

Une enceinte 2 voies époustouflante avec tweeter à ruban

Sous ce titre un peu énigmatique, je vous propose de réaliser une paire d'enceintes Hifi utilisant des composants très haut de gamme.

Compte tenu du coût de cette réalisation dans sa version la plus aboutie, je me suis efforcé à faire en sorte que, dans la mesure du possible, ses éléments puissent être utilisés indépendamment.

Le projet

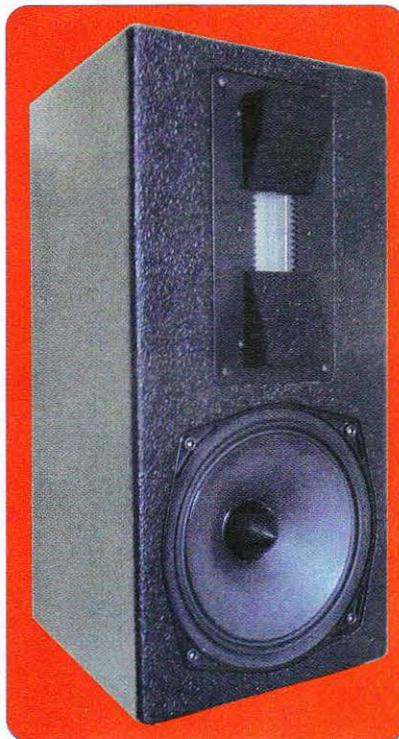
Ce projet consiste en :

- Deux enceintes médium-aigu deux voies (filtre passif ou actif);
- Deux (ou plus) caissons de grave (filtrage actif uniquement);
- Deux filtres numériques 24 bit / 96 kHz / 2 entrées - 4 sorties;
- Un contrôle de volume - balance - niveau individuel en sortie du filtre numérique avec commande à distance par radio fréquence.

Satellite médium-aigu

Jusqu'au printemps 2006 mon système d'écoute était constitué et ce depuis plusieurs années, d'un ensemble en tri-amplification active composé, d'une part, de deux caissons de grave Bass-reflex ayant fait l'objet d'une publication dans la revue Led et d'autre part, d'enceintes satellites basées sur un PHL 17 cm et un tweeter « planar » Philips RSQ8 dont la fabrication est arrêtée depuis plusieurs années.

Le son était excellent et si j'aimais beaucoup la transparence globale et la fusion que procurait l'association membrane papier traité du PHL et « planar » Philips, la directivité prononcée de ce dernier, plus particulièrement dans le mode vertical, noircissait quelque peu



le tableau en rétrécissant le « sweet spot ». Je me suis alors demandé s'il était possible de trouver un nouveau tweeter « planar » ou « ruban » ayant une réponse polaire plus acceptable.

Après plusieurs mois de recherches sur Internet et dans les forums audio, deux candidats restaient en lice : le NeoPro5i de FOUNTEK (www.fountek.net) et le 140-15D de RAAL (www.raalribbon.com).

Aucun de ces deux haut-parleurs n'étant disponible en France, j'ai dû me fier aux fichiers de mesures que les concepteurs de ces produits ont bien voulu m'envoyer pour faire un choix. J'ai fini par opter pour le 140-15D qui d'après les mesures transmises, offrait de bonnes performances tout en permettant un changement facile et rapide du ruban en cas de dégât. A l'invitation de M. Aleksandar Radisavljevic, concepteur de ce tweeter, je suis allé à Belgrade où j'ai pu non seulement récupérer la paire de haut-parleurs commandés, mais également rencon-

trer quelques-uns de ses amis hifistes enthousiastes. L'ambiance me rappela un peu celle que j'avais connue au début des années 80 à la Maison de l'Audiophile avec Gérard Chrétien, Jean Hiraga, Francis d'Albavie et Gabriel Kossmann, avec un incroyable foisonnement d'idées et d'énergie. Parallèlement M. Philippe Lesage, de PHL AUDIO (www.phlaudio.com), me faisait part des améliorations apportées à son médium de 17 cm, série SP1280, en particulier un important travail sur la suspension périphérique, l'uniformité du flux dans l'entrefer et le traitement de la membrane.

Tweeter 140-15D RAAL

Aleksandar Radisavljevic a créé la société RAAL en 2004. Cette société est située à Zajecar dans l'est de la Serbie, près de la frontière roumaine. Encore peu connue en France, RAAL exporte essentiellement ses haut-parleurs aux États-Unis.

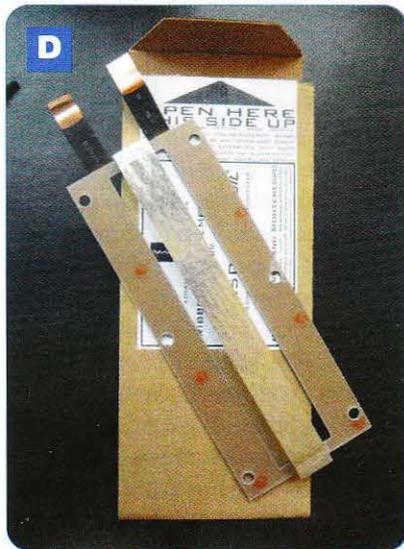
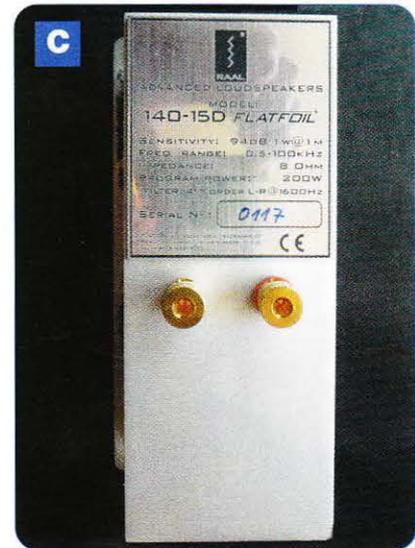
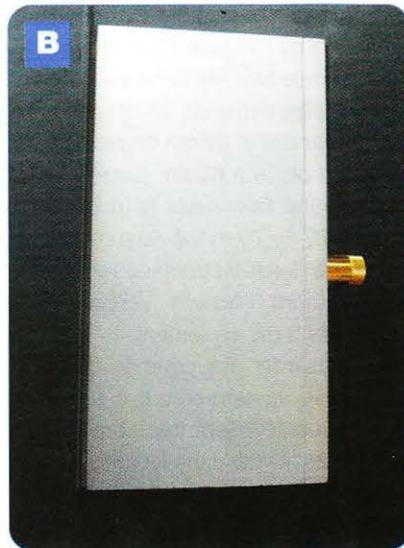
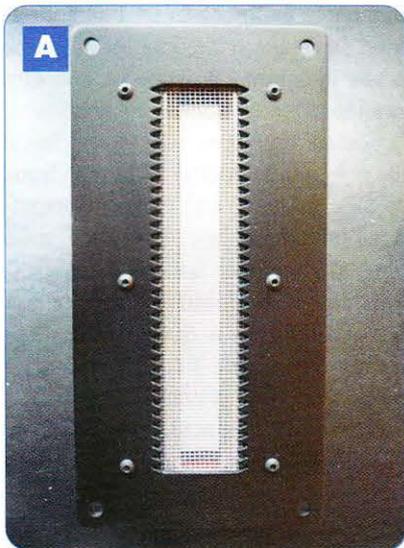
Les innovations principales mises en avant sont : un flux homogène (Equafield), un ruban non gaufré de faible épaisseur (Flatfoil) et un routage symétrique du signal (Symmlead).

Le principe de fonctionnement d'un haut-parleur à ruban est extrêmement simple : un ruban conducteur est placé dans un champ magnétique suffisamment intense et couplé à un transformateur pour que l'amplificateur « voit » une impédance correcte.

Pour un audiophile d'une certaine génération, un nom mythique vient immédiatement à l'esprit : le tweeter DECCA KELLY qui fut développé par l'ingénieur anglais Stanley Kelly dans les années 50 puis repris par la firme DECCA sous la référence DK30.

Certains en parlent encore avec des trémolos dans la voix.

Pourtant, si l'écoute peut être qualifiée le plus souvent de transparente, la fragilité, la faible tenue en puissance et la mauvaise réponse polaire γ sont



malheureusement souvent associées, décourageant de nombreux constructeurs. Ces dernières années, nous avons pu constater cependant un regain d'intérêt pour ce type de fonctionnement, du moins dans le milieu de la haute fidélité.

Présentation

Les photos de face (A), de profil (B) et de l'arrière (C) du 140-15D vous donnent un bon aperçu de ce tweeter à ruban dont la construction semble classique. Ses dimensions sont de 61 x 151 x 84 mm pour le moteur et de 90 x 180mm pour la face avant en inox (peinte en noir sur les photos).

Il pèse 2,7 kg et le ruban en sandwich d'aluminium de 4 µm d'épaisseur mesure 140 mm de longueur et 15 mm de largeur. Mis à part une très légère impression, ce ruban n'est pas gaufré,

comme on peut le voir dans d'autres produits. La connexion de ce ruban au transformateur se fait d'un seul côté, à l'extérieur du champ magnétique. A remarquer l'ouverture crantée verticalement de la face avant pour minimiser l'influence des réflexions de proximité en dissipant l'énergie dans de multiples directions. Le changement du ruban est souvent une opération délicate, mais RAAL l'a simplifié en proposant un « kit ruban » (photo D).

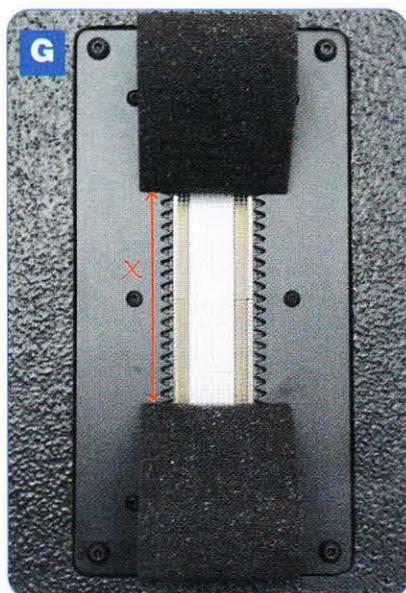
La procédure consiste à dessouder les deux languettes (photo E), à retirer six vis, la face avant et la grille de protection, l'ensemble support-ruban est alors accessible. C'est vraiment un jeu d'enfant. J'ai pu l'expérimenter à mes dépens, car remontant une face avant, une vis attirée par le champ magnétique intense m'a échappé des mains pour aller se coller sur les

aimants, en passant au travers du ruban. Donc, si vous démontez vos tweeters, rappelez-vous que ces p... de vis n'attendent que cela ! Le maître mot est prenez votre temps.

En premier lieu, mettez en place la grille de protection et la face avant, puis les vis une à une en les revissant légèrement pour qu'elles ne s'échappent pas. Serrez-les progressivement de façon à ce que l'ensemble des éléments retrouve naturellement sa place. Cet épisode malheureux, survenu en fin de mise au point de l'enceinte, aura au moins permis de vérifier, mesures à l'appui, qu'un changement de ruban n'en modifiait pas les caractéristiques. Passons maintenant à ce qui fait la particularité unique, à ma connaissance, de ce tweeter.

Il s'agit de la présence de deux blocs de mousse, de forme très particulière, qui tiennent par magnétisme de part et d'autre du ruban. Ils sont indispensables à son bon fonctionnement et nous verrons leur utilité dans le paragraphe dédié aux mesures.

Depuis le lancement de ce tweeter, la densité de la mousse et la forme de ces blocs ont changé. Les premiers



exemplaires de 140-15D étaient livrés avec les « pads » A (photo F).

A cause d'un taux de rejet important dû à d'importantes variations de structure alvéolaire entre les différents lots, Alexander a développé les nouveaux « pads » B représentatifs de la production actuelle. Cette structure de mousse, beaucoup plus homogène, a permis de réduire le taux de déchet mais a imposé un changement de forme.

Mesures préliminaires

J'ai utilisé PRAXIS, développé par Mr Bill Waslo de Liberty Instruments Inc. (www.libinst.com).

Ce système de mesures, couplé selon les circonstances à une carte « son » Digigram VX Pocket ou RME Fireface 400, a remplacé mon système MLSSA qui révolutionna le monde de la mesure acoustique au milieu des années 80. Il m'a permis de développer de nombreuses enceintes dont certaines ont été décrites dans la revue Led (JCG1, EURIDIA...).

Évidemment, ce genre de système est onéreux, mais je vous proposerai ultérieurement quelques pistes bien meilleur marché qui vous permettront de faire vos propres mesures et tirer ainsi le maximum de votre système d'écoute, en particulier dans le grave, avec votre filtre numérique.

