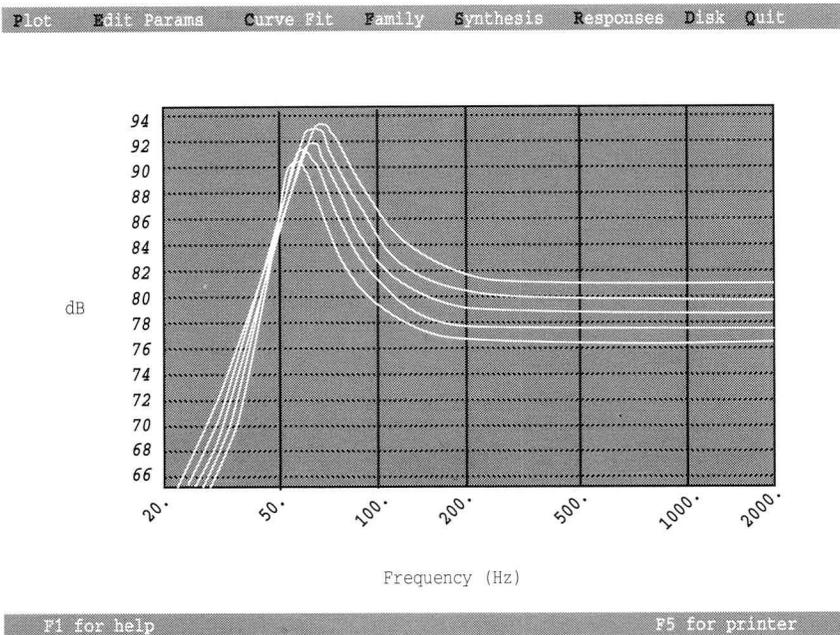
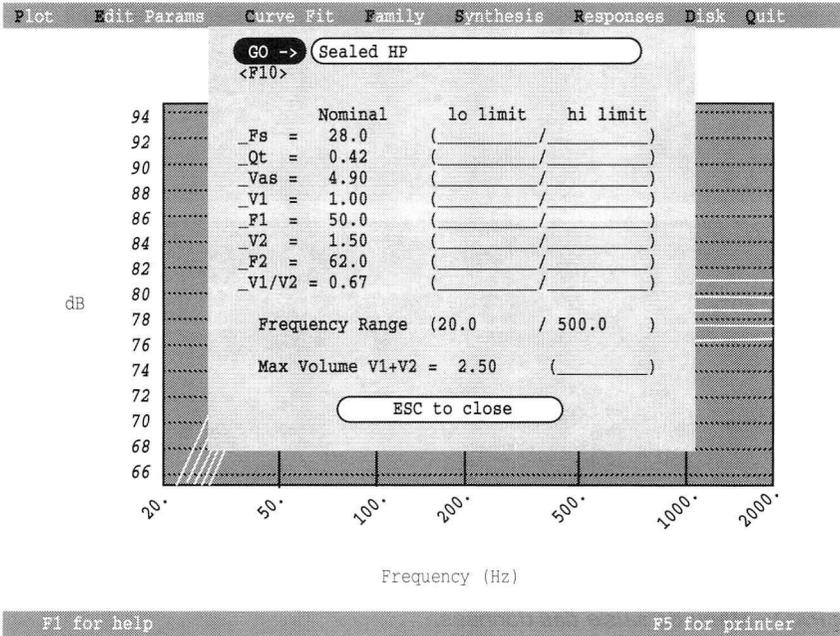


Figure 13.17a+b : LF-Designer - Menu de saisie des données et représentation graphique des courbes de réponse.

PASSIVE CROSSOVER DESIGN v. 3.1, 1990

CROSSOVER DATA

Ways	Type	Order	Xc point(s)	Loads	Response
2	>All-pass	1	fL = 200.0	Rw = 8.00	*Observe
>3	Butterworth	2	Bx	Rm = 8.00	Reverse
		3	fH = 2000.0	Rt = 8.00	
		>4	Rx		Bptype

Info Quit

Crossover Design

Lowpass

L1 = 11.9546 mH
C1 = 157.6844 µF
L2 = 6.0072 mH
C2 = 35.4314 µF

Transformation Bandpass

L1 = 1.3932 mH C1 = 45.4530 µF
L2 = 4.1359 mH C2 = 15.3113 µF
L3 = 0.5863 mH C3 = 108.0146 µF
L4 = 19.9908 mH C4 = 3.1677 µF
Ra = 0.10 Gain cut: 0.11 dB

Highpass

C1 = 5.2972 pF
L1 = 0.4018 mH
C2 = 10.5417 pF
L2 = 1.7873 mH

Figure 13.18 : PXO - Menu de saisie des données.

