

Le dossier ressource qui suit n'a pas la prétention d'être théoriquement exhaustif. Sa fonction est d'offrir la synthèse des connaissances techniques indispensables à l'étude d'enceintes acoustiques par des élèves de bac pro Mavelec. L'exemple choisi avec les élèves est traité au chapitre 10.

L'organisation de ce dossier est guidée par une intention didactique qui est d'amener les problèmes et leurs solutions dans l'ordre où ils se présentent le plus fréquemment.

Que M. JM Lapp soit ici remercié pour ses conseils et son apport dans le domaine audiophile.

Sommaire du dossier ressources

1 Du projet ... au cahier des charges.....	2
2 Choix du type d'enceinte.....	3
2.1 Rappels sommaires sur les haut-parleurs.....	3
2.2 Pourquoi mettre un haut-parleur en enceinte ?.....	4
2.3 Les principaux types d'enceintes.....	4
3 Choix des HP.....	7
3.1 Choix du Boomer-Medium	7
3.2 Choix du tweeter.....	8
4 Etude de l'ébénisterie.....	9
5 Etude du filtrage.....	10
5.1 Généralités.....	11
5.2 Filtrage 2 voies 1er ordre sans atténuation.....	11
5.3 Filtrage 2 voies 1er ordre avec atténuation du tweeter par résistance série.....	12
5.4 Atténuation du tweeter à impédance constante, par réseau de résistances.....	12
5.5 Filtrage 2 voies 1er ordre avec BM monté en large-bande.....	13
6 Etude de l'évent.....	13
7 Etude de l'amortissement interne.....	14
8 Rédaction d'un dossier de réalisation.....	15
8.1 Liste du matériel nécessaire.....	15
8.2 Fiche de débit ébénisterie.....	16
8.3 Instructions d'assemblage.....	16
9 Phase de réglages finaux.....	16
9.1 Mesures électroacoustiques faisables au labo Mavelec.....	16
9.2 Choix des pistes à écouter.....	17
9.3 Importance des câbles.....	18
9.4 Positionnement des enceintes pour l'écoute.....	18
9.5 Ecoute puis retouche éventuelle de l'amortissement.....	18
9.6 Ecoute puis réglage de l'évent.....	18
9.7 Ecoute puis retouche éventuelle du filtre.....	18
9.8 Reprise éventuelle de la procédure -> 9.4.....	18
10 Dossier de réalisation : enceintes PPCP 1PMAE 2002-2003.....	19
10.1 Cahier des charges.....	19
10.2 Choix du type d'enceinte.....	19
10.3 Choix des transducteurs.....	19
10.4 Calcul du filtre 2 voies.....	19
10.8 Calcul de l'évent.....	20
10.5 Liste du matériel nécessaire.....	21
10.6 Fiche de débit et de découpe des panneaux.....	22
10.7 Instructions d'assemblage.....	23

1 Du projet ... au cahier des charges

C'est à partir du constat d'un besoin que le projet prend naissance. Pour pouvoir être mené à bien, ce projet doit être défini le plus complètement possible, c'est la tâche du cahier des charges.

C'est sur le cahier des charges, que s'appuieront les choix qui interviendront dans la phase d'étude et de réalisation.

Exemples de critères intervenant dans la rédaction du cahier des charges

- Nombre d'enceintes identiques à réaliser
- Type d'utilisation (Hifi, Sono)
- Installation fixe, mobile
- Type de musique
- Puissance maximale
- Impédance minimale (quel ampli...)
- Volume moyen du lieu d'écoute
- Positionnement dans la gamme de qualité (quelles sources...)
- Budget par enceinte
- Matériaux au choix ou imposés
- Transducteurs au choix ou imposés
- Enceintes au sol, sur pied, en bibliothèque...

2 Choix du type d'enceinte

2.1 Rappels sommaires sur les haut-parleurs

Le haut-parleur est un transducteur électroacoustique. En entrée, on lui applique une tension électrique variable. En sortie, la membrane prend une position qui est l'image de la tension.

Si la tension appliquée varie avec une fréquence comprise entre 20 et 20000 Hz, le mouvement correspondant de la membrane engendrera une vibration des couches d'air qui se traduira par une sensation sonore.