Le micro de mesure utilisé est un ACO Pacific (www.acopacific.com) 7012, 1/2 pouce, ayant une courbe de réponse plate jusqu'à 40 kHz, associé à un pré-amplificateur 4012.

Examinons tout d'abord l'influence de ces blocs de mousse. Pour la mesurer, j'ai monté le tweeter dans une enceinte parallépipédique de 26 cm de large, 43 cm de haut et 39 cm de profondeur. Le micro placé à 60 cm dans l'axe du tweeter, j'ai fait varier la distance X (photo G) de 70 mm à 40 mm.

La figure 1 est instructive, remarquez tout d'abord l'échelle verticale très dilatée de 2 dB seulement.

Pour présenter des courbes plus flatteuses, les constructeurs d'enceintes acoustiques utilisent très souvent une échelle de 10 dB dans leur littérature. La courbe noire représente la réponse du tweeter sans « pads ». En dehors d'une petite résonance bien amortie de 2 dB aux environs de 13 kHz, nous constatons une remontée de 7 dB à partir de 2,5 kHz assez classique pour un haut-parleur à ruban. Le creux à 2,2 kHz est dû à la diffraction et non au haut-parleur lui-même, comme nous le verrons ultérieurement. Ces « pads » permettent de modeler très efficacement la courbe de réponse. De 3 à 7 kHz, nous observons un plateau où la distance n'influe presque pas sur la réponse. A 10 kHz, une variation de 10 mm correspond à une atténuation de 1 à 1,5 dB. Une distance de 50 à 60 mm paraît être le bon compromis, au moins dans l'axe du tweeter, la courbe de réponse tient alors dans un canal de 2 dB. Il restera à valider cet excellent résultat en vérifiant la réponse polaire dans l'enceinte définitive. Comme une simple variation de distance entre les « pads » fait varier le niveau au-delà de 8 - 10 kHz, il sera très facile d'ajuster l'extrême aigu en fonction de l'absorption de la pièce et de l'âge de l'oreille de celui qui écoute ! La différence d'efficacité entre les anciens et les nouveaux « pads » est visible en figure 2. Si le nouveau paraît légèrement plus absorbant à distance égale (2 dB / 15 kHz à 50 mm), la similitude est frappante et il suffit d'augmenter la distance de 10 mm pour retrouver à quelques dixièmes de décibel près la même réponse (courbes rouge et bleue).

Les amplificateurs, conçus en général comme des générateurs de tension avec une faible impédance de sortie, supportent mal l'impédance très basse d'un tweeter à ruban. Aussi, les

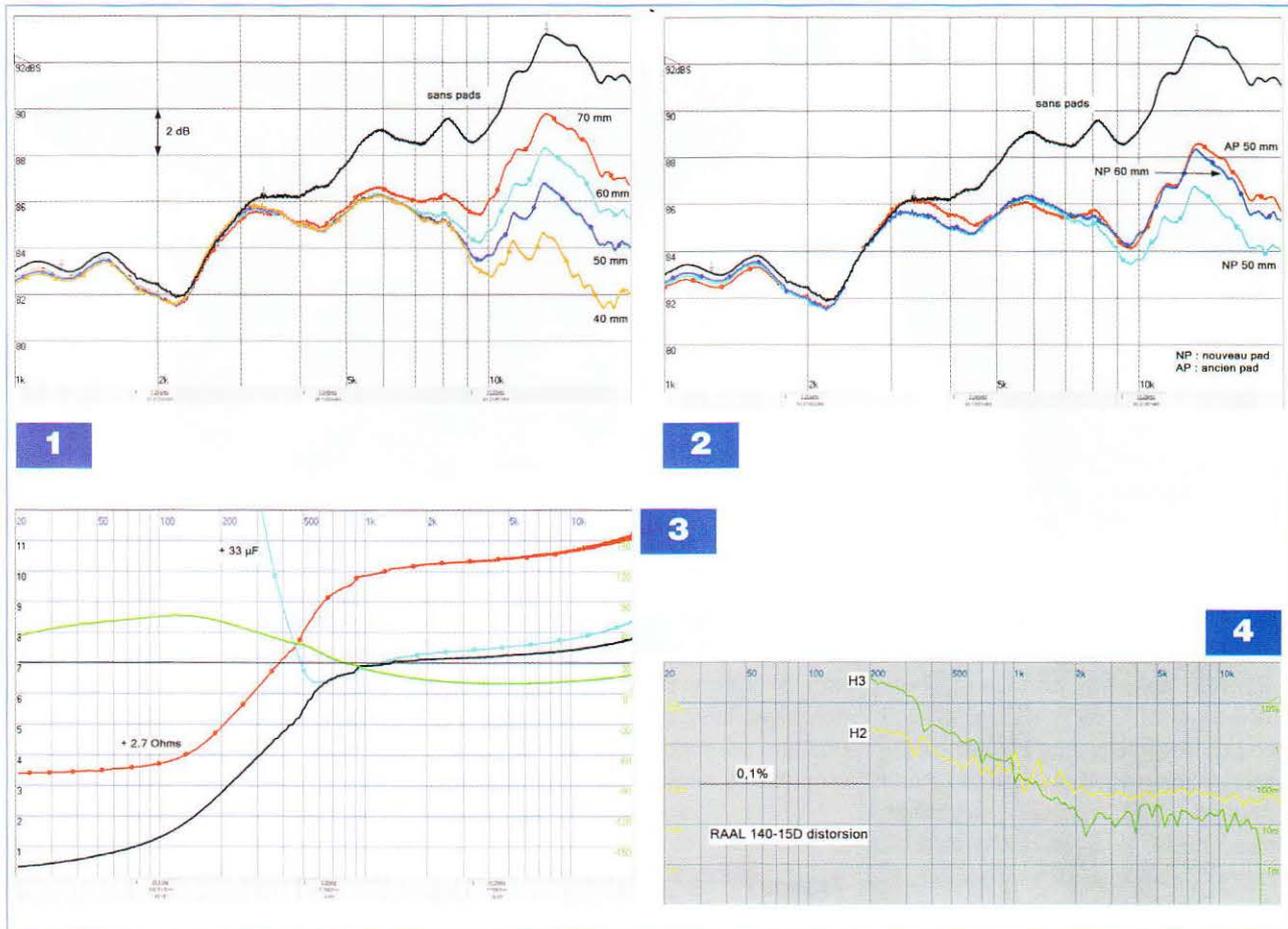
fabricants intègrent-ils un transformateur élévateur d'impédance. Celui-ci, partie intégrante du tweeter, doit être calculé pour n'apporter ni distorsion, ni couleur propre au son. L'impédance (en noire sur la courbe n° 3 de la figure 3) se présente en première approximation comme une résistance avec une inductance en parallèle. Aux environs de 7 Ω au dessus de 900 Hz, elle passe par 4 Ω à 300 Hz pour descendre à moins de 1 Ω en dessous de 80 Hz, avec une phase en rapport. En cas de filtrage actif, il faudra veiller à protéger des surcharges à la fois le tweeter et l'amplificateur.

La solution la plus simple consiste à insérer une résistance, non inductive de faible valeur en série, au détriment d'une légère diminution d'efficacité. Par exemple, avec 2,7 Ω (courbe rouge), l'amplificateur ne voit pas d'impédance inférieure à 3 Ω. Le tweeter est protégé dans les basses fréquences, puisque la majeure partie du signal sera dissipé dans la résistance. Le tribut à payer est une diminution du niveau d'environ 2,5 dB. En général, cela ne pose pas de problème. J'ai adopté cette solution pour le filtrage actif, car il n'y a pas d'altération en fréquence et phase. Dans le cas où cette chute de niveau n'est pas acceptable (amplificateur de très faible puissance de sortie par exemple), une alternative est d'insérer un condensateur en série à la place de la résistance. Il n'y a plus de perte de niveau dans la bande utile, mais nous avons introduit un filtre passe-haut dont il faudra tenir compte pour le filtrage.

Le meilleur compromis est une valeur de 33 μF, la courbe de couleur cyan (figure 3) montre clairement l'apport de la capacité à partir de 550 Hz.

L'impédance ne descend plus en dessous de 6,5 Ω, l'amplificateur et le tweeter sont protégés, mais nous avons introduit une contrainte supplémentaire pour le filtrage actif. Dans le cas du filtrage passif, le problème se résoudra de lui-même puisqu'il nous faudra au moins un condensateur pour créer un filtre passe-haut.

Le taux de distorsion (figure 4) est très bas, avec moins de 0,1 % pour l'harmonique 2 qui prédomine globalement jusqu'à 1 kHz. La courbe de l'har-



nique 3 montre que la distorsion, basse et constante jusqu'à 2 kHz, augmente régulièrement à partir de cette valeur, pour dépasser celle de l'harmonique 2 à partir de 1 kHz. Du point de vue de la distorsion, il paraît souhaitable de placer la fréquence de coupure dans la zone 1,5 - 2 kHz.

Médium SP1280 PHL Audio

Les tweeters RAAL entre mes mains, je n'ai pas résisté longtemps avant de les essayer en remplacement des RSQ8 dans mes enceintes du moment.

Une petite plaque de contreplaqué pour adapter les nouveaux tweeters, quelques mesures pour programmer mon filtre numérique et la première écoute fut un choc !

Je n'avais pas fait de choix définitif concernant le médium, mais après les premiers essais, le SP1280 PHL se mariant parfaitement avec le RAAL, je commandais une nouvelle paire de SP1280 pour bénéficier des dernières améliorations. Quelques mots sur PHL AUDIO. Philippe Lesage, qui était chef du laboratoire de recherche d'AUDAX,

a créé cette entreprise en 1990. L'objectif principal était de proposer aux professionnels de la sonorisation une meilleure alternative aux fabrications de l'époque. Le pari fut réussi, puisqu'après une restructuration en 2004, PHL est devenu un des leaders dans ce milieu.

Notez que la sonorisation professionnelle et la haute fidélité « domestique » sont en général deux mondes très différents, car les contraintes ne sont pas les mêmes. En hifi, le design, les matériaux exotiques, les prix quelquefois délirants, les innovations purement marketing font souvent la loi.

Il faut bien trouver des arguments pour se distinguer. En sonorisation professionnelle, la tenue en puissance, la stabilité dans le temps, la résistance aux conditions climatiques et surtout la fiabilité sont des contraintes incontournables. Une nouvelle technologie n'est, en général, adoptée que si elle apporte une vraie plus-value.

Les innovations, quand il y en a, se voient rarement, mais se cachent dans les moteurs, les supports, les traite-

ments de membranes et les collages. PHL a commencé par développer une série de haut-parleurs innovants de 17 cm qui assura rapidement sa notoriété, avant d'enrichir sa gamme qui s'étend maintenant jusqu'au 46 cm.

Présentation

Les photos H et I donnent une bonne idée de ce haut-parleur de 17 cm.

Le saladier, avec un encombrement maximum de 187 mm, est moulé dans un alliage hautement ductile. Sa forme est étudiée pour obtenir un maximum de rigidité, tout en servant également de dissipateur de chaleur (système intercooler). La bobine mobile de 38 mm de diamètre est en fil d'aluminium, de section rectangulaire et plaqué de cuivre. Le support est en Kapton-fibre de verre.

La membrane, de profil exponentiel est composée de pulpe de cellulose, imprégnée à cœur et traitée sur ses deux faces par des vernis, apportant amortissement et résistance climatique de niveau tropical.

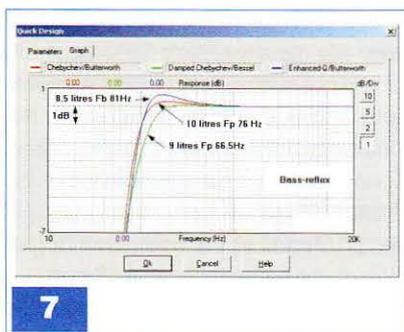
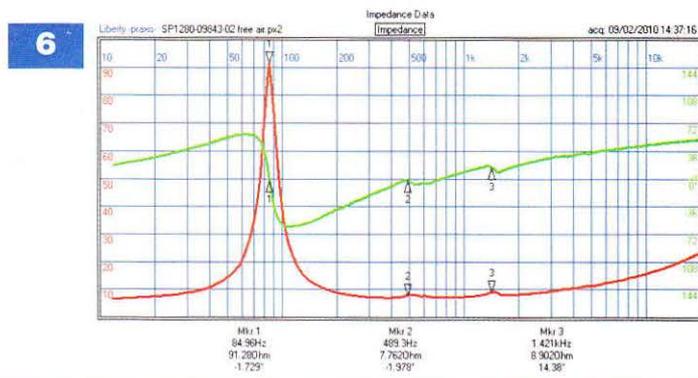
La plage opérationnelle de fonction-



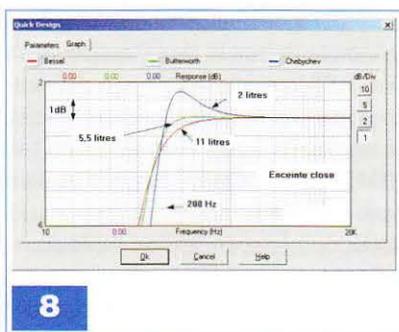
PHL B171-B SP1280 N°0984301		PHL B171-B SP1280 N°0984302		
PRAXI	LEAP	PRAXI	LEAP	
S	S	S	S	
Qts	0.434	0.4345	0.430	0.4347
Qes	0.467	0.4726	0.463	0.4714
Qms	6.154	5.393	5.978	5.596
Fs	81.830	81.001	83.865	83.30
Re	6.1	6.1	6.1	6.1
Le	204.1u	-	213.8u	-
Lp	284.6u	-	335.3u	-
Rp	2.389	-	2.522	-
Sd	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
% var Fs	36.1	36.1	36	36
Vas	11.01	10.5922	10.10	9.9486
Mms	9.885	10.258	10.25	10.717
Cms	382.6u	376.35u	351.0u	340.6u
BL	8.152	8.2087	8.437	8.520
N ²	1.243	1.1851	1.236	1.1696
SPL ₀	92.94	92.7556	92.92	92.6987
M. add	15	15	15	15
				gr

LEAP 5 utilise d'autres paramètres (Km, Em, Km, Exm) pour modéliser les variations d'impédances.