TLINE MODEL v. 1.0, 1990

Press F1 for Item Help

Driver	Line	Fiber	aOrd Order = 2
ID: Default FS = 35.5 Hz VAS = 52.1 l QMS = 8.540 QMS = 2.100 RE = 5.27 SD = 210.0 cm³ PE = 100.0 W XEX = 4.00 mm	Length = 1.20 m P Den = 8.0 kg/m³ Flare = 1.00 Vol = 0.0 l cL = 300.0 m/s SB = 210.0 cm²	Diam = 8.822500 mm rhof = 908.8 kg/m³ Drag A = 27.0 Drag exp = 1.4 Porosity = 1.00	Cr2 = 20.0 Hz Dmp = 1.4142
paVeq		Ehow	Plot Misc
>None Lops Rips Roth			
Quit			
Current Displayed System: A			

MISCELLANEOUS A PARAMETERS

DRIVER	Effective in-line air density.
CMS = 0.83 mm/N BI = 7.42 Tm	rhoL = 1.11 kg/m³
MMS = 24.1 g Sns = 88.4 dB	lambda = 1297.3698
RMS = 2.56 kg/s QTS = 0.4295	

Figure 13.19 : TL-Boxmodel - Menu de saisie des données.

des composants requis, en tenant compte des compartiments et des raidisseurs.

Lasip 3.0 possède sa propre banque de données avec de nombreux châssis du programme Conrad. L'utilisateur peut aisément rajouter lui-même des châssis dans ce fichier. La saisie des relevés de mesure est effectuée au moyen d'un simple tableau au format ASCII. Eu égard au prix de ce programme, ses performances sont étonnantes.

Environnement requis : Windows 3.1 ou plus, environ 2 Mo sur le disque dur. Disponible chez *Conrad Electronic* (en France : *Decock Electronique, 4, rue Colbert, 59800 LILLE, tél. 20.12.88.88*).

Speaker Pro G. Schawe, Visaton

Ce programme, déjà bien connu dans ses versions 5.2 et 5.2+, associe désormais dans sa version 6.0 une fonction de simulation professionnelle à une banque de données qui ne l'est pas moins : outre les informations habituelles sur les haut-parleurs, elle donne en effet les valeurs pour le niveau, la phase et l'impédance de tous les châssis Visaton. Ceci exclut les incertitudes qui résultent d'erreurs éventuelles quand on fait ces mesures soi-même, et contribue à améliorer la fiabilité des simulations. Inversement, la présence de ces données de référence permet accessoirement à chacun d'améliorer l'étalonnage de son propre dispositif de mesure. Lorsque l'on sait que toute simulation ne vaut pas plus que la précision des paramètres utilisés, on en vient à considérer cette combinaison de l'outil de simulation et de la banque de données comme *le* modèle (à perfectionner) de programme de CAO pour concepteurs amateurs.

Avec la nouvelle version *Speaker Pro 7.0* les fonctions de simulation de l'enceinte et du filtre ont été améliorées, tandis que la version

Speaker Pro 7.0 HR offre en plus la haute résolution. Toutes les fonctions ne peuvent pas être décrites ici, le lecteur intéressé peut se procurer la version de démonstration qui lui en donnera un aperçu convaincant.

Speaker connaît les enceintes closes, *bass reflex* et passe-bande, les enceintes à ligne de transmission, les haut-parleurs jumelés, et les haut-parleurs à pavillon que la plupart des autres programmes de simulation ne connaissent pas. La simulation détermine aussi la réponse impulsionnelle de la combinaison haut-parleur / enceinte retenue. Le programme calcule les dimensions du tunnel et établit une liste de composants.

La simulation du filtre accepte des réseaux jusqu'à cinq voies, avec des filtres jusqu'à 24 dB. Il est permis de monter en parallèle autant de haut-parleurs que l'on veut et comme tous les calculs sont faits à partir de relevés de mesure précis, les résultats sont d'autant plus fiables.

Environnement requis : 640 K de MEV, 2 Mo sur le disque dur.

Disponible chez Visaton, Peter Schukat, *Abteilung Technik*, Postfach 1652, D - 42760 HAAN au prix de 250 DM pour *Speaker Pro 6.0*, 500 DM pour la version 7.0 et 700 DM pour la version 7.12. Une version de démonstration existe à 25 DM. La banque de données *SPEAKER DATA 1.0* est disponible en *shareware* à 25 DM.

Transmission Line Box Model Robert M. Bullock III, Robert White

Ce programme calcule des enceintes à ligne de transmission, avec pour les châssis le modèle standard de Thiele / Small. La modélisation acoustique se fait à partir d'un modèle transformé de Bradbury. Ce programme permet de choisir les paramètres des

châssis, la longueur et le rétrécissement de la ligne acoustique ainsi que la vitesse du son dans la ligne et enfin la porosité du matériau amortisseur.

Environnement requis : 384 K MEV, coprocesseur recommandé mais pas indispensable.