Le moteur du HP est constitué d'une bobine pouvant translater dans un entrefer d'1 mm environ. Dans cet entrefer règne un champ magnétique intense ($B \approx 1$ Tesla) mis en forme radiale grâce aux pièces polaires. (Cf Fig. 2b)

L'application d'une tension u aux bornes de la bobine provoque la circulation d'un courant i .

Ce courant i parcourant les spires de la bobine plongée dans le champ magnétique provoque l'apparition d'une force de Laplace $F = i \cdot l \cdot B$ dirigée le long de l'axe de la bobine, dans un sens dépendant de celui du courant. l ne correspond pas à la longueur totale de la bobine mais à celle des spires plongées dans l'entrefer.

Cette force met en mouvement la membrane.

Les principaux paramètres d'un HP sont f_s (exprimé en Hz) aussi noté f_r : fréquence de résonance du HP à l'air libre.

V_{as} (exprimé en litres): volume d'air dont la raideur serait équivalente à la suspension du haut-parleur.

Q_{ts} (nombre sans unité) : coefficient total de surtension, issu des surtensions électrique et mécanique. Ce paramètre donne l'acuité de la résonance.

A partir de ces trois paramètres, on peut calculer la mise en enceinte close de volume V_c ou bass-reflex de volume V_b , d'un haut-parleur donné, c'est à dire évaluer le coefficient correspondant de la surtension de l'enceinte à la résonance (Q_{tc} pour une enceinte close, S pour une enceinte bass-reflex), ainsi que la fréquence de coupure inférieure f_{3dB} de l'enceinte.

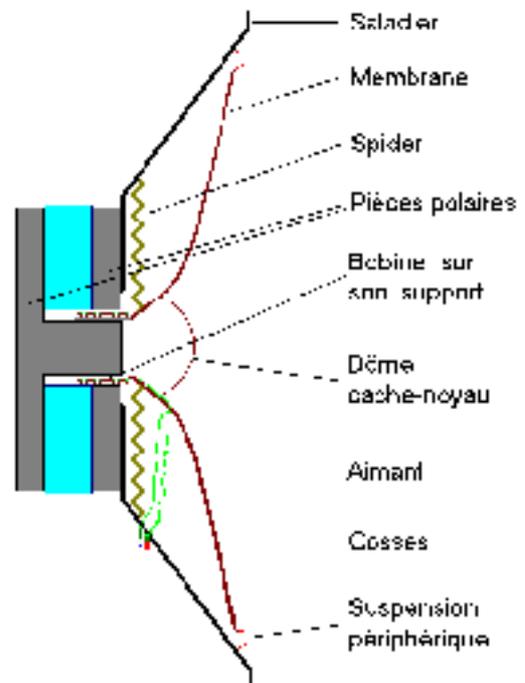


Fig. 2a Coupe d'un HP

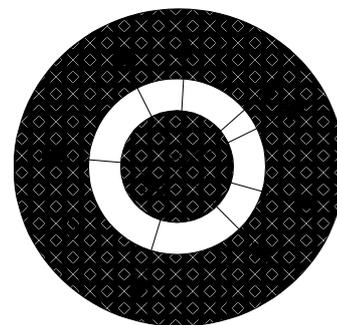


Fig. 2b Pièces polaires et entrefer vus de face

2.2 Pourquoi mettre un haut-parleur en enceinte ?

Un haut-parleur n'est pas une source ponctuelle émettant une onde sphérique dans toutes les directions de l'espace (Fig. 2c).

Le modèle qui rend le mieux compte du fonctionnement du HP est celui du fonctionnement en piston de la membrane. Lorsqu'elle avance, une variation de pression positive est créée à l'avant, c'est « l'onde avant » tandis qu'une variation de pression négative est créée à l'arrière « onde arrière » (Fig. 2d). Ces deux ondes étant en opposition de phase, on verra apparaître un phénomène de court-circuit acoustique (Fig. 2e) pour des longueurs d'ondes

λ permettant une opposition de phase correspondant à un espace

parcouru égal à $\frac{\lambda}{2}$, le long d'un chemin physiquement supérieur ou égal à $2R$ (Fig. 2f). Les longueurs d'ondes court-circuitées seront donc telles que

$\lambda > 4R$. Les fréquences, correspondantes $f = \frac{c}{\lambda}$ seront donc court-

circuitées si $f < \frac{c}{4R}$ soit $f < \frac{85}{R}$ pour $c = 340$ m/s

Pour un HP de diamètre 17 cm pris tel quel, non monté sur un plan, on trouve $f = 1000$ Hz. Dès qu'on descend en dessous de cette fréquence, le court-circuit acoustique se fait donc sentir de plus en plus nettement. Autant dire qu'on n'aura pas de graves.