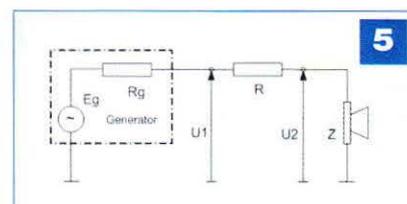
Tableau I



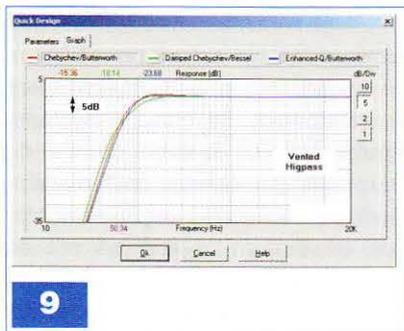
7



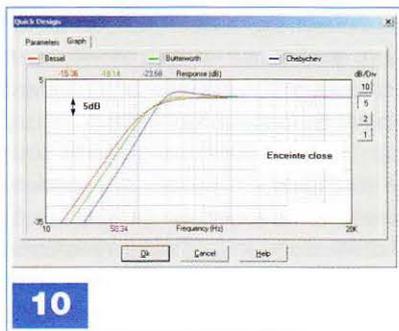
8



5



9



10

Mesures préliminaires

J'ai mesuré les principaux paramètres de Thiele / Small en utilisant la méthode de la masse additionnelle.

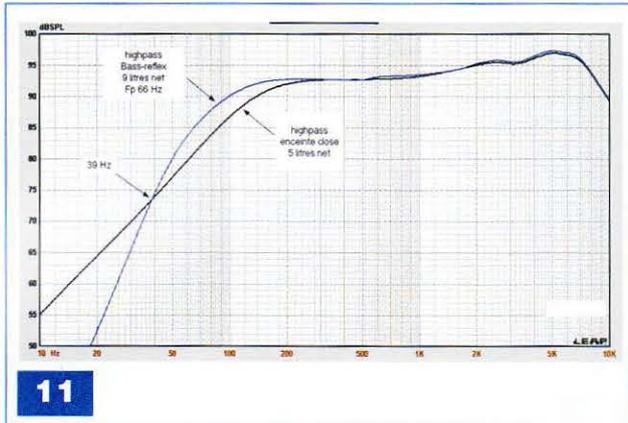
Pour ces mesures et conformément à la norme CEI 60208-1, j'ai effectué un pré-conditionnement d'une heure, suivi d'un repos d'une heure.

J'ai utilisé une résistance de 11 Ω et une tension en sortie d'amplificateur me donnant un courant de 10 mA à 200 Hz (figure 5).

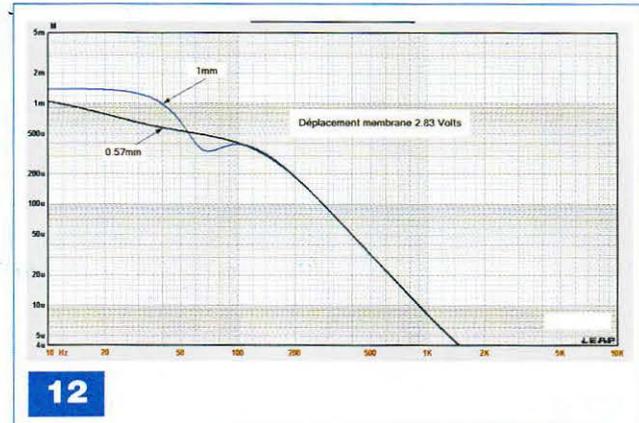
Le **tableau I** vous présente ces paramètres calculés directement avec PRAXIS, mais également avec l'outil « Transducer Model Derivation » de LEAP 5 (LinearX, www.linearx.com) en important les deux courbes d'impédances mesurées avec PRAXIS. Les deux logiciels, utilisant deux

nement est garantie de -10 °C à +50 °C. Le circuit magnétique, comportant un aimant en ferrite de 12 cm de diamètre, a été optimisé pour symétriser le champ. Il est équipé

d'une bague de stabilisation de flux et d'inductance. L'ogive centrale, en aluminium anodisé, assure la régularité de la charge acoustique dans la partie supérieure du spectre de fréquences.



11



12

méthodes différentes d'extraction, donnent des paramètres T/S très proches. On peut raisonnablement penser que ces paramètres sont valides. En effet, il ne faut jamais oublier que nous travaillons avec des signaux très faibles et de nombreuses erreurs peuvent entacher les résultats. Il est prudent de recommencer les mesures à plusieurs reprises pour vérifier la pertinence des résultats.

Le SP1280, avec une fréquence de résonance de 82 - 84 Hz et une efficacité de 92 - 93 dB, est bien un haut-parleur spécialisé dans le médium. On note deux légers accidents (500 Hz et 1400 Hz) dans la courbe d'impédance du haut-parleur à l'air libre (figure 6). Il est probable que celui à 1400 Hz soit dû à un changement de mode de fonctionnement de la membrane, mais je n'ai pas d'explication pour celui à 500 Hz.

Utilisation des paramètres T/S

L'utilitaire « Quick Design » de LEAP 5 permet de se faire rapidement une première idée de la réponse que l'on peut obtenir pour trois types d'alignements différents.

En « Bass reflex », les trois alignements sont atteints pour un volume variant seulement entre 8,5 et 10 litres, pour une fréquence de coupure à -3 dB de 85 à 95 Hz (figure 7).

En charge « close », le volume optimal semble se situer vers 5 - 6 litres. Pour un amortissement de Butterworth, la fréquence de coupure se trouve alors à 140 Hz (figure 8). Que choisir ? A première vue, un accord « Bass reflex » tel que celui présenté en vert à la figure 7 semble préférable.

Examinons maintenant les mêmes

courbes, mais avec une échelle verticale de 5 dB (figures 9 et 10)

On remarque qu'en dessous de 100 Hz, la pente de la bande atténuée est deux fois plus faible pour l'enceinte close que pour le « Bass reflex ». En résumé, on a le choix entre une coupure plus haute (environ 140 Hz), mais une atténuation qui atteint asymptotiquement 12 dB / octave ou une coupure plus basse (environ 90 Hz), mais avec une pente double.

Simulations dans le grave

En utilisant cette fois les paramètres T/S étendus de LEAP, j'ai simulé à 1 W (figures 11 et 12) la réponse et l'excursion du SP1280 dans une enceinte « close » d'un volume net de 5 litres, remplie à 100 % de laine de verre de densité 20 kg/m³ (courbe noire) et dans une enceinte « Bass-reflex » de volume net de 9 litres remplie à 50 % de laine de verre de même densité avec une fréquence d'accord de 66 Hz (courbe bleue).

Du point de vue de la pression sonore, l'enceinte « Bass reflex » prend l'avantage jusqu'à 39 Hz, mais procure 12 dB de niveau en moins à 20 Hz. Pour l'excursion, à 100 Hz, l'enceinte « Bass reflex » offre un gain de 3 dB, à déplacement équivalent de la membrane, puis conserve son avantage grâce au rayonnement de l'évent entre 56 et 100 Hz. Par contre, à 40 Hz et au niveau équivalent de 74 dB, la membrane se déplace de 1 mm contre 0,57 mm pour l'enceinte « close ». Voyons maintenant ce qui se passe en appliquant une puissance croissante.

Commençons par le « Bass-reflex » : Les figures 13 et 14 montrent la réponse en fréquences et le déplace-

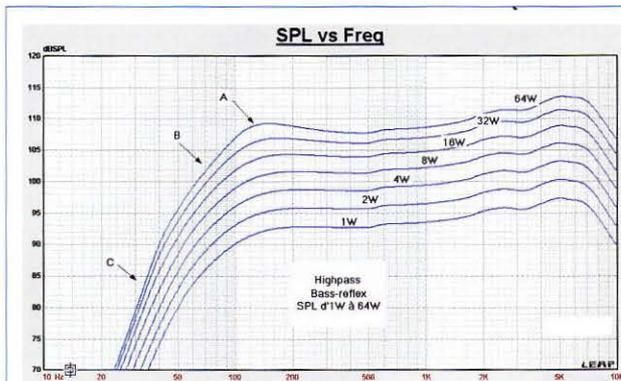
ment de la membrane, en augmentant la puissance par paliers de 3 dB. Le SP1280 autorise un déplacement linéaire de $\pm 3,5$ mm (± 8 mm avant dommage). À l'aide du repère placé à 3 mm (pour se garder une petite marge d'erreur) à la figure 14, nous constatons que cette limite est atteinte à 59 Hz pour 64 W et 39 Hz pour 8 W.

Nous notons également une augmentation brutale du déplacement nécessaire, en dessous de la fréquence d'accord de l'évent. C'est une caractéristique du « Bass reflex », l'évent ne rayonne plus et le haut-parleur n'est plus contrôlé par le volume d'air arrière. La figure 13 montre l'augmentation conforme du niveau de 3 dB chaque fois que la puissance double, jusqu'à environ 32 W, puis l'échauffement de l'équipage mobile et du moteur modifie les caractéristiques du haut-parleur comme nous pouvons le voir sur la courbe à 64 W.

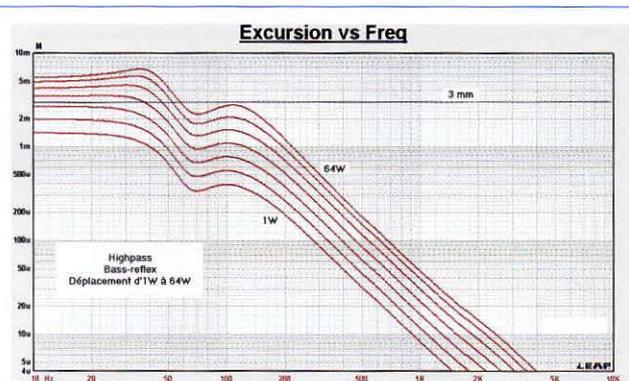
En « A », du fait de ces modifications, il apparaît une légère surtension ; en « B », l'écoulement de l'air dans l'évent devient trop turbulent et il se produit une compression (pour cette simulation j'ai utilisé un diamètre d'évent de 63 mm compatible avec les dimensions de cette enceinte d'une dizaine de litres seulement) ; en « C », les limites de déplacements linéaires sont largement dépassées.

Ces simulations montrent que, dans le cas de l'utilisation en « Bass reflex », il faudra impérativement filtrer électriquement l'enceinte à 60 Hz ou au-dessus pour rester dans le domaine linéaire du haut-parleur.

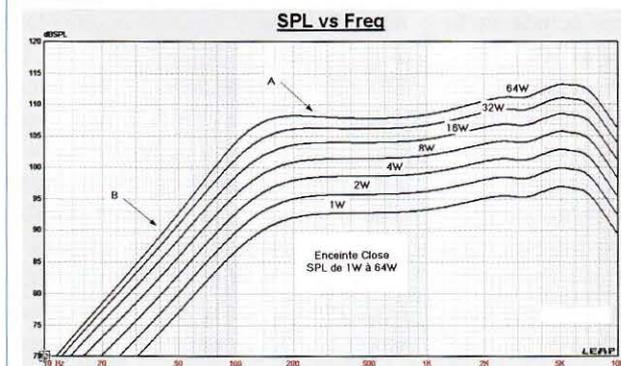
Il sera alors possible d'atteindre des niveaux très confortables de l'ordre de 110 dB au-dessus de 150 Hz.