Index

A			
accéléromètre	152, 254	champs de fuite	3
amortissement	40	chanfrein	145
amplificateur		Chebychev	
résistance de source	241	d'ordre deux	181
augmentation de masse		cinéma	259
de l'équipage mobile	64, 65	circuit anti-résonant	215
		circuit anti-résonant parallèle	221
		circuit de correction RL ou RC	219
		coffret	145
B		bruits parasites	151
baffle	145	forme géométrique	146
infini	15	géométrie	147
bague de court-circuit	5	compensation	
bande sonore des films	259	impédance	215
bandes de fréquences	7	compliance	10, 238, 239
Bessel		condensateur	
d'ordre deux	181	non-polarisé	224
d'ordre quatre	192	cône	8, 146
blindage magnétique	263	configuration <i>push-pull</i>	62
bobine		<i>Constant Power Circuit</i>	173
courte	3	courant d'auto-induction	5
longue	3	coefficient de surtension	229
à inductance, self	222	coefficient de surtension électrique Q_c	40
bobine mobile	1	coefficient de surtension mécanique Q_{mc}	40
inductance	240	coefficient Q	164
température	254	coefficient Q_c	40
boucle de Faraday	5	cylindre	146
bruit rose	250		
Butterworth		D	
d'ordre trois	186	décalage horizontal	171
d'ordre quatre	186	défecteurs	148
d'ordre un	177	demi-sphère	146
		Deneuve, Catherine	273
C		deuxième haut-parleur	12
cache-noyau	9	diaphonie	249
cadres de tissu	159	diffraction	145
capacitance	163, 236	directivité	169
centrage de la bobine	9	<i>Dolby Pro Logic</i>	259
chambre		double cône	146
anéchoïque	145, 246	double pyramide	146
sourde	145		
champ			
libre	146		
proche	259		
réverbéré	146, 158		

E			
effet de sol	248	exemples de calculs	31
effet Doppler	157	fréquence de coupure à -3 dB	32
<i>Efficiency Bandwith Product</i> EBP	22	haut-parleurs de graves jumelés	62
égalisation active	155	plusieurs haut-parleurs de graves	41
égaliseur	155	puissance acoustique Par	29
émission		puissance électrique Per	30
hémisphérique	145	volume	22
sphérique	145	volume effectif	70, 77
enceinte		entrefer	3
à deux voies	154	équipement mobile	
à labyrinthe	141	masse	229
centrale	263, 264	poids	237
découplage du sol	151	événement	9, 68, 72
formes exotiques	147	excursion de la membrane	69, 75
pentagonales	148		
pour haut-parleur médium	157	F	
semi-cylindriques	148	face avant	
sonorisation	259	protubérances	146
subsonique	260	facteur de force BL	4
vide	40	feutre bitumé	149
volume	238	filtre	
enceinte acoustique		à deux voies	174, 198
à radiateur passif	119	à trois voies	200
bande passante	246	actifs	225
canaux ambiophoniques	268	Butterworth	161, 167
mauvaise	229	condensateurs	224
enceintes closes		Linkwitz-Riley	167
compensation électronique	63, 64	ordre	164
sonorisation de salle		parallèle	162
de projection vidéo domestique	259	passe-bande	163
subsoniques	272	passe-bas	163
enceintes à ligne de transmission		passe-haut	163
<i>Transmission Line</i> , TL	137	passe-haut série	65, 67
enceintes à radiateur passif		passe-tout	167
accord	127	passif	161
charge symétrique	128	phase	166
membrane	122	phase linéaire	167
volume	122	réjecteur	215
enceintes à radiateurs passifs couplés	130	série	162
à deux haut-parleurs de graves	134	force de rappel	11
enceintes closes	15	force du moteur magnétique	229
amortissement	35	forme ovoïde	145
amortissement apériodique	70, 76	forme sphérique	145
charges symétriques	67, 70, 76	fréquence de résonance	6
choix du haut-parleur de graves	21	mesure	230
coefficient Q	19		
efficacité caractéristique	29		

G

géométrie de la face avant	145
grilles de façade	159

H

haut-parleur	
à pavillon	259
bagues de découplage	151
centre acoustique	170
coaxiaux	168
coefficient Q	243
d'aigus	146
encastrement	146
fixation	151
force magnétique	239
grave-médium	154
inserts de fixation	151
joint aux silicones	151
joint d'étanchéité	151
montage flottant	151
montage sans baffle	158
résonance	215

I

impédance	
compensation	215
de rayonnement	7
mesure	231
variation	215
impulsion	
front d'onde	154
interférences	154
Internet	269

L

laine de verre	
densité	38
type R19	71, 77
Legendre	
d'ordre quatre	193
ligne de transmission	
historique	138
longueur et amortissement	139
régime transitoire	139
réponse en fréquence	139
linéarité	
défauts	68, 72

Linkwitz-Riley	
d'ordre deux	181
d'ordre quatre	190
longueur de bobine	
hors de l'entrefer	22

M

masse d'air	237
matériaux de remplissage	38
membrane	1, 7
excursion	273, 276
mesure	
microphone	252
microphone	251
mode concentrique	7
mode radial	7
moteur	1

N

niveau sonore	12
noyau	1

O

octave	153
1/3, 1/10	250
ondes stationnaires	41
opposition de phase	8

P

panneaux	
MDF	148
sandwich en aluminium	149
panneaux creux	149
parallélépipède	146
parois	
amortissement	149
composite bitumineux feutre/argile	149
matériaux	149
matériaux antivibratoires	149
multicouches	149
plaques de pierre	149
sable et ciment	150
phase	
mesure	252
minimale	252
perturbations	153
quadrature	166
pièce polaire	3