Le remède pour pouvoir descendre en fréquence, consistera donc à rallonger le chemin $2R$ (baffles) ou à amortir l'onde arrière (enceintes) suivant les principes que nous allons voir.

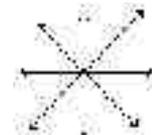


Fig. 2c

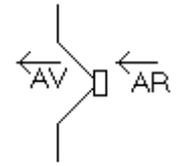


Fig. 2d

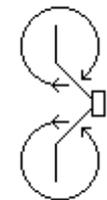


Fig. 2e

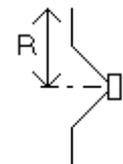


Fig. 2f

2.3 Les principaux types d'enceintes

2.3.1 Les baffles

Baffle plan : constitué d'un panneau au centre duquel est fixé le HP, le baffle a pour fonction de séparer l'onde avant de l'onde arrière. Il n'est pas amorti (Fig. 2g).



Fig 2g

Un exemple d'utilisation du baffle plan est le baffle CEI qui figure dans les normes utilisées pour tracer les courbes de réponse constructeurs $L(f)$ des HP.

Le baffle CEI est constitué d'un panneau rigide (22 à 50 mm d'épaisseur) rectangulaire, mesurant 1,35 m de hauteur par 1.65 m de largeur. La découpe circulaire du panneau destinée à accueillir le HP, a pour centre un point situé 25 cm à droite, 25 cm au dessous, du centre du baffle. La mesure est effectuée en chambre anéchoïde.

Baffle replié : Il permet d'augmenter le trajet de l'onde arrière tout en limitant l'encombrement dans la pièce. Le baffle replié n'est généralement pas amorti ou très légèrement. Le système est très sensible au placement par rapport au mur arrière.

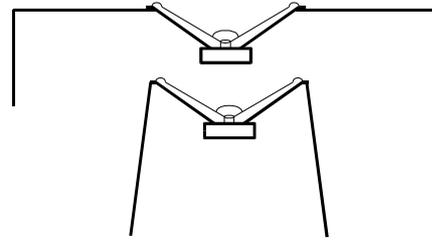
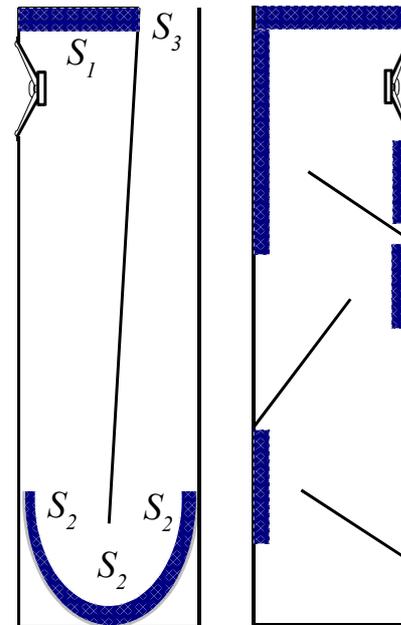


Fig 2h

Les baffles repliés sont encore utilisés dans des systèmes à large-bande, en raison de leur facilité de réglage empirique (par ouverture progressive des faces latérales). (Fig 2h)

2.3.2 Les lignes de charge

Deux modèles courants (ligne quart d'onde TQWT et labyrinthe) sont dessinés Fig 2i mais il en existe de nombreux autres. Le principe consiste là encore à charger le HP à l'arrière mais cette fois, on joue sur la variation de section le long du trajet en même temps que sur la présence d'amortissant. Ce type de montage est souvent utilisé avec un large-bande et a pour avantage un équilibre général de l'enceinte souvent surprenant de naturel, et pour inconvénient une possible insuffisance dans les graves, sachant qu'il est difficile de descendre en dessous de la fréquence de résonance du HP.