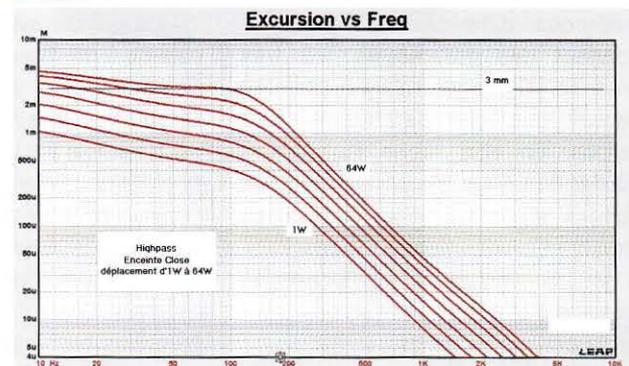
13



14



15



16

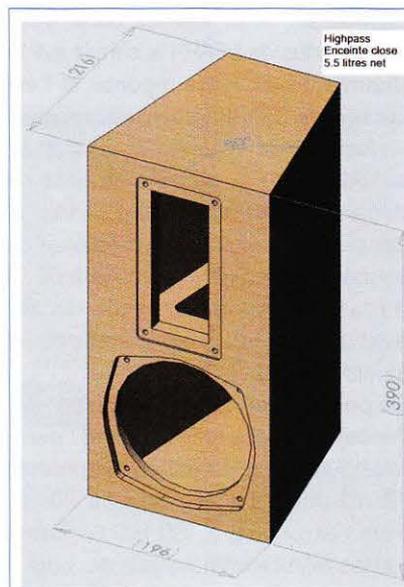
Passons à l'enceinte close.

A 64 W, le déplacement atteint 3 mm dès 100 Hz, mais reste à cette valeur jusqu'à près de 50 Hz, avant d'augmenter lentement pour atteindre 4 mm à 20 Hz (**figure 15**).

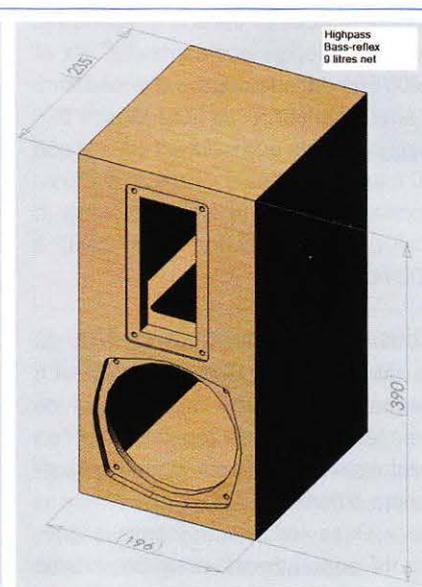
A 32 W, nous restons dans le domaine linéaire jusqu'à 30 Hz. Pour la réponse en fréquence, nous remarquons également la modification des caractéristiques du haut-parleur à 64 W, mais avec une moindre influence (point « A » **figure 16**) que dans le cas du « Bass reflex ». En « B », nous avons bien dépassé la limite du déplacement linéaire du cône, mais là encore la déformation est moins prononcée que dans le cas précédent. Nous remarquons l'intérêt du baffle clos, le volume d'air arrière chargeant la membrane du haut-parleur au fur et à mesure de la montée en puissance. Un filtre électrique à 50 Hz ou au-dessus permettra de rester confortablement dans le domaine linéaire.

Le coffret

Le choix de la forme d'un coffret, de son volume et du type de charge résultera toujours d'un compromis.



17



18

Dans ce cas précis, les mesures préliminaires effectuées dans une enceinte d'une dizaine de litres ont montré que le tweeter, avec sa réponse polaire très étendue, est très sensible à son environnement proche. Cela implique qu'il faudra encaster sa face avant pour minimiser les diffractions proches et étudier la forme

du coffret pour exploiter au mieux l'exceptionnelle réponse en énergie. Le médium a une bonne réponse polaire jusqu'à 2 kHz (ce qui est logique avec une membrane exponentielle de 135 mm de diamètre), mais pour garder une bonne homogénéité dans l'espace avec le tweeter, il faudra réduire la surface de la face



J



K



L

avant au strict minimum. N'oublions pas non plus l'aspect esthétique, car ce que les anglos saxons appellent le WAF (Wife Acceptance Factor) est souvent... incontournable.

En utilisant du contreplaqué de bouleau de Finlande de 18 mm ou du médium de 19 mm et compte-tenu de l'encombrement des haut-parleurs et de la présence d'un renfort horizontal, les dimensions de la face avant ne pourront pas être inférieures à 19 cm x 39 cm. Pour réduire l'influence du coffret sur la réponse polaire et diminuer les réflexions internes tout en ne compliquant pas trop la réalisation, j'ai choisi une forme trapézoïdale pour la version « close ».

Pour la version « Bass reflex », je suggère de conserver la forme rectangulaire qui permet de limiter l'augmentation de la profondeur à 19 mm.

Les **figures 17 et 18** présentent deux versions possibles de cette enceinte. Les dimensions des faces « avant » sont de 196 mm x 390 mm.

La profondeur est de 216 mm pour l'enceinte « close » et de 235 mm pour la version « Bass reflex », l'évent étant à l'arrière. Le volume net de ces enceintes est de 5,5 litres ou de 9 litres, déduction faite du volume occupé par les haut-parleurs, renfort, éventuel filtre passif et évent.

Quel type de charge choisir ?

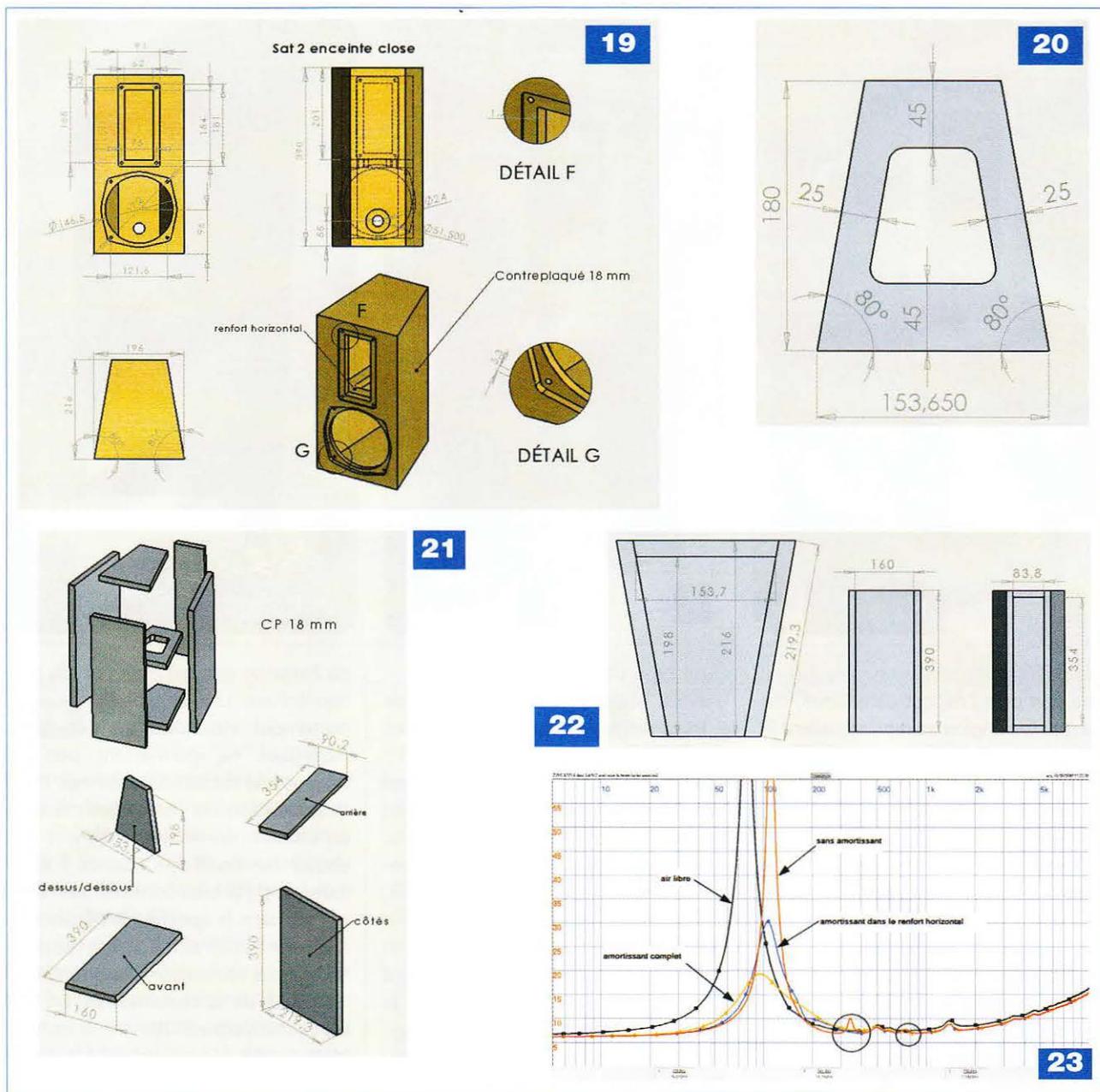
J'avais utilisé un accord de type « Bass-reflex » pour mes enceintes satellites précédentes (SP1280 1^{ère} version + RSQ8), pensant qu'il était judicieux de favoriser la réponse en fréquence dans la bande 70 - 150 Hz. Après plusieurs mois d'écoutes intensives, j'ai fini par boucher l'évent, ajouté quelques briques pour diminuer le volume et modifié le filtrage en conséquence. Bien qu'objectivement il devrait être possible d'obtenir le même résultat sonore avec un filtrage adapté, j'ai préféré l'écoute du SP1280 dans une enceinte « close ». Une explication possible est que la pente du 2^{ème} ordre (figure 11) de l'enceinte « close » facilite le raccordement au caisson de grave dans un milieu semi-réverbérant.

Du concret

J'ai opté pour la réalisation d'une enceinte « close ». Les **photos J, K et L** montrent une paire de ces enceintes en contreplaqué de bouleau de Finlande de 18 mm. Elles ont été fabriquées par un atelier de menuiserie spécialisé dans les enceintes professionnelles.

Dans le milieu de la haute fidélité, la plupart des fabricants utilisent le médium alors que le CP de Bouleau

de Finlande est privilégié par les professionnels. Les études sur le comportement vibratoire de ces deux matériaux ne permettent pas de dégager un consensus très net. Il y a quelques années, j'ai fait des mesures en utilisant un accéléromètre et des séquences de bruit « pseudo » aléatoires et si j'ai bien constaté des différences dans le spectre de fréquences sans corrélation directe avec l'écoute, j'ai surtout remarqué l'importance de la qualité de la construction. En fait, les professionnels utilisent le contreplaqué pour réduire le poids (un bon tiers à épaisseur équivalente) et le bouleau de Finlande en particulier pour son homogénéité et sa résistance aux chocs. Dans le cas de cette enceinte, avec sa forme trapézoïdale, sa petite taille et la présence d'un renfort horizontal bien visible sur la **photo L**, la nature du matériau est secondaire. Elle peut être construite en médium de 19 mm à défaut de CP de Bouleau de Finlande. L'ouverture à l'arrière (**photo K**) est réservée à la fiche Speakon que j'ai utilisée pour les connexions. Les angles ont été arrondis pour des raisons esthétiques et non pas pour diminuer la diffraction de bord comme on peut le lire très régulièrement dans des revues spécialisées. En effet, en mettant en rela-



tion la longueur d'onde et le rayon de courbure, il faudrait des arrondis de plusieurs centimètres de rayon pour qu'ils soient efficaces et donc se rapprocher de formes ovoïdes plus complexes à réaliser. J'ai fait le choix de ne pas aligner physiquement les centres acoustiques, car cela aurait créé une discontinuité dans la face avant, néfaste compte tenu de l'énergie rayonnée par le tweeter.

L'encastrement des haut-parleurs est par contre incontournable.

Plans

La **figure 19** vous présente les cotes les plus significatives vous permettant

de réaliser l'enceinte close avec du CP d'épaisseur de 18 mm ou médium de 19 mm. Je n'ai pas coté le lamage du SP1280, sa forme est très particulière et il est préférable de réaliser un gabarit pour la défonceuse en utilisant le saladier du haut-parleur lui-même.