plan des origines temporelles	171	T	
plaque de champ	1	taux de remplissage	40
pointes	151	temps de propagation	170
premières réflexions	154	Thiele	
produit : rendement	22	méthode	243
puissance acoustique	12	THX	259
<i>push-pull</i>	70, 76	traceur de courbes	250
pyramide	146, 148	traitement antivibratoire	149
		<i>tweeter</i>	146
R		tyrannosaurus rex	272
radiateur		V	
fréquence d'accord	122	Variovent	70, 76
passif	119, 122	vitesse du cône	
rayonnement hémisphérique	247	courbes	21
réactance	236	Z	
règle d'or	148	<i>zero delay plane</i>	171
renforts		zone de recouvrement	156
cornières en fer	150		
entretroises	150		
horizontaux	150		
maître couple	150		
tasseaux	150		
réponse en puissance	173		
résonance	215		
résonateur série	68, 72		
retard de groupe	19, 69, 75, 188		
rodage	230		
S			
self			
à noyau métallique	222		
à air	222		
socle	151		
son ambiophonique	260		
sonomètre	250		
sources rayonnantes			
combinaison de deux	156		
sphère	146		
<i>spider 10</i>			
SPL (<i>Sound Pressure Level</i>)	12		
structure			
renforts	149		
suspension	1		
suspension acoustique	15		
suspension centrale	10		
suspension périphérique	10		

Lexique

a

absorbing material : matière absorbante

absorbing wedge : coin ou pyramide dont sont recouverts les murs d'une chambre anéchoïde

AC : (tension ou) courant alternatif

accuracy : précision

actual : réel

almost : presque

area : aire, surface, superficie

available : disponible

average : moyenne

avoid (to) : éviter

b

backup : sauvegarde, copie

baffle : écran acoustique (plan sur lequel est monté le haut-parleur et qui sépare les champs de rayonnement avant et arrière du haut-parleur) ; ce terme est utilisé aussi pour désigner l'enceinte acoustique (cf *infinite baffle*).

balanced : équilibré symétrique

bandwidth : largeur de bande, bande (passante)

bead : perle (ferrite)

beam : faisceau

best case : conditions favorables

bias : polarisation

bit (binary digit) : chiffre binaire

boost : élévation ; suralimenté, poussé

bootstrap (circuit) : autoélévateur

bottom : fond, bas

bottom view : vue de dessous

box : coffret de l'enceinte (aussi *enclosure*)

BPF (band pass filter) : filtre passe-bande

brace : raidisseur, membrure, entretoise

breadboard : montage d'essai

bridge : pont (redresseur)

broadband : à large bande

broadcasting : émission (radio)

built-in : embarqué

bundle : faisceau, botte

burst : salve, rafale

BW (bandwidth) : largeur de bande passante

bypass : dérivation, découplage, shunt

bypass(ed) : découplage, découplé, dérivation, shunt(é)

byte : octet

C

cabinet : boîtier, coffre(t), caisse, ébénisterie

cage : casier

cancel(ing) : annuler, annulation

cancellation : annulation, élimination

case : boîtier (d'un composant)

channel : canal

cheap : bon marché

check : vérification

chip : puce, circuit intégré

clever : ingénieux

closed box : enceinte close

closed-loop : en boucle fermée (par une contre-réaction,...)

coil : bobine

collapse : disparition

compliance : élasticité, souplesse

compound : jumelage, paire

cone break up : rupture de membrane (discontinuité et irrégularités des modes de résonance)

cone displacement : excursion de la membrane

control : commande, asservissement, (rarement) contrôle

cool (to) : refroidir

cooling : refroidissement

core : noyau

cross-over distortion : distorsion d'intermodulation

crossover frequency : fréquence de transition (entre deux registres; s'écrit aussi *Xover*)

crosstalk : diaphonie

cubic foot : 28,315 dm³

cut off frequency : fréquence de coupure

d

damping material : matériau amortisseur (aussi *stuffing*)

dB (décibel) : unité de comparaison de niveaux (le rapport en décibels de deux tensions est égal à vingt fois le logarithme décimal de leur rapport ; le rapport en dB de deux puissances acoustiques est égal à dix fois ce logarithme)

DC : courant continu

delay equalizer : réseau correcteur

delay : retard

design : conception, élaboration ; dessin

device : circuit, appareil, unité

digit : chiffre

digital : numérique

display : afficheur

downstream : en aval

drift : dérive

driver : haut-parleur, circuit de commande, de puissance, pilote, tampon, attaquer

drop : chute (de tension)

drop (to) : chuter

dual : double

duration : durée

dust : poussière

dust cap : cache-noyau

e

edge : bord

emitter follower : émetteur suiveur (collecteur commun)

enable : validation activation

enclosure : coffret de l'enceinte, boîtier, compartiment

enhancement : enrichissement

exceed (to) : dépasser, excéder

f

fading : évanouissement
failure : défaut, erreur
fall-off : pente (des flancs)
fall time : temps de descente
fan : ventilateur
fast : rapide
features : caractéristiques
feed-forward : réaction positive
feed-through : passage
 (condensateurs ou fuite de signal)
feedback : réinjection,
 contre-réaction, réaction négative
ferrite : amalgame fer/céramique
few : peu
figure : caractéristique, facteur,
 indice
fill (to) : remplir
first : premier
fix (to) : réparer
flag : indicateur, drapeau, témoin
flange : bride, joue (de bobine)
flat : plat, rectiligne
float(ing) : flotter, flottant
foam : mousse
fold (to) : plier, replier
follow (to) : suivre
foot : pied (0,3048 m)
fourth : quatrième
frame : cadre, châssis, saladier (de
 haut-parleur)
free : libre
front : avant