TQWT (Fig. 2i) Labyrinthe

Les calculs simplifiés font intervenir deux paramètres.

f_r , fréquence de résonance du HP à l'air libre, intervient dans le calcul de la longueur du chemin à parcourir, donc de la hauteur de l'enceinte.

S_{HP} est la surface active du HP. Elle intervient dans le calcul des sections S_1 , S_2 , S_3 .

L'amortissement type est donné dans la figure ci-contre mais il arrive qu'il faille recouvrir de feutre les parois latérales intérieures dont le parallélisme peut favoriser l'apparition d'ondes stationnaires dans le médium.

Calcul de la hauteur de l'enceinte : l'onde arrière parcourt un chemin à peu près égal à $2h$ où h est la hauteur intérieure de l'enceinte.

A ce chemin $2h$ correspond la longueur d'onde minimale de court-circuit $\frac{\lambda}{2}$

On obtient donc $h = \frac{\lambda}{4}$ d'où le nom de ligne de charge quart d'onde, appelée en anglais TQWT

(Total Quarter Wave Tapered). Avec $c = 340 \text{ m/s}$, On retrouve la relation $h = \frac{85}{f_c}$ où f_c est la fréquence de coupure de l'enceinte qu'on a tout avantage à choisir égale à la fréquence de résonance f_r du HP.

Calcul des sections S_1, S_2, S_3

Si on appelle D le diamètre actif de la membrane du HP, on trouve $S_{HP} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ On choisit alors généralement $S_1 = 2 S_{HP}$ $S_2 = 1,5 S_{HP}$ $S_3 = S_{HP}$

Rien n'oblige à implanter le HP tout en haut de l'enceinte. Généralement, on calcule pour qu'une fois finie, l'axe du HP soit à une hauteur comprise entre 90 et 110 cm du sol (en fait la hauteur des oreilles quand on est confortablement assis dans son fauteuil préféré).

2.3.3 L'enceinte close

(également appelée enceinte à charge infinie)

L'onde arrière est entièrement amortie, au moyen d'un remplissage partiel ou total du volume interne par un absorbant (laine de verre, papier, filtre polyester...) permettant ainsi de descendre plus bas en fréquence.

Avantage : bon rendu pour des calculs de conception et une mise au point pas trop difficiles. (Fig. 2j)

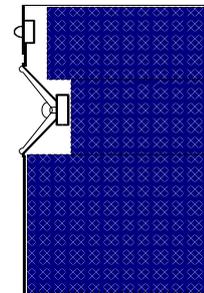


Fig. 2j

Pour demeurer HI-FI*, les valeurs du volume de l'enceinte close V_c doivent procurer une courbe de réponse de l'enceinte quasi plate. Le coefficient de surtension Q_{tc} de l'enceinte devra être compris entre 0.707 et 1.

Formules usuelles de calcul des enceintes closes

$f_c = Q_{tc} \cdot f_r / Q_{ts}$ $A = 1 / (Q_{tc}^2 - 2)$ $f_3 = f_c \cdot \sqrt{(A + \sqrt{A^2 + 4})} / 2$ $R(\text{dB}) = 10 \cdot \log(1 / (2 + A))$
 $V_c = V_{as} / ((Q_{tc} / Q_{ts})^2 - 1)$ Où f_r = freq résonn. HP à l'air libre, f_c = freq rés HP en enceinte $f_{-3\text{dB}}$ =
 freq Inf coupure à -3dB,
 $R(\text{dB})$ = niveau à f_c , V_c = volume intérieur de l'enceinte close (en litres)
 Q_{tc} = coefficient de surtension de l'enceinte, fonction décroissante de V_c .

*Note : (voir les normes, ainsi que le vocabulaire « audiophile », « mélomane » expliqué par JM Lapp.)