Le renfort horizontal (**figure 20**) découpé dans une plaque est placé entre le tweeter et le médium en respectant la cote de 201 mm entre la face supérieure extérieure de l'enceinte et la face supérieure du renfort (voir figure 19). Le respect de cette cote est important car il y a peu de marge pour les inserts des vis de fixation, si vous en utilisez. Dans ce cas, il sera peut-

être nécessaire de placer les deux inserts inférieurs du tweeter avant de positionner le renfort. Attention, les cotes indiquées pour le renfort sont valables pour des parois de 18 mm. Si vous utilisez du médium de 19, pensez à les corriger. La profondeur du lamage est de 1,2 mm pour le tweeter (détail F) et 5,3 mm pour le SP1280 (détail G). Je vous propose aux **figures 21 et 22** deux plans de l'enceinte qui devraient vous aider à la construire. Ne pas oublier que certains chants doivent être coupés à 80° pour s'emboîter et que certaines cotes doivent être modifiées si l'épaisseur est de 19 mm, le bon sens vous guidera.

Faites les lamages en face avant puis collez le dessus, le dessous et le renfort horizontal, puis l'arrière et terminez par les flancs. Arrondissez les arêtes extérieures.

Montage

Depuis de nombreuses années, j'utilise des fiches Speakon, 4 contacts, rondes, à la place des traditionnelles fiches bananes. Elles sont très fiables, pratiques, offrent une résistance de contact minimale, sont protégées et relativement économiques.

La **photo M** montre une de ces embases. Que se soit en passif, ou en actif, je vous recommande d'utiliser un câble 4 conducteurs pour raccorder cette enceinte. Dans le cas du filtre passif à l'intérieur de l'enceinte, connectez dans l'enceinte les plots 1+ et 1- au filtre passe-bas, 2+ et 2- au filtre passe-haut. Côté amplificateur, 1+ et 2+ seront connectés ensemble ainsi que 1- avec 2-.

En filtrage actif, 1+ et 1- seront reliés aux bornes du SP1280, 2+ et 2- à celles du 140-15D.

L'amortissement interne d'une enceinte acoustique est toujours très important et sujet à de nombreuses interrogations. Que faut-il utiliser comme matériau (**photos N, O**) ? Laine de verre, molleton, laine naturelle, mousse, feutre... Quelle quantité ? Quelle densité ? Ce n'est pas une science exacte, mais nous pouvons dégager quelques principes généraux :

la vitesse des ondes arrière est maximale à mi-distance et nulle au niveau des parois. Dans le cas d'une enceinte Bass-reflex, il ne faut pas trop gêner l'écoulement de l'air pour un fonctionnement correct de l'évent. Il faut donc trouver un compromis

L'amortissement augmente le volume interne apparent du coffret en fonction de la densité du matériau utilisé

Pour illustrer la nécessité d'un amortissement, j'ai relevé la courbe d'impédance (en rouge) du SP1280 monté dans l'enceinte close avec juste du feutre sur les parois (**figure 23**). Nous remarquons deux anomalies supplémentaires dans la courbe d'impédance, à 340 Hz principalement et dans une moindre mesure à 750 Hz, par rapport à celle relevée à l'air libre (en

noir). Il pourrait s'agir d'une réflexion de l'onde arrière dans le coffret. Avec une célérité de 344 m/s, la demi-longueur d'onde à cette fréquence est de 50 cm.

La plus grande distance à l'intérieur du coffret est de 41,5 cm (diagonale).

La différence de 8,5 cm s'explique par la position du haut-parleur et le renfort horizontal qui augmentent la hauteur apparente.

En plaçant juste un petit morceau d'amortissant (en blanc sur la photo O) dans le renfort horizontal, et sans aucun autre des matériaux visibles sur les photos, on efface complètement les anomalies d'impédance (courbe bleue). Comme il n'y a pas d'autre amortissant, la fréquence de résonance ne change pratiquement pas.

Il est à noter que le feutre placé sur les parois ne permet pas d'amortir les résonances internes, mais diminue la transmission des micro-vibrations aux parois du coffret.

La courbe orange est celle de l'impédance de l'enceinte avec son amortissement complet comme le montrent les photos N et O.

Nous remarquons que la fréquence de résonance, considérablement amortie, est abaissée par l'augmentation du volume apparent.

Dans le compartiment supérieur, j'ai placé une épaisseur de laine de verre de densité 20 à 30 kg/m³ au centre, à l'endroit où la vitesse est maximale, entourée par du molleton peu dense pour la maintenir en place.

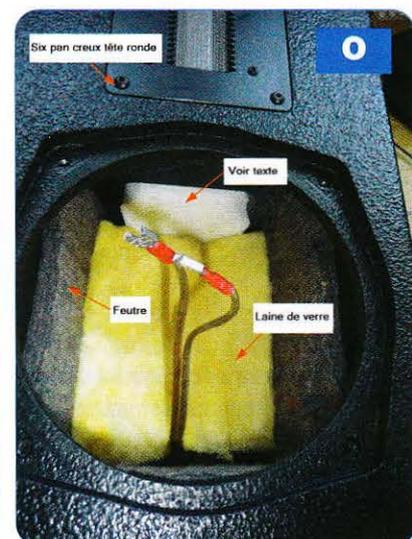
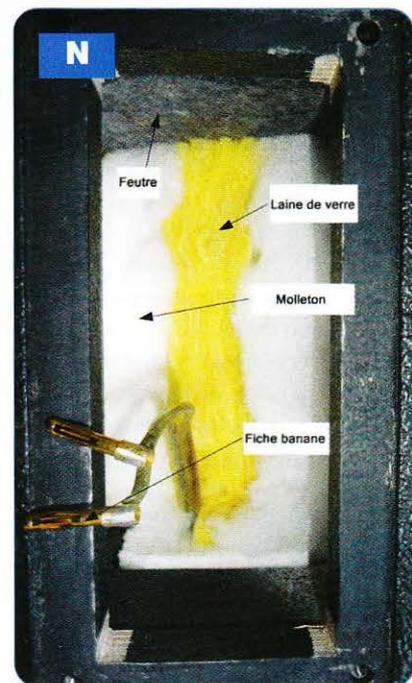
Des fiches bananes mâles, coupées et soudées sont utilisées pour connecter le 140-15D.

Le compartiment inférieur a été garni d'une épaisseur de laine de verre, l'arrière du haut-parleur se chargeant de la maintenir en place.

J'ai serti des cosses de 6,3 mm pour les connexions au SP1280.

A ce propos, il est à noter qu'un bon sertissage avec des cosses de qualité vaut une soudure avec en outre une tenue aux vibrations améliorée.

Tous ces matériaux d'amortissement sont susceptibles de changer au fil du temps et il est vivement recommandé de procéder à ses propres expérimentations en respectant bien évidemment les principes fondamentaux.



Mesures

Les enceintes terminées, il est temps de passer aux mesures ! Mais auparavant, j'aimerais aborder le problème de l'espace sonore. Toutes les simulations présentées plus haut sont valables pour un espace 2π , c'est-à-dire comme si l'enceinte était encastree dans un mur infini et parfaitement réverbérant. Dans une chambre sourde, supposée parfaitement anéchoïque, le grave va se propager dans un espace de 360° (4π), car sa longueur d'onde est beaucoup plus grande ($3,44\text{ m}$ à 100 Hz) que la face avant. Au fur et à mesure de la montée en fréquence, la longueur d'onde diminue jusqu'à ce que les dimensions de la face avant soient suffisantes pour que l'espace de rayonnement se rétrécisse à 180° (2π) avec un gain théorique de 6 dB . Il est facile de comprendre que, d'une part, cette transition ne se passe pas toujours très bien et que, d'autre part, il faille en tenir compte dans les filtres. C'est ce qui est appelé parfois la diffraction de baffle.

LEAP 5 propose non seulement une analyse de cette diffraction, en fonction de la forme et des dimensions de l'enceinte, mais aussi une approximation de celle de bords en fonction de la position du haut-parleur sur la face avant. Il ne s'agit que d'approximations, mais elles restent utiles pour appréhender ce type de problèmes.

La **figure 24** reprend la simulation de l'enceinte close de la figure 11, mais cette fois en milieu anéchoïque.

Et cela change tout. A 200 Hz , on retrouve les -6 dB dus au rayonnement dans 4π . La courbe rejoint celle en 2π à 500 Hz . Le dépassement entre 500 et 1900 Hz est la conséquence de la diffraction de bords compte tenu des dimensions de la face avant et de la position du haut-parleur. Bien entendu ce ne sont que des simulations basées sur des modèles approchés.

LEAP n'utilise pas les éléments finis pour ces calculs, mais des algorithmes simplifiés. Ils ont néanmoins le mérite d'exister. Ajoutons également qu'une enceinte ne s'écoute pas non plus dans une chambre sourde, mais dans un milieu semi-réverbérant, variable de surcroît. On pointe là toute la difficulté

de la mise au point d'un filtre. Les **photos P et Q** montrent l'enceinte positionnée pour les mesures de directivités horizontale et verticale dans la chambre sourde. Le micro est placé à $1,38\text{ m}$ de la face avant exactement au milieu (entre les deux haut-parleurs). Le panneau AES (à droite sur les photos) est mis dans une position le rendant pratiquement transparent aux mesures. La boîte à l'arrière gauche, recommandée par la dernière norme AES en remplacement du panneau traditionnel, n'interfère que modérément sur les mesures.

Toutes les mesures ont été faites avec une précision de 24 bits et à une fréquence d'échantillonnage de 96 k/s , le micro ayant une bande passante utile de 40 kHz .

SP1280

La **figure 25** montre les courbes de réponse sans aucun lissage, par pas de 10° , de 0° à 50° gauche. Pour davantage de clarté, l'échelle horizontale a été limitée de 200 Hz à 10 kHz , l'échelle verticale est de 5 dB .

La réponse en dessous de 200 Hz est conforme aux simulations et sera analysée ultérieurement dans le chapitre consacré aux corrections actives. Celle au-dessus de 10 kHz n'a pas vraiment d'intérêt sachant que ce haut-parleur va être filtré entre 1 et 2 kHz .

Analysons d'abord la courbe de réponse dans l'axe. On retrouve en « A » la petite anomalie déjà remarquée sur la courbe d'impédance à l'air libre (figure 5). Je n'ai pas trouvé d'explication et je n'en ai pas obtenu non plus de la part du fabricant. Il faut noter cependant qu'elle est sans véritable conséquence audible, à mon point de vue, du fait de sa faible amplitude.

De même, la seconde anomalie, en « B », elle aussi visible sur l'impédance est due à une interaction avec l'ogive centrale. L'impact sur la courbe de réponse est trop étroit pour être réellement audible à l'écoute.

J'utilise ce type de haut-parleur depuis de nombreuses années et j'ai comparé différents prototypes avec des cache-noyaux ou des ogives.

Un cache-noyau à la place de l'ogive estompe l'anomalie « B », mais creuse davantage la zone $1,8\text{ kHz} - 3\text{ kHz}$

alors que l'ogive comble en partie cette zone. A l'écoute, la version avec l'ogive s'est toujours révélée meilleure. Nous remarquons un premier fractionnement de membrane vers $3,7\text{ kHz}$ puis un deuxième plus prononcé à $4,8\text{ kHz}$ (4 dB). Cette courbe peut paraître torturée mais il faut la mettre en perspective avec les échelles compressées que les fabricants vous présentent habituellement.

La réponse de ce haut-parleur est excellente et on peut noter que la directivité est minimale jusqu'à $2,8\text{ kHz}$ et très bonne jusqu'à $4,5\text{ kHz}$ de 0° à 30° . La zone « C » va nécessiter une correction pour aplatir la courbe, la zone « D » est celle où il serait souhaitable de placer le filtre passe-bas.

Examinons maintenant la directivité verticale, commençons par celle vers le bas (**figure 26**). J'ai conservé les mêmes couleurs pour faciliter la comparaison. La similitude avec la figure 25 est normale et rassurante compte tenu de la position du haut-parleur sur la face avant.

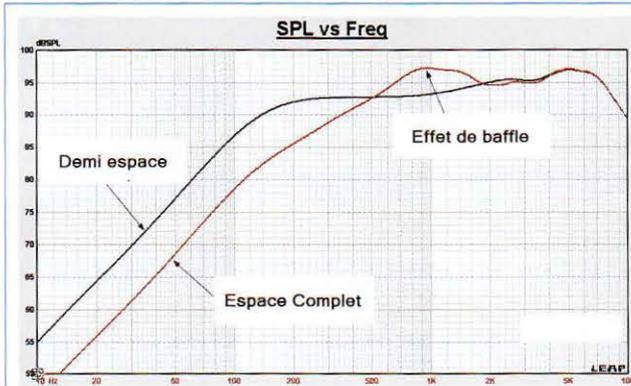
Les différences, visibles surtout à partir de 3 kHz , sont dues à la différence de distance au bord et à l'angle droit (au lieu de 80°).

Voyons maintenant la directivité verticale vers le haut (**figure 27**).