g

galvanic isolation : isolation
 galvanique ou électrique
gap : entrefer

h

halt : arrêt, blocage
handle (to) : manipuler ; supporter
hardware : matériel
height : hauteur
hold : maintien, entretien
highpass : passe-haut
holding : maintien
hum : ronflement, bruit à très basse
 fréquence

i

idle : inactif, remplissage
impedance matching : adaptation
 d'impédance
inch (to) : bouger mm par mm
inch : pouce (25,40 mm)
inductor : bobine d'inductance
infinite baffle : écran acoustique
 infini
input : entrée
instrument : appareil
insulation : isolation
interlaced : entrelacé

j

job : tâche
jump : saut

k

knee : genou ; coude (d'une courbe)

l

label : nom, étiquette
large : grand, élevé
latch : verrou
layer : couche
layout : dessin, plan, tracé
lead : broche, patte ; plomb
leakage : fuite
left : gauche
less : moins
level : niveau
link : liaison, maillon, bobine de
 couplage
listener : auditrice, auditeur
load : charge
loudspeaker : haut-parleur
loss : perte
low : bas
low cost : bon marché
low-noise : à faible bruit
lowpass : passe-bas
lug : cosse (à souder)

m

magnet : aimant
magnitude : grandeur, amplitude
mahogany : acajou
main : principal
mains supply : alimentation secteur
master : maître, principal

match (to) : adapter
matched pair : paire appariée
maximum ratings : valeurs limites
mean (value) : moyen, valeur
 moyenne [$2/\pi \times V_{\text{crête}}$ (sinus)]
mismatch : défaut d'adaptation,
 désadaptation, défaut
 d'appariement
mixer : mélangeur
monitor(ing) : surveillance, contrôle
move : transfert, déplacement
mute : silencieux

n

narrow : étroit
nearfield : champ proche
network : réseau
noise : bruit
noise pickup : intrusion, infiltration,
 invasion, passage, incursion de
 bruit
notch filter : filtre coupe-bande à
 bande étroite, réjecteur fin

o

odd : impair
off-axis pole : pôle décalé
offset : décalage, déplacement
op-amp : amplificateur opérationnel
open : ouvert, non connecté
open-loop : en boucle ouverte
ounce : (aussi oz) ; once (28,3945 g)
output : sortie (aussi *out*)
overall : global, général
overlay : superposition,
 surimpression
overload : surcharge
overrange : dépassement (de
 gamme)
overshoot : dépassement
overtone : harmonique

p

package : boîtier
parts : composants
pattern : motif
PCB (printed circuit board) :
 platine, circuit imprimé
peak value : valeur de crête
phase shift : déphasage, rotation de
 phase
pin : broche

plot : tracé
port : événement, ouverture
pound : (aussi *lb* ; (453,49237 g)
(USA : 453,5924277 g)
(Québec : 16 ounces)
power supply : alimentation
power : puissance
ppm : partie par million
pre-emphasis : préaccentuation
previous : précédent
pulse : impulsion
purpose : fonction, but

q

quadrature : avec décalage de phase
de 90 degrés
quick : rapide, instantané
quotes : guillemets

r

rack : bâti, casier
range : domaine, plage
ratio : taux, rapport
rear : arrière (par opposition à *front*)
rejection : atténuation, réjection
reliability : fiabilité
remote : à distance
removable : amovible
resolution : définition
ribbon : ruban (métallique)
right : droit(e)
ripple : ondulation (résiduelle)
rise time : temps de montée
RMS (root mean square) value :
valeur quadratique moyenne
(racine carrée de la somme des
carrés d'une suite de valeurs),
valeur efficace (tension, courant)
roll-off : coupure, atténuation
croissante (BF), augmentation
d'amortissement (HF)
roll-off : décroissance (en fonction
d'un paramètre)
roll-on : croissance (en fonction d'un
paramètre)
roughly : grosso modo
rule : règle

S

sample : échantillon
scale : échelle, graduation
sealed : scellé, hermétique

shape : forme
sharp : raide
shield : écran, blindage
shift : décalage
short circuit : court-circuit
single : unique
sink (to) : drainer (du courant),
recevoir, accepter
sink current : courant drainé
size : taille, dimensions
sketch : croquis, esquisse
skirt : « jupe », pentes d'un filtre,
zone de transition
slave : esclave, auxiliaire
slew rate : vitesse de balayage,
temps de montée
slice : tranche
slope : pente, rampe
slot : fente, connecteur d'extension
slow : lent
small : petit, faible
SNR (signal to noise ratio) : rapport
signal/bruit
source (to) : fournir (du courant),
envoyer, débiter
speaker : haut-parleur
speed : vitesse
spider : suspension de centrage
split (to) : séparer, scinder
spurious : erroné, parasite
square inch : 6,451 cm²
square : carré
snivel : silencieux
stand by : veille
star network : réseau en étoile
state-variable filter : filtre variable,
programmable
stop-band : bande coupée, éliminée,
atténuée
stray : parasite, dû au câblage
(capacité, inductance)
stray capacitance : capacité parasite
stream : flot, flux, courant
stretch (to) : étendre
supply voltage : tension
d'alimentation
swap : permutation, échange
sweep : balayage, déflexion
swing (voltage swing) : plage de
tension, excursion