2.3.4 L'enceinte bass-reflex

L'enceinte, composée de son volume interne et de l'évent, forme un résonateur. Elle est calculée pour être accordée sur la fréquence de résonance du HP. L'énergie ainsi récupérée permet de gagner presque un octave dans les graves. Dans les petits volumes, c'est celle qui donne les meilleurs résultats (Fig. 2k).

Les calculs de conception sont un peu plus exigeants.

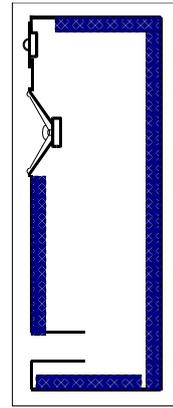


Fig. 2k

Contrainte de linéarité de la courbe dans sa partie inférieure. : on conviendra de ne retenir que des valeurs de S (coeff de surtension de l'enceinte bass-reflex) comprises entre 5.7 et 8.

Formules de calculs

$$V_b = V_{as} \cdot S \cdot Q_{ts}^2 \quad f_{-3dB} = f_r \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b}\right)^{0,44} \quad f_b = f_r \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b}\right)^{0,31}$$

V_b et V_{as} en litres, S réel, Q_{ts} réel $f_r, f_{-3dB}; f_b$ en Hz;
 S fonction croissante de V_b

3 Choix des HP

3.1 Choix du Boomer-Medium

Il faut prendre en compte la gamme de prix, le diamètre, l'impédance nominale, la puissance admissible, et enfin la courbe de réponse.

Le BM être compatible avec le volume voulu.

La fréquence de résonance du BM devra être inférieure à 60 Hz pour pouvoir espérer descendre f_{-3dB} en dessous de 50 Hz une fois monté en enceinte.

Le boomer devra avoir une courbe de réponse s'étendant suffisamment loin pour faciliter le choix du tweeter. Il vaut mieux rechercher une courbe de réponse régulière du BM surtout vers sa borne supérieure, ce qui permettra de tester un éventuel montage en large bande au rendu musical subjectivement très intéressant et donnant un filtre simple et facile à régler ne concernant que le tweeter.

Il faut aussi que le BM ait une membrane rigide, faute de quoi la réponse impulsionnelle sera forcément mauvaise. d'autres paramètres (dont on tire V_{as} et Q_{ts}), sont également significatifs, que nous ne détaillerons pas ici (compliance, facteur de force, masse mobile, notamment).

Rien n'empêche non plus de procéder dans l'autre sens en partant d'un BM imposé et de choisir le volume adéquat.

Ce sont les différentes formules de calculs des enceintes closes et bass-reflex qui permettent de préciser, selon les caractéristiques d'un BM, la gamme des volumes qui lui sont compatibles.

3.2 Choix du tweeter

Les paramètres de Small Thiele ne rentrent pas dans le choix des tweeters.

Leur choix s'effectue d'abord avec les indications suivantes:

- gamme de prix
- courbe d'impédance Z (*ohm*) en fonction de f (*Hz*)
- courbe de réponse L (*dB*) en fonction de f (*Hz*) souvent fournie sur le même graphique que la précédente.
- puissance maximale admissible.

Viennent ensuite les considérations subjectives (tel dôme textile a meilleur timbre que tel dôme polymère ...)

Le tweeter peut avoir une efficacité légèrement supérieure à celle du boomer, ce qui permettra un réglage plus facile. Mieux vaut éviter d'utiliser un tweeter au rendement inférieur à celui du BM, en effet, l'expérience montre qu'il est moins dommageable pour le réalisme du rendu d'atténuer un tweeter que d'atténuer un BM, en raison des phénomènes se produisant aux alentours de la fréquence de résonance où le comportement transitoire du BM en générateur est gênant s'il n'est pas maîtrisé de près par l'amplificateur (c'est l'argument principal des tenants du large-bande ou du 2 voies avec BM monté en large-bande).

La courbe de réponse du tweeter est souvent donnée dans l'axe, et à 30°. Cela permet de se faire une idée de la réponse enceintes pincées vers le point d'écoute (courbe dans l'axe) et enceintes parallèles (courbe à 30°).

La courbe de réponse du tweeter doit recouvrir celle du BM, au moins sur un octave afin d'offrir des solutions au problème du filtrage qui sera abordé plus loin. La figure 3a montre l'exemple de deux transducteurs incompatibles car leurs courbes de réponse n'ont pas de zone commune..