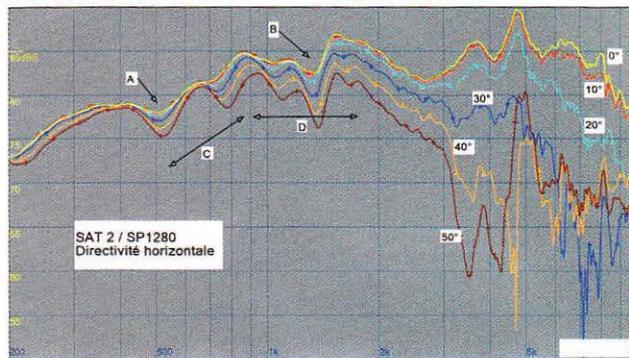
Nous remarquons l'influence des dimensions de la face avant qui provoque des petites ondulations (550 Hz , 750 Hz , etc.), mais l'amplitude est modérée et ne devrait pas se ressentir à l'écoute. A partir de $1,5\text{ kHz}$, on retrouve les mêmes pentes que pour la directivité horizontale.

La réponse de ce haut-parleur dans l'enceinte, que ce soit dans le plan horizontal ou le plan vertical, est vraiment excellente. La forme trapézoïdale, les dimensions réduites et l'encastrement des haut-parleurs y ont très certainement contribué.

La distorsion harmonique du SP1280 (**figure 28**) est très basse, largement en dessous de $0,1\%$ dans la bande utile et constante de 150 Hz à $3,5\text{ kHz}$. Nous constatons que l'harmonique 3 prédomine. La petite remontée ponctuelle à $0,1\%$ de l'harmonique 2 à 550 Hz correspond à l'accident déjà remarqué sur les courbes d'impédance et amplitude - fréquence.



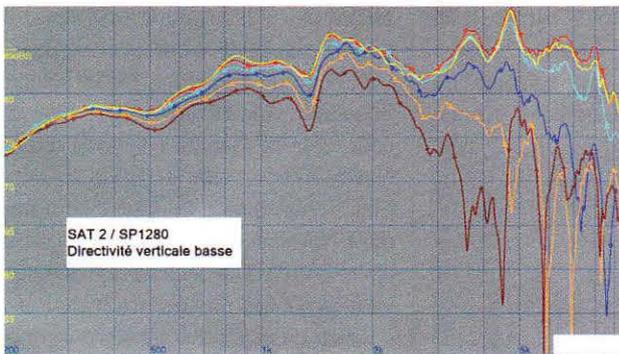
24



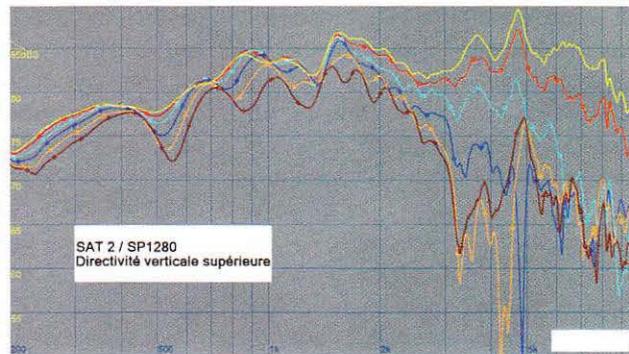
25

26

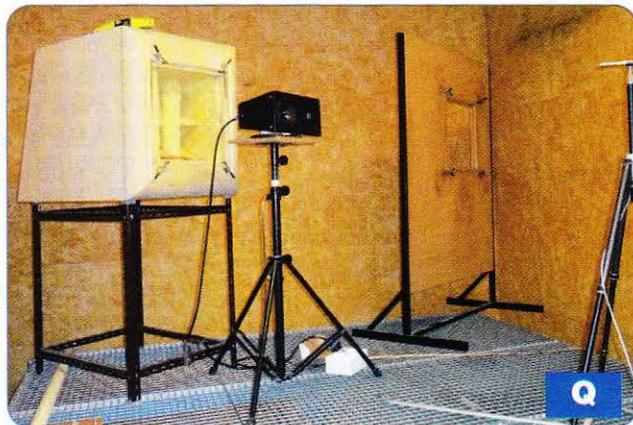
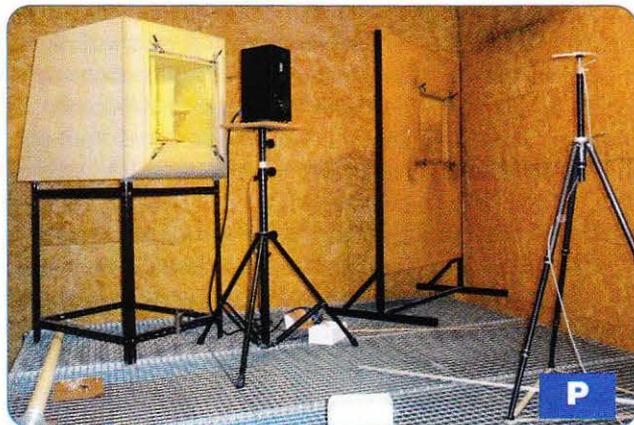
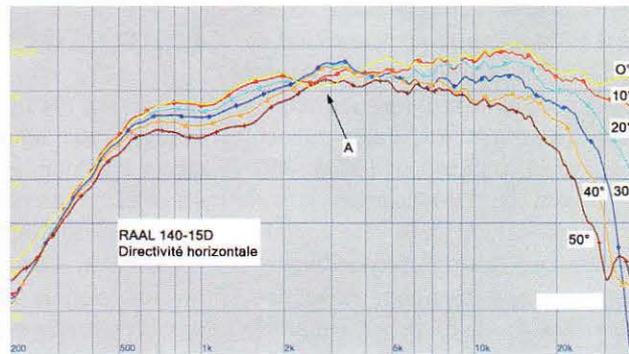
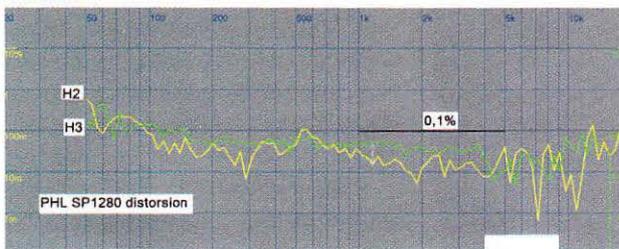
27



29



28



14015D

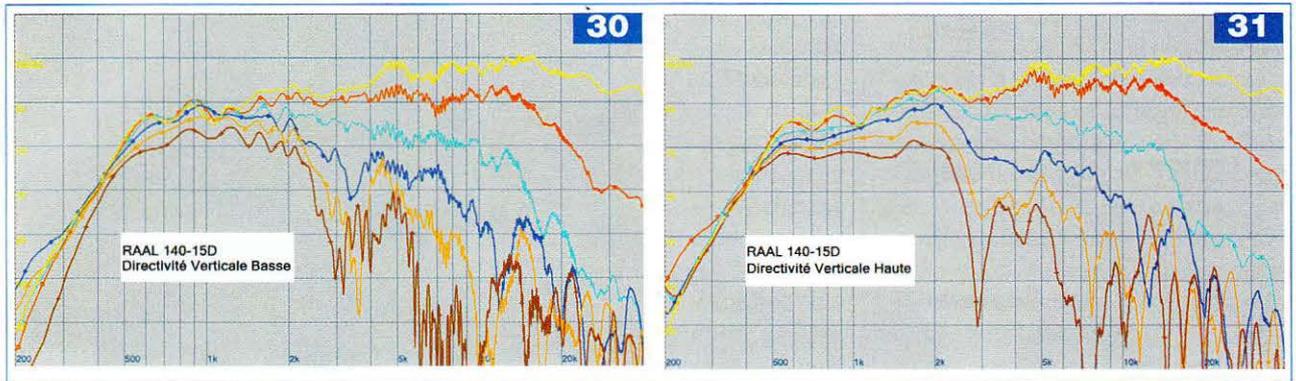
Passons au tweeter, mesuré dans des conditions identiques au médium. De par son montage symétrique, la directivité gauche et droite est la même et la **figure 29** montre la directivité horizon-

tales gauche entre 200 Hz et 40 kHz. La distance entre les « pads » en mousse est restée à 50 mm pendant toute la séance de mesures.

Il est rare de trouver un haut-parleur à ruban avec une réponse polaire

horizontale aussi étendue et uniforme. Dans l'axe (courbe jaune), le niveau à 40 kHz est le même que celui à 1500 Hz, à 30° (courbe bleue) on est à -2 dB à 20 kHz.

Remarquons également un petit affais-



sement dans la zone des 1 kHz et un palier jusqu'à 600 Hz. J'en reparlerai plus en détail dans la partie traitant du filtre numérique, mais examinons tout de même la zone « A ». Nous remarquons un creux de 2,5 dB entre 2 et 3,5 kHz dans l'axe qui ne se retrouve pas dans les réponses hors de l'axe. Cela montre que cette anomalie ne vient pas du haut-parleur lui-même, mais de la diffraction. Si on se contente de la réponse dans l'axe pour calculer un filtre ou une correction, on est dans l'erreur, car la compensation de ce creux de 2,5 dB se traduirait par une bosse de même amplitude hors de l'axe. M. Floyd E. Toole, éminent acousticien, a publié en janvier 2002 un article en trois parties intitulé « Loudspeakers and Rooms for Multichannel Audio Reproduction ».

J'en conseille vivement la lecture. Dans le cadre de ce projet, cet article représente un condensé extrêmement pertinent d'une partie de l'expérience accumulée par Mr Toole. http://www.infinitysystems.com/home/technology/technology_whitepapers.aspx?Language=ENG&Country=US&Region=USA

Les figures 30 et 31 montrent la réponse « polaire » basse et haute de 0° à 50°. Pour ces mesures, l'enceinte a été placée horizontalement comme indiqué à la photo Q. Il ne m'a pas été possible de faire les mesures autrement, ceci explique « l'herbe » que l'on voit sur les courbes. Un lissage au sixième d'octave aurait permis de supprimer ce phénomène, mais j'ai préféré laissé les courbes telles quelles par souci d'honnêteté intellectuelle. Je rappelle également que le micro n'est pas exactement dans l'axe du tweeter

mais entre les deux transducteurs. En général, la directivité verticale d'un haut-parleur « planar » ou à « ruban » est très prononcée (une dizaine de degrés) et irrégulière, mais ici elle est plutôt bien maîtrisée jusqu'à 30° avec une décroissance régulière et sans grand accident jusqu'à 11 kHz. C'est une excellente performance pour un haut-parleur de ce type. Évidemment, les réponses à 40° et 50° de l'axe sont, quant à elles, plus accidentées.

Filtre passif

Si la finalité de ce projet est bien un système multi amplifié assisté par un filtre numérique, je me suis demandé s'il ne serait pas possible de concevoir un filtre passif ayant des performances acceptables. Les différentes mesures de distorsion et de réponses polaires montrent clairement que la fréquence de coupure doit se situer entre 1 et 2 kHz. Il reste à définir la pente et le type de filtre à utiliser. Précisons au préalable que lorsque nous parlons de pente il s'agit de la pente acoustique incluant donc la réponse électrique du filtre et la réponse du haut-parleur au sein de son enceinte. C'est bien entendu valable quel que soit le type de filtre, passif ou actif, numérique ou analogique. En résumé, sans mesures point de salut ! Dans la partie traitant du filtre numérique, j'aborderai cette problématique et je vous proposerai quelques pistes peu onéreuses pour faire vos propres mesures.

En audio, les pentes les plus utilisées vont du 1^{er} au 4^{ème} ordre soit de 6 dB à 24 dB/octave.

Les types de filtres usuels sont ceux de Bessel, Butterworth et Linkwitz

Riley. Notons que ce dernier se caractérise par l'association en série de deux filtres Butterworth d'ordre pair. Les filtres de Legendre, Causer et elliptique sont plus exceptionnellement utilisés, sauf la variante elliptique dite de Neville-Thiele.

Malgré son excellente réponse transitoire, un filtre du premier ordre est exclu pour trois raisons principales :

- La remontée de distorsion du tweeter en dessous de 1 kHz
- La pente trop faible (6 dB/octave) impliquant un recouvrement trop important du fonctionnement des deux haut-parleurs, avec une réponse polaire dégradée
- L'impossibilité à respecter la pente du 1^{er} ordre, compte tenu de la propre réponse des haut-parleurs

Les filtres du 2^{ème} ordre sont difficile à utiliser en filtrage passif car ils se traduisent souvent par un filtre électrique du 1^{er} ordre, compte tenu de la réponse des transducteurs, offrant ainsi peu de latitude pour des corrections additionnelles telle que la diffraction. La zone de recouvrement des haut-parleurs reste importante et les compromis à faire sont importants.

Les filtres du 3^{ème} ordre sont assez intéressants et plus particulièrement la variante proposée par Mr Jean-Michel Le Cleac'h. C'est celui que j'ai préféré à l'écoute en filtrage numérique.