switch : interrupteur, commutateur
S & H (sample and hold) :
échantillonneur-bloqueur

t

tempco : abréviation de coefficient
de température
terminate (to) (line) : refermer sur
une charge, boucler (une ligne)
third : troisième
three-way : à trois voies
threshold : seuil
tight : serré
time delay : retard, temporisation
top : sommet, haut
top view : vue de dessus
tracking : poursuite
trade-offs : compromis
transducer : capteur
trimm (to) : régler, ajuster
tune (to) : accorder, régler
two-way : à deux voies

U

upper : supérieur

V

value : valeur
vent : événement
versus : en fonction de, comparé à
voltage : tension
voice coil : bobine du haut-parleur

W

wall : paroi
wave : onde
wavelength : longueur d'onde
wide : large, étendu
width : largeur, durée
windings : spires, enroulements
wire : fil
woofer : haut-parleur de grave
wool : laine
worst case : conditions défavorables

X

xanthosiderite : xanthosidérite

Y

yard : yard, verge (36 pouces =
0,9144 m)

Équivalence des normes américaines, anglaises et européennes

normes S.W.G. ^a	diamètre		dimensions du fil nu		poids en livres par 1000 yards ^b			D.S.C.	longueur/Ohm		courant de travail ^c	normes A.W.G. ^d
	pouce	mm	pouce ²	mm ²	Émaillé	S.S.C.	Lewmex		M.	anglaise		
10	0,128	3,2512	0,01287	8,3020	151	-	-	-	537 yds	489 m	12,87 A	8
12	0,104	2,6416	0,00850	5,4805	100	-	-	-	353	324	8,50	10
14	0,080	2,0320	0,00503	3,2430	59,00	-	59,00	-	209	191	5,03	12
16	0,064	1,6256	0,00322	2,0755	37,69	38,07	37,73	37,75	134	122,5	3,22	14
18	0,048	1,2192	0,00181	1,1675	21,22	21,43	21,30	21,28	75,3	68,72	1,81	17
20	0,036	0,9144	0,001018	0,6567	11,96	12,10	12,03	12,02	42,4	38,75	1,02	19
21	0,032	0,8128	0,000804	0,5189	9,467	9,591	9,518	9,517	33,4	30,53	804 mA	20
22	0,028	0,7112	0,000616	0,3973	7,257	7,329	7,303	7,296	25,6	23,40	616	21
23	0,024	0,6096	0,000452	0,2919	5,341	5,406	5,382	5,385	18,8	17,18	452	22
24	0,022	0,5588	0,000380	0,2453	4,494	4,560	4,531	4,536	15,8	14,44	380	23
25	0,020	0,5080	0,000314	0,2027	3,719	3,775	3,755	3,769	13,1	11,97	314	24
26	0,018	0,4572	0,000254	0,1642	3,016	3,069	3,049	3,057	10,6	9,688	254	25
27	0,0164	0,4166	0,000211	0,1363	2,504	2,554	2,536	2,541	9,08	8,339	211	26
28	0,0148	0,3759	0,000172	0,1110	2,043	2,089	2,086	2,083	7,18	6,563	172	27
29	0,0136	0,3454	0,000145	0,0937	1,726	1,763	1,753	1,757	6,05	5,540	145	28
30	0,0124	0,3150	0,000121	0,0779	1,436	1,474	1,459	1,477	5,08	4,643	121	28
32	0,0108	0,2743	0,0000916	0,0591	1,090	1,122	1,111	1,119	3,82	3,491	92	29
34	0,0092	0,2337	0,0000665	0,0429	0,792	0,805	0,809	0,820	2,77	2,532	67	31
36	0,0076	0,1930	0,0000454	0,0293	0,543	0,565	0,554	0,562	1,89	1,728	45	33
38	0,0060	0,1524	0,0000283	0,0182	0,339	0,358	0,347	0,359	1,18	93,05 cm	28	34
40	0,0048	0,1219	0,0000181	0,0117	0,217	0,232	0,222	0,235	27,0 in	68,58	18	36
42	0,0040	0,1016	0,0000126	0,0081	0,151	0,165	0,155	0,169	18,87	47,93	38	38
44	0,0032	0,0813	0,0000080	0,0052	0,097	0,109	0,100	0,113	10,77	27,36	8	40
46	0,0024	0,0610	0,0000045	0,0029	0,055	0,064	0,056	0,069	6,78	17,22	4,5	42
47	0,0020	0,0508	0,0000031	0,0020	0,038	0,047	0,039	0,051	4,73	12,01	3,1	44

^a S.W.G. (Standard Wire Gauge) : norme de fil standard. ^b 1 livre/yard = 506 g/m. ^c Courant de travail pour une densité de courant de 1000 A/pouce² ou 1,5 A/mm². ^d A.W.G. (American Wire Gauge) : norme américaine du fil pour le diamètre le plus proche.