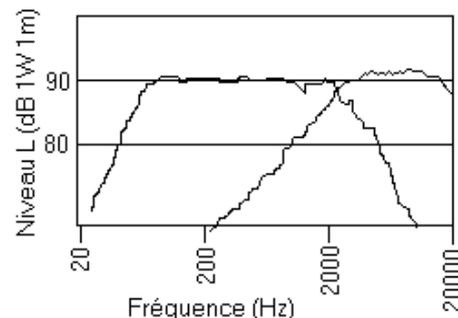


Fig 3a

De façon générale, plus on demande à un tweeter de descendre en fréquence, plus son niveau de qualité (... et son prix) devient important.

Pour une fréquence de coupure à 6000 Hz au premier ordre avec des puissances admissibles inférieures ou égales à 40 W, Audax propose ses TW10 E1 ou F1 qui, pour moins de 15 Euros ont un bon rapport qualité/prix.

On ne trouvera pas dans cette gamme de prix des tweeters capables de descendre à 4000 Hz.

4 Etude de l'ébénisterie

L'ébénisterie d'une enceinte n'est pas la caisse de résonance d'un instrument à cordes ! Au contraire, elle doit être rigide et ne pas permettre l'apparition d'ondes stationnaires dans le matériau.

De la pose de tasseaux en croix ou non, de traverses, jusqu'au goudronnage des parois, en passant par les doubles parois remplies de sable ou ... en béton, tout a été tenté pour atteindre le but ultime : que l'ébénisterie ne vibre pas . De façon plus conventionnelle, le bois naturel peut convenir pour des baffles ou des lignes de charge, pas pour des enceintes closes ni des bass-reflex pour lesquelles on préférera de l'aggloméré, de la médite ou du contreplaqué précontraint (surtout pas de contreplaqué de qualité ordinaire, le rendu est franchement médiocre et les ondes stationnaires se régaleront).

L'épaisseur minimale est de 19 mm pour les petites enceintes et 22 mm pour les grandes. (on met parfois du 30 ou 40 mm en face avant de grosses enceintes haut de gamme).

- La 1ère cote critique d'une enceinte est sa profondeur. Dans le cas d'un bass-reflex, où l'absorbant acoustique n'occupe pas le volume mais est fixé aux parois, il ne faut pas que l'enceinte soit trop «plate» sous peine de voir l'onde arrière se réfléchir et se superposer à l'onde avant si l'amortissement est localement insuffisant. Si on force sur l'absorbant, derrière le HP, on voit apparaître alors le problème de la section arrière insuffisante.

- La 2ème cote critique est sa largeur, principalement pour des raisons de rigidité. L'argument de la précision de l'image sonore qui serait meilleure avec des faces avant étroites est encore mis en doute par plusieurs fabricants.

La cote d'ajustement sera donc la hauteur, c'est celle qu'on calcule habituellement en dernier.

Dans le cas d'enceintes colonnes, la lutte contre les ondes stationnaires est plus difficile car il ne faut pas que les dispositifs d'absorption diminuent le volume utile ou entravent le fonctionnement de l'évent.

5 Etude du filtrage

Nous nous limiterons dans ce dossier à l'étude du filtrage 2 voies 1er ordre

5.1 Généralités

Le filtrage a pour but de séparer les fréquences constituant le signal électrique d'entrée afin que chacun des transducteurs reçoive la gamme de fréquences qui lui correspond.

Le fonctionnement simultané des deux transducteurs recrée alors l'image acoustique du signal électrique issu de l'amplificateur.

Le fonctionnement des filtres est basé sur les propriétés des condensateurs, des résistances et des bobines.

L'impédance d'un condensateur (due à l'effet électrostatique de capacité) diminue lorsque la fréquence augmente. Le condensateur a donc tendance à laisser passer plutôt les sons aigus.

L'impédance d'une résistance est constante avec la fréquence. On pourra donc s'en servir pour atténuer un haut-parleur.

L'impédance d'une bobine (due à l'effet électromagnétique d'auto-inductance) est proportionnelle à la fréquence. Une bobine sera donc calculée pour laisser passer les fréquences plus basses (sons graves) que la fréquence de coupure choisie.