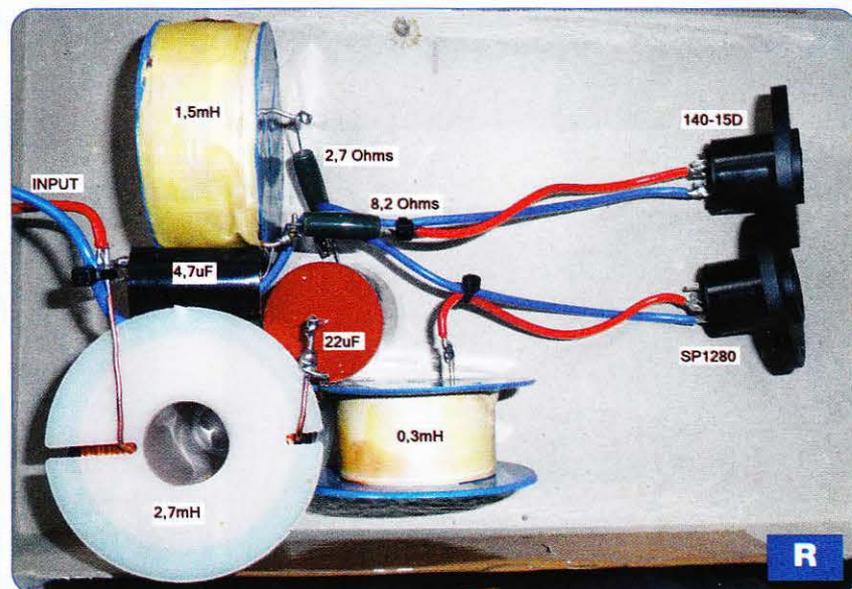
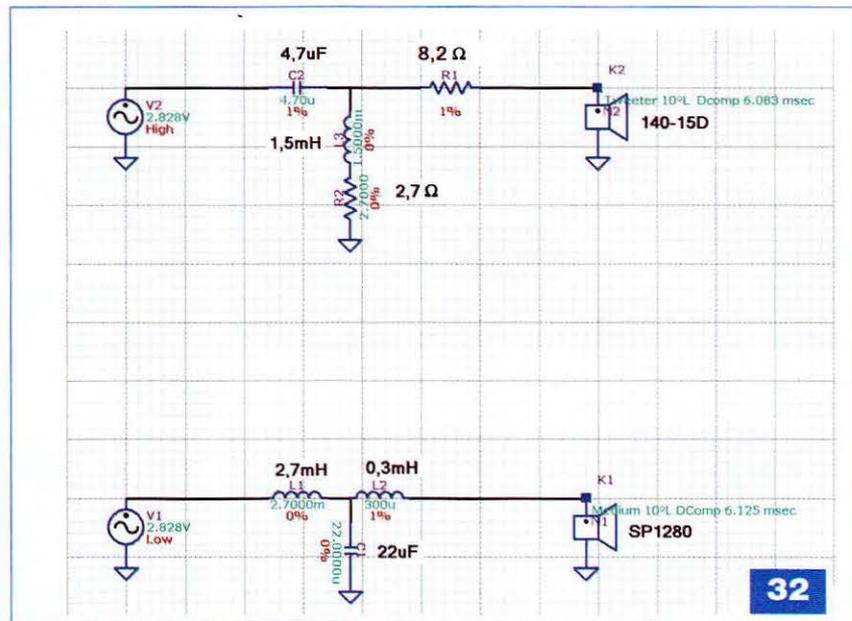
Ce type de filtre implique un décalage spécifique du centre acoustique des haut-parleurs et mon choix d'une face avant sans décrochement ne permet pas son utilisation en passif.

Quant aux filtres du 4^{ème} ordre, j'utilise le plus souvent celui du type Linkwitz-Riley, composé de deux filtres

Butterworth du 2^{ème} ordre en série. La réponse transitoire est correcte sans être exceptionnelle, la zone de recouvrement est faible, l'atténuation à la fréquence de coupure est de 6 dB avec une phase à 180°, ce qui signifie que les deux haut-parleurs seront en phase à cette fréquence. Mais ce qui est particulièrement appréciable, c'est toute la latitude que laissent ces filtres en passif. Un filtre électrique du 2^{ème} ou 3^{ème} ordre est généralement suffisant et la diffraction peut être corrigée au moyen d'une des selfs.

La fréquence de coupure a fait l'objet d'un compromis. Du point de vue du SP1280, compte tenu du petit accident à 1500 Hz il vaudrait mieux la placer vers 1 kHz ou éventuellement vers 2 kHz. Du point de vue du 140-15D, avec l'augmentation régulière de la distorsion par harmonique 3 à partir de 2 kHz et la légère pente descendante, il vaudrait mieux choisir la zone des 2 kHz. C'est la valeur que j'ai choisie comme point de départ.

Une fois la fréquence de coupure initiale déterminée, j'hésitais entre un filtre du 3^{ème} ordre Butterworth et un linkwitz-Riley du 4^{ème} ordre. Après avoir écouté les enceintes pendant plusieurs jours, à l'aide de mon filtre numérique FDS366 correctement réglé pour les deux combinaisons, j'ai préféré le filtre Linkwitz-Riley du 4^{ème} ordre. Une fois encore, j'ai utilisé LEAP 5 pour approcher les valeurs de ce filtre. Pour aboutir à un résultat correct, il faut procéder étape par étape. Après avoir importé les courbes amplitude-fréquences moyennées et les impédances des deux haut-parleurs montés dans l'enceinte, j'ai commencé par corriger la diffraction de baffle pour ensuite lui donner comme objectif un filtre passe-bas Linkwitz-Riley du 4^{ème} ordre avec une fréquence de coupure à 2 kHz. Une fois la convergence obtenue, j'ai vérifié la sensibilité des différents composants pour, d'une part, déterminer ceux où la tolérance est critique et, d'autre part, essayer d'éliminer ceux ayant une influence minimale. J'ai procédé de même pour le tweeter, mais avec un passe-haut cette fois. Puis l'ensemble est simulé, l'objectif étant d'obtenir la réponse la plus linéaire possible. Il ne faut laisser



« variable » que les valeurs de certains composants pour ne pas arriver à des résultats aberrants. Commence alors un long processus dont la finalité est d'aboutir à la meilleure performance avec le minimum de composants. Après de nombreux essais, j'ai trouvé le meilleur compromis en laissant glisser la fréquence de raccordement à 1800 Hz. Enfin, il faut confronter les simulations aux mesures et à l'écoute pour « ajuster » les valeurs définitives.

Schéma

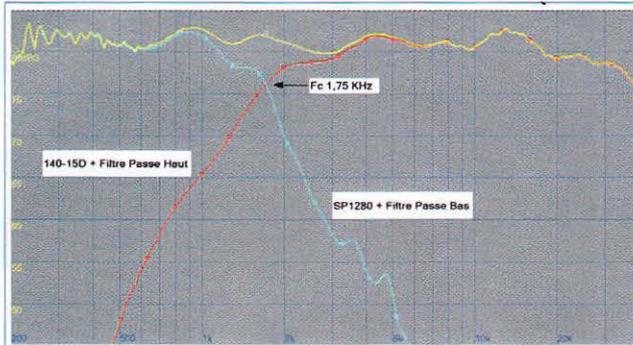
Le filtre définitif est représenté à la figure 32. Il a été possible de le réaliser avec seulement sept éléments dont deux résistances. La self de 2,7 mH sert à la fois à corriger la diffraction et

comme élément d'un filtre passif du 3^{ème} ordre, associé à la self de 0,3 mH et à la capacité de 22 μ F.

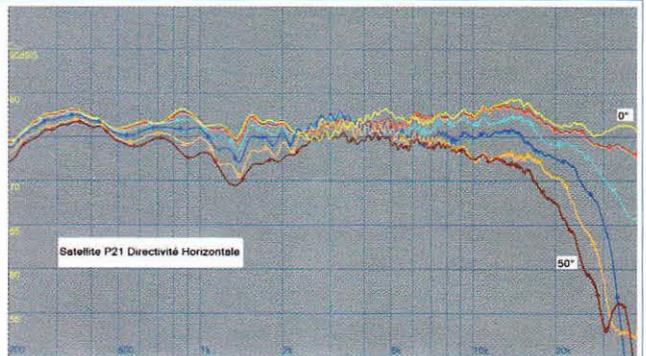
La résistance de 8,2 Ω ajuste le niveau du tweeter pour l'amener à celui du médium, le filtre passe-haut est constitué de la capacité de 4,7 μ F et de la self de 1,5 mH en série avec la résistance de 2,7 Ω .

Réalisation

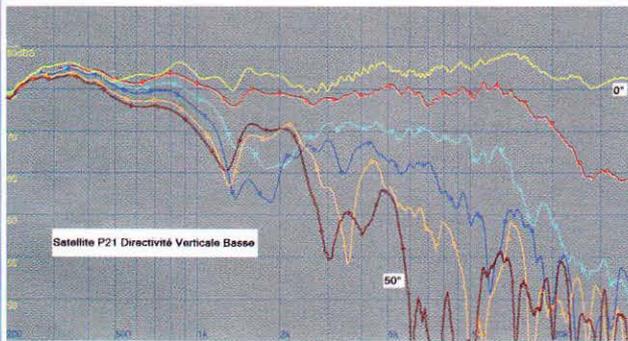
La réalisation du filtre ne pose pas de problème particulier. J'ai utilisé des selfs à air en fil de 15/10 mm, des condensateurs « polypropylène » 160 V / 5 % et des résistances non inductives 10 W / 5 % (ou plus). La photo R montre un des prototypes câblé en l'air et dans une implantation compacte.



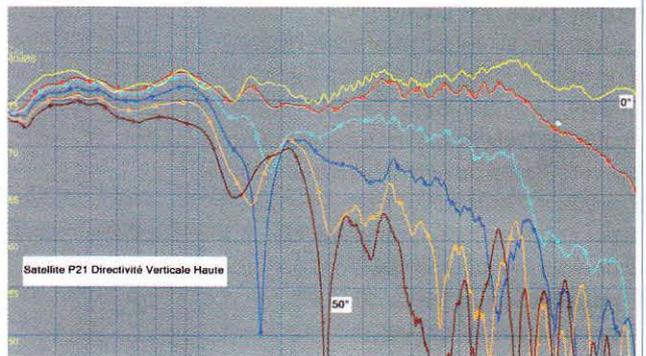
33



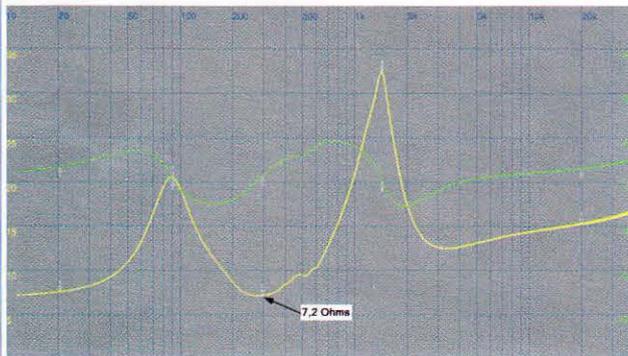
34



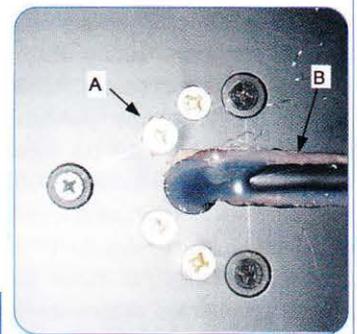
35



36



37



S

Notez la disposition des selfs pour éviter le couplage mutuel par induction. Une fois câblé, placer l'ensemble dans une petite boîte en bois. Pensez à fixer les selfs avec des colliers en plastique ou coulez un peu de résine pour fixer le filtre sur le fond de la boîte. Remplissez de sable fin pour éviter les vibrations. Il est intéressant de placer le filtre à proximité de l'amplificateur, loin des micro-vibrations des haut-parleurs et de relier séparément les masses des étages passe-bas et passe-haut à l'amplificateur. Bien que l'espace disponible soit restreint et que je ne suis pas partisan de cette solution, compte tenu de la pression sonore et des micro-vibrations, il est néanmoins possible de placer le filtre directement dans l'enceinte en