-  **Concevoir et réaliser un éclairage halogène** • La technique, les composants, leur mise en œuvre
99 FF • 150 pages illustrées • Avec schéma de télécommande infra-rouge et gradateur.
-  **Automates programmables en BASIC** avec le 8052AH et le SCALP d'Elektor
249 FF • 250 pages illustrées • format 17 x 23,5 cm • couverture cartonnée • Avec disquette
-  **Thyristors & triacs : Les semi-conducteurs à avalanche et leurs applications**
avec de nombreux tests, exercices et questions à choix multiple (avec les réponses justes) pour tester vos connaissances
283 pages • format 17 x 23,5 cm • 199 F
-  **L'art de l'Amplificateur Opérationnel : Le composant et ses principales utilisations**
avec de nombreux tests, exercices et questions à choix multiple (avec les réponses justes) pour tester vos connaissances
171 pages • format 17 x 23,5 cm • 155 F
-  **Électronique et programmation pour débutants**
Initiation aux microcontrôleurs et aux systèmes monocarte
95 FF • 150 pages illustrées • format COMPACT 12 x 23 cm
-  **J'exploite les interfaces de mon PC**
Mesurer, commander, réguler avec les ports standard de mon PC
155 FF • 155 pages illustrées • format 14 x 21 cm
-  **Je pilote l'interface parallèle de mon PC**
Commander, réguler simuler avec avec le port d'imprimante de mon micro-ordinateur
155 FF • 170 pages illustrées • format 14 x 21 cm
-  **Amplificateurs à tubes pour guitare et HiFi : Principes, dépannage et construction**
229 FF • 185 pages illustrées • format 17 x 23,5 cm • couverture cartonnée
-  **Multimédia ? Pas de Panique ! Assemblez vous-même votre PC multimédia**
Assemblage, extension et évolution
169 FF • 264 pages illustrées • format 14 x 21 cm
-  **Le manuel des GAL** • Théorie et pratique des réseaux logiques programmables
275 FF • 288 pages illustrées • couverture cartonnée • Avec disquette
-  **Environnement et pollution** • Comment mesurer ? Comment réagir ?
159 FF • 230 pages illustrées • format 14 x 21 cm
-  **Le manuel des microcontrôleurs 8032, 8051 & 80535**
229 FF • 272 pages illustrées • couverture cartonnée • Avec disquette
-  **Alarme ? Pas de Panique !** • Guide de l'installation réussie
95 FF • 88 pages illustrées • format 19 x 19 cm
-  **Logique floue & régulation PID – FUZZY, mode d'emploi**
Le point sur la régulation en logique floue et en PID
188 FF • 245 pages • couverture cartonnée • disquette 3,5 pouces incluse
-  **Le manuel du bus I²C** (prononcer «i deux c») • Schémathèque «elektor»
Théorie et pratique avec des applications d'Elektor • Schémas et fiches de caractéristiques en français
229 FF • 344 p. • couverture cartonnée • disquette gratuite incluse avec des logiciels d'une valeur de plus de 200 F
-  **Le manuel du microcontrôleur ST62** • Description et application
249 FF • 256 p. • couverture cartonnée

Volume 1 : Techniques analogiques

Ceci est la version française de l'ouvrage de référence anglais *The Art of Electronics* dans sa seconde édition entièrement revue et corrigée par les auteurs. L'édition française comporte deux volumes, consacrés l'un aux techniques analogiques et l'autre aux techniques numériques et aux circuits hautes-fréquences.

C'est un ouvrage à la fois exhaustif et facile d'accès grâce à sa conception hautement didactique. Écrit non pas pour permettre à ses auteurs d'étaler leur science, mais pour garantir au lecteur un accès de plain-pied dans tous les circuits électroniques. Comme d'autres ouvrages, il couvre bien sûr le spectre entier de l'électronique moderne, mais il le fait avec une unité de style et une cohérence dans l'approche dont le bénéfice est tout entier pour le lecteur ; le texte regorge en plus d'astuces récoltées dans la pratique de la conception et de l'enseignement. Chaque explication est assortie d'exercices pour stimuler l'assimilation active des connaissances par le lecteur. Les préalables théoriques requis, notamment en mathématiques, sont étonnamment succincts compte tenu du niveau théorique somme toute élevé auquel les auteurs finissent par accoutumer leur lecteur. Leur approche intuitive («à l'américaine») est peu conventionnelle : elle fait merveille dans cet ouvrage, idéal pour l'auto-formation mais aussi pour le soutien d'une formation scolaire et universitaire. Un dernier détail qui ne gâche rien : la traduction française respecte avec bonheur le style vivant et la manière agréable du texte original.