Choix de la fréquence de coupure : elle doit se situer sur la partie haute de la courbe de réponse de chacun des HP compatible avec les deux HP et permettre une tenue en puissance correcte (un BM donne des instabilités en haut de bande mais un tweeter est détruit si on ne le filtre pas ou si on filtre trop bas la partie inférieure de sa courbe de réponse.)

5.2 Filtrage 2 voies 1er ordre sans atténuation

Le filtre type le plus simple est donné Fig 5a Son calcul se fait comme suit :

1°) Choix de la fréquence de coupure f_0 sur les courbes L (dB) en fonction de f (Hz)

2°) Lecture de Z_B et Z_T à f_0 sur les courbes Z (ohm) en fonction de f (Hz)

3°) Calculs de C et L correspondants. au moyen des formules $C = \frac{1}{2 \pi Z_T \cdot f_0}$ et

$$L = \frac{Z_B}{2 \pi \cdot f_0} \quad (\text{Voir le programme ENCEINTE.EXE 4° qui automatise ces tâches.})$$

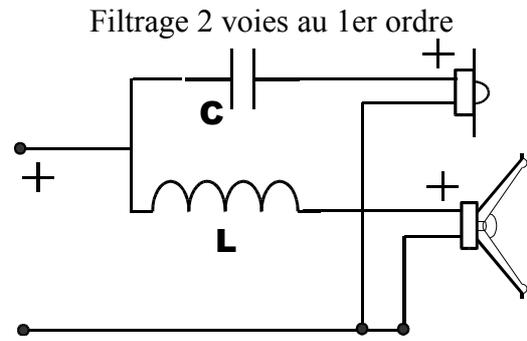


Fig 5a

Filtrage 2 voies 1er ordre avec atténuation du tweeter par résistance série.

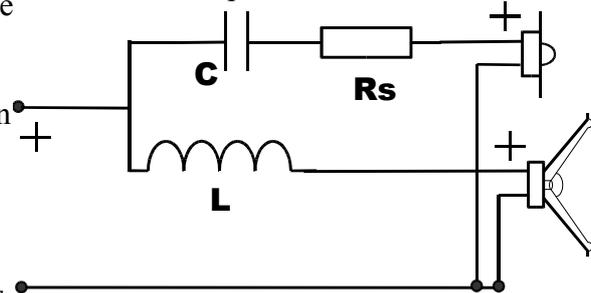


Fig 5b

5.3 Filtrage 2 voies 1er ordre avec atténuation du tweeter par résistance série

La formule utilisée pour calculer la résistance série est $R = Z_{HP} \cdot (10^{\frac{A}{20}} - 1)$ où

Z_{HP} désigne l'impédance moyenne du HP dans l'intervalle de fréquence considéré,
 A exprimé en dB et compté négativement désigne l'atténuation désirée.

Prenons l'exemple d'un tweeter d'impédance moyenne $Z_T = 7,5 \Omega$ au voisinage de la fréquence de coupure désirée $f_o = 5500 \text{ Hz}$ où on projette de le couper. A cette fréquence, son efficacité moyenne est $L_T = 92 \text{ dB} / 1W.1m$ tandis que celle du BM est $L_B = 90,5 \text{ dB} / 1W.1m$. L'atténuation à opérer est donc $90,5 - 92 = -1,5 \text{ dB}$. sur une impédance moyenne de $7,5 \Omega$, ce qui conduit au calcul $R = 7,5 (10^{0,075} - 1)$ $R \approx 1,41 \Omega$

Cette méthode simplifiée est approximative mais suffisante pour nous. Bien sûr, un calcul rigoureux conduirait à prendre en compte l'inductance propre du moteur du tweeter, montrant ainsi que l'atténuation réelle obtenue n'est pas aussi importante que celle souhaitée. Le fait est qu'en phase de réglages finaux, on retouche souvent R série à la hausse puis C à la baisse.