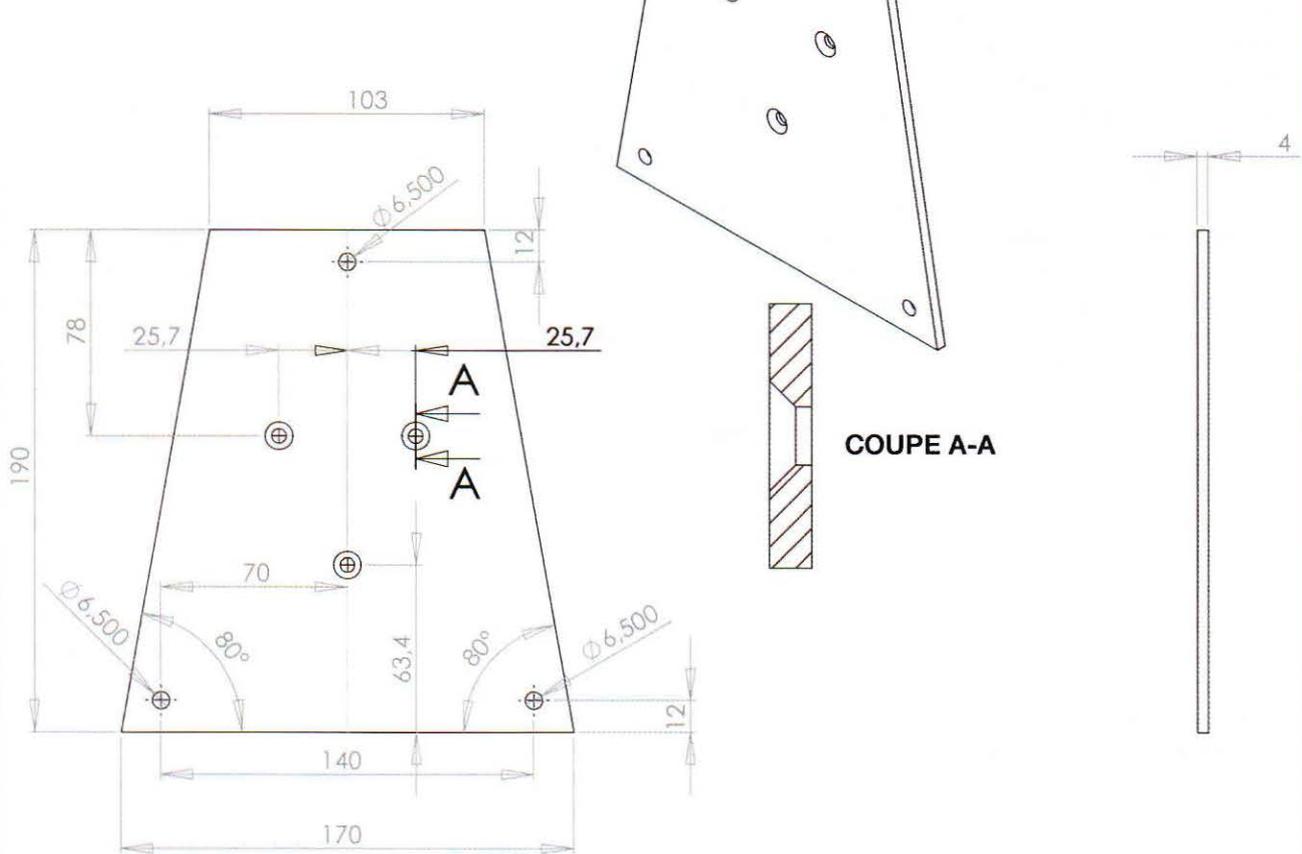
dissociant cette fois le passe-haut du passe-bas. Une suggestion parmi d'autres serait de fixer avec de la résine la self de 2,7 mH horizontalement sur la paroi inférieure, la self de 0,3 mH sur une des deux parois verticales et le condensateur de 22 μ F derrière la prise Speakon. Attention à éloigner le plus possible les selfs du moteur du médium. Le passe-haut est plus facile à placer dans le compartiment supérieur. Veiller à fixer le plus solidement possible les composants pour qu'ils ne génèrent pas de bruit parasite additionnel.

Mesures

La réponse acoustique mesurée des haut-parleurs avec le filtre passif (figure 33) permet de vérifier que la fré-

quence de raccordement à - 6 dB se situe à 1750 Hz, avec des bandes atténuées proches des 24 dB/octave souhaités. La courbe jaune est la réponse globale prise avec le micro à 10° gauche et sans lissage d'aucune sorte. La réponse tient dans un couloir de $\pm 1,5$ dB de 200 Hz à 30 kHz. Les réponses polaires ont été relevées dans les mêmes conditions que les précédentes. La directivité horizontale (figure 34) est excellente à $\pm 30^\circ$ de l'axe. A noter une dégradation logique entre 1 et 2 kHz pour celles à 40 et 50°, compte tenu du type de filtre utilisé. Elle reste pourtant limitée et la réponse entre 200 Hz et 15 kHz tient dans un couloir de $\pm 3,5$ dB. La directivité verticale (figures 35 et 36) est également régulière à $\pm 20^\circ$ de

Socle support enceinte Sat 2
Alu 3 à 6 mm



l'axe. On remarque un petit creux aux environs de la fréquence de coupure qui est dû aux choix qui ont été faits (type de filtre et dimensions de la face avant). À 30°, elle reste acceptable, malgré une accentuation du défaut dans la zone 1,5 à 2 kHz. Au-delà, la situation se complique, mais il faut se rappeler qu'un pinceau de $\pm 20^\circ$ représente déjà un faisceau très large pour l'onde directe perçue par un auditeur situé à 2,5 m ou plus de l'enceinte.

L'impédance de l'enceinte, en version passive (figure 37), ne descend jamais en dessous de 7,2 Ω (300 Hz) et ne devrait pas poser le moindre problème à un amplificateur.

La phase reste contenue à $\pm 30^\circ$ maximum. Il est parfaitement possible de lisser la pointe d'impédance de 32 Ω à 1,5 kHz à l'aide d'un circuit bouchon, mais cela n'apporte aucun bénéfice en terme d'amélioration de l'écoute.

Support d'enceinte

L'enceinte terminée, il lui fallait un support d'enceinte adapté. Le modèle STAND chez Highland Audio (<http://www.highland-audio.com/EN/Produits/Stand.html>) peut convenir moyennant quelques modifications.

Le tronc vertical en MDF, de section triangulaire, est fixé par trois vis aux plateaux inférieur et supérieur.

Ce n'est pas suffisant compte tenu du poids de l'enceinte et je vous recommande d'ajouter 4 vis 4,5 x 60 mm (ou plus) en renfort pour le socle (flèche A photo S). Vous remarquerez qu'il est possible de faire passer le câble haut-parleur dans le tronc vertical. J'ai donc usiné, dans le plateau inférieur, une rainure (flèche B) permettant son passage. J'ai également ajouté deux feuilles de plomb en 2 mm d'épaisseur en dessous pour alourdir l'ensemble. Puis, j'ai remplacé le plateau supérieur

rectangulaire d'origine par un plateau en alliage d'aluminium épousant la forme trapézoïdale de l'enceinte.

Pour cela j'ai découpé une plaque de 4 mm d'épaisseur suivant le schéma proposé figure 38.

Les trois perçages de 6,5 mm de diamètre servent à fixer l'enceinte au support. J'ai préféré retirer les trois inserts supérieurs d'origine du tronc vertical pour pouvoir utiliser à leurs places 3 vis 4,5 x 60 ou 70 mm bien plus robustes.

Écoutes et conclusion

Il est toujours délicat pour quelqu'un ayant investi à la fois de l'argent et beaucoup de temps de porter un jugement objectif sur son propre travail. Cependant, j'utilise ces enceintes en tri-amplification depuis presque un an maintenant et les commentaires des personnes ayant écouté ce système se recourent.

Associées à une paire de caissons de grave coupé entre 100 et 140 Hz, la dynamique est étonnante. La précision chirurgicale révèle des subtilités sonores insoupçonnées, mais aussi malheureusement quelquefois des mixages incertains. L'espace sonore est très large, mais l'image reste stable même lorsque l'auditeur se déplace. Mais le plus surprenant, ce sont les écoutes avec le filtre passif, dont la qualité se rapproche singulièrement de celles obtenues en tri-amplification.

Certes, le prix de ces haut-parleurs est élevé en particulier celui du 140-15D (400 €), mais le résultat vaut très largement l'investissement. Du point de vue technique, les mesures sont excellentes avec une courbe de réponse tenant dans un couloir de 1,5 dB, un taux de distorsion très faible et un rendement de 87 dB.

Du point de vue acoustique, la dynamique, la présence et la transparence sont remarquables. En attendant j'ai créé une adresse e-mail dédiée à ce projet : p21.jcg@gmail.com

J.-C. GAERTNER

Annexe : mesures des paramètres T/S à l'aide d'une masse additionnelle

J'en rappelle brièvement le principe théorique, on mesure quelques valeurs caractéristiques d'impédances à l'air libre du haut-parleur solidement fixé à la verticale suivant le schéma figure 6, puis on ajoute une masse non magnétique de valeur précise permettant de faire varier la fréquence de résonnance d'au moins 20 % et on recommence.

En pratique, on utilise une sortie ligne de la carte « son » comme générateur, on intercale un amplificateur de faible puissance et on mesure les tensions U1 et U2 avec les deux entrées lignes.

Avec les logiciels, ordinateur et carte « son » actuels il est devenu très facile d'extraire les paramètres T/S de façon quasi automatique, mais il faut prendre un certain nombre de précautions si on veut obtenir des résultats cohérents. Voici quelques conseils :

- Utiliser un signal sinusoïdal glissant (pas trop rapide) ou mieux pas-à-pas. Les bruits « pseudo aléatoire » de type MLS (Maximum Length Sequence) même d'ordre élevé avec leur spectre particulier ne « chargent » pas assez le haut-parleur dans le grave.
- Attention au bruit, les courants circulant dans le haut-parleur sont faibles et il ne faut pas oublier que celui-ci se comporte également comme un microphone.
- Utiliser une masse additionnelle non magnétique dont on connaît précisément la masse (par exemple à $\pm 0,1$ g pour 10 g) et permettant de faire varier la fréquence de résonnance d'au moins 20 %. Il ne faut tout de même pas qu'elle soit trop disproportionnée par rapport à la masse de l'équipage mobile.
- Quelle valeur de résistance utiliser ? Mr Thiele, au début des années 60, utilisait une résistance de l'ordre de 1 k Ω , donc élevée par rapport à l'impédance du haut-parleur qui permettait de simplifier grandement les calculs (quasi courant constant). Le problème est que des tensions élevées sont nécessaires pour obtenir un courant suffisant dans le haut-parleur. Les logiciels de mesures suggèrent souvent des valeurs allant de 10 Ω à 100 Ω . Avec cet ordre de grandeur, on ne travaille ni à tension ni à courant constant comme préconisé par la norme, mais entre les deux. Ce n'est pas vraiment un problème mais il faut juste être

conscient que les paramètres calculés ainsi risquent d'être différents sans pour autant être inexacts.

- Rester dans le domaine de fonctionnement linéaire du haut-parleur. Mr Thiele et Mr Small restent relativement discrets à ce sujet. La norme IEC 60208-5 n'est pas non plus d'un grand secours, elle recommande d'utiliser une tension ou un courant constant suffisamment faible pour rester dans le domaine linéaire en précisant toutefois que les mesures d'impédances sont fortement influencées par le niveau qui ne doit être ni trop bas ni trop haut. Une note suggère de comparer les résultats à plusieurs niveaux pour valider les résultats et trouver ainsi le niveau d'excitation à utiliser. Il faut retenir que plus vous augmentez le niveau (dans le domaine linéaire) plus vous diminuez la fréquence de résonnance et le QTS. Si ce rapport F_s / Q_{TS} reste à peu près constant, vos mesures sont valides.

Disponibilité des composants du satellite médium-aigu P21 :

Les haut-parleurs PHL SP1280, les selfs, condensateurs, résistances nécessaires à la construction du filtre passif peuvent être commandés à la Maison du Haut-parleur, située au 138 avenue Parmentier, 75011 Paris (www.lamaisonduhautparleur.com).

Le tweeter RAAL 140-15D n'est pas encore distribué en France mais Mr. Aleksandar Radisavljevic propose de le contacter à l'adresse email info@raalribbon.com pour passer commande.

Après virement du montant correspondant à la société, les haut-parleurs seront envoyés à votre domicile par Fédéral Express.

L'offre pertinente pour vos Circuits Imprimés professionnels



On-line: calculez vos prix
On-line: passez vos commandes
On-line: suivez vos commandes
On-line: 24H/24 & 7J/7

**Pas de minimum de commande !
Pas de frais d'outillages !**

Une équipe novatrice à votre écoute: +33 (0)3 86 87 07 85

www.eurocircuits.com

Verified

- "Standard pooling" à prix très attractifs
- de 1 à 6 couches
- de 1 à 1000 pièces
- délais à partir de 3 jours ouvrés

A la carte

- "Technologie pooling" à prix attractifs
- de 1 à 8 couches
- de 1 à 1000 pièces
- délais à partir de 3 jours ouvrés

On demand

- "Technologie particulière" au juste prix
- de 1 à 16 couches
- de 1 pièce à la moyenne série
- délais à partir de 3 jours ouvrés