Volume 2 : Techniques numériques & analogiques

Le second traite des techniques numériques, depuis la logique combinatoire booléenne et la logique séquentielle jusqu'aux microprocesseurs, en passant par les convertisseurs numérique-analogique et analogique-numérique, les boucles à phase asservie et les générateurs aléatoires. Ces sujets sont abordés sous l'angle de la pratique, de ses aléas et de l'expérience qui en résulte ; les auteurs n'hésitent pas à aborder franchement la question du logiciel, fait assez rare dans les livres d'électronique. Quatre autres chapitres de ce volume sont consacrés l'un aux techniques HF et à la commutation rapide, l'autre aux circuits à très faible consommation, aussi bien analogiques que numériques, le troisième à la mise en coffret des circuits, et le dernier à la mesure et au traitement des signaux : température, luminosité, accélération, pression, vitesse, magnétisme... Les auteurs entraînent même leurs lecteurs électroniciens du côté des détecteurs de particules, de la bio-chimie et de l'astronomie. L'attention du lecteur est sans cesse relancée par des astuces récoltées dans la pratique de la conception et de l'enseignement. Chaque explication est assortie d'exercices pour stimuler l'assimilation active des connaissances. Les préalables théoriques requis sont succincts.

Paul Horowitz est professeur de physique à l'Université Harvard.

Winfried Hill, est chercheur et Directeur du Département d'Électronique du *Rowland Institute For Science*.

La BIBLIOTHÈQUE D'ÉLECTRONIQUE D'ELEKTOR est une collection de manuels didactiques sur tous les sujets de l'électronique moderne.

Amplificateurs Hi-fi haut de gamme

Une compilation des meilleurs circuits audio d'ELEKTOR complétée par des schémas inédits

Au laboratoire et à la rédaction d'Elektor, la revue internationale d'électronique pour le labo et les loisirs, officient des ingénieurs qui ont su mettre leur professionnalisme d'électroniciens au service de leur amour de la musique.

Qu'une revue d'électronique bénéficie d'un tel laboratoire, c'est déjà exceptionnel. Qu'en plus on y laisse les «*afficionados*» donner libre cours à leur passion, c'est un miracle...

Haute-fidélité, haute-passion. Passion des superlatifs, tifs coupés en quatre.

Quatre fois racine de deux π RC, bien sûr... On pourrait ainsi, de rime en rime, faire le tour de l'épineuse question de l'électronique audiophile. Fil à couper en quatre les poils des oreilles, ou fil à couper le beurre que se font sur notre dos les arnaqueurs de la Hi-Fi de supermarché ? Seulement la quatrième de couverture d'un livre est-elle bien le forum idéal pour une telle polémique ? À propos de polémique, d'aucuns prétendent que, puisqu'elle est régie par la fameuse *Deutsche Industrie Norm* DIN45500, la haute-fidélité serait une invention tentonique, que ce long fleuve, pas tranquille du tout et bien pollué, aurait pris sa source outre-Rhin. Faut-il s'en réjouir ? Ce ne serait pas la première fois, en tous cas, qu'une idée de casque à pointe finirait par trouver au Japon l'écho que l'on sait. À en croire leurs vaticinations, les érudits de la Hi-Fi semblent tous avoir répondu positivement à la question : «*les haut-parleurs ont-ils une âme ?*». Qu'ils s'empressent d'ailleurs de vendre au plus offrant.

Une chose est sûre et vérifiée : l'abus de fer à souder ne rend pas sourd. Ça tombe bien, puisque ce livre est, comme la haute-fidélité, fait non seulement pour les yeux et les mains (le fer à souder) mais surtout pour les oreilles. Il s'agit d'une œuvre collective. L'absence de nom d'auteur est une tradition au labo d'Elektor, certes pas l'absence de qualité, surtout en matière d'amplification. Depuis de nombreuses années, Elektor incite en effet ses lecteurs à prendre le taureau de la Hi-Fi par les oreilles et à ne pas se laisser bernier par les rumeurs de la mode qui ne masquent que difficilement les bruits de tiroir-caisse. Un audiophile au tempérament méridional résumait d'ailleurs la question avec éloquence : «*Si le plombier vous installait votre salle de bains comme d'aucuns vous torchent votre chaîne haute-fidélité, vous ne seriez pas aussi propre sur vous tous les jours !*»

Moralité : *on n'est jamais aussi bien serv'hi-fi que par soi-même.*

Vous trouverez dans ce livre le schéma de cinq préamplificateurs, trois amplificateurs de puissance et d'une demi-douzaine d'accessoires, avec non seulement des explications détaillées, des protocoles de mesure, des astuces et des listes de composants, mais aussi des dessins de circuits imprimés qui vous permettront de passer à l'action quand bon vous semblera.

 Amplificateurs HiFi haut de gamme : les meilleurs circuits audio d'Elektor

229 FF • 250 pages illustrées • format 17 x 23,5 cm • couverture cartonnée

Egalement disponible :

 Amplificateurs à tubes pour guitare et HiFi : Principes, dépannage et construction

229 FF • 185 pages illustrées • format 17 x 23,5 cm • couverture cartonnée

10 bonnes raisons de lire* *ELEKTOR* le magazine de l'électronicien créatif



1. ELEKTOR, le sérieux



2. ELEKTOR, la qualité



3. ELEKTOR, l'originalité



4. ELEKTOR, la clarté



5. ELEKTOR, la variété



6. ELEKTOR, la précision



7. ELEKTOR, l'information



8. ELEKTOR, le savoir-faire



9. ELEKTOR, l'imagination



10. ELEKTOR, les plus belles platines

CHAQUE MOIS CHEZ
VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX
abonnements :

ELEKTOR • 21-23 rue des Ardennes • 75019 PARIS

* ce sont aussi 10 bonnes raisons de s'abonner