Ordre des calculs de cette méthode

- 1°) Choix de la fréquence de coupure f_o , relevé des impédances et des efficacités Z_B ; Z_T ; L_B ; L_T
- 2°) Calcul de R série d'atténuation du Tweeter
- 3°) Prise en compte de $(Z_T + R)$ pour la suite des calculs
- 4°) Calcul de C en prenant pour nouvelle impédance $(Z_T + R)$ et f_o
- 5°) Calcul de L en prenant en compte Z_B et f_o

La figure 5c montre ce type de filtrage dans le cas où $A = -1,5 \text{ dB}$ et $f_o = 2,8 \text{ kHz}$.

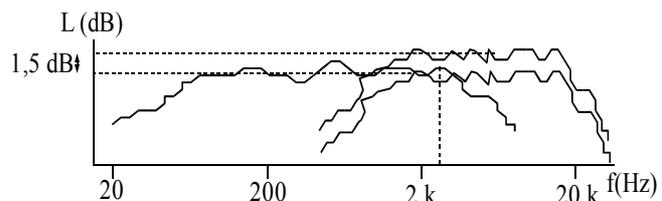


Fig.5c

5.4 Atténuation du tweeter à impédance constante, par réseau de résistances.

Dans le cas d'une atténuation à impédance constante, on utilise un réseau composé d'une résistance R_s en série sur un groupement formé par la mise en dérivation d'une résistance R_d sur le HP.

Les valeurs de R_s et R_d sont données par :

$$R_s = Z_{HP} \cdot (1 - 10^{\frac{A}{20}}) \quad R_d = Z_{HP} \frac{(Z_{HP} - R_s)}{R_s} \quad \text{où}$$

l'atténuation A est comptée négativement.

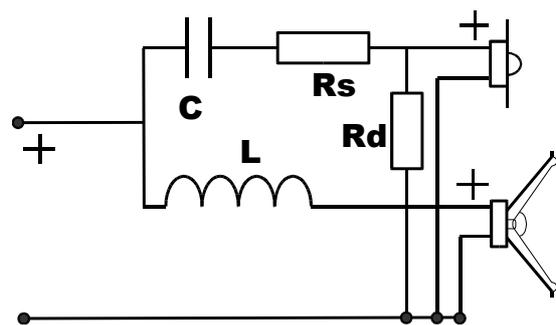


fig 5d

Compromis sur le filtrage du boomer-médium : L'adjonction d'une self a pour avantage de limiter en fréquence la réponse du BM tout en minimisant sa naturelle instabilité de membrane dans les deux derniers octaves de sa courbe de réponse (partie descendante). L'inconvénient est que l'extrême grave sera moins ferme, spécialement au voisinage des fréquences de résonance en raison de l'impédance de la self intercalée entre l'ampli et le BM. Cet inconvénient pousse certains concepteurs d'enceintes deux voies haut de gamme, à choisir de conserver l'instabilité de membrane, jugée moins critique, et à faire fonctionner le BM en large-bande avec un filtrage tweeter au premier ordre RC série.

5.5 Filtrage 2 voies 1er ordre avec BM monté en large-bande

Ce filtrage n'est possible que sur un BM dont la partie supérieure de la courbe de réponse n'est pas trop tourmentée du fait des instabilités de surface de la membrane. Il faut reporter sur un même graphe les courbes de réponse des deux HP et choisir l'atténuation et la fréquence de coupure en recherchant une courbe de réponse de l'enceinte la plus plate possible.

Inconvénients : on conserve les instabilités dues au BM dans la gamme des 4000-6000 Hz. et la puissance n'est pas rigoureusement constante au voisinage de la fréquence de coupure.

Avantages : on a une excellente tenue des graves, en particulier dans le cas d'un bass-reflex , un rendu beaucoup plus réaliste même à bas niveau et un étagement des plans sonores beaucoup mieux respecté. Ces avantages proviennent de ce que l'amplificateur est en prise directe sur le moteur du BM.

6 Etude de l'évent

Le principe physique d'une enceinte bass-reflex est comparable à celui d'un système constitué d'une main qui agiterait un ressort au bout duquel est suspendu une masse. On peut comparer le HP à la main, la raideur du volume d'air intérieur au ressort, et le comportement de l'air contenu dans l'évent à une masse. Helmholtz a le premier étudié les flacons de volume V se terminant pas une encolure de section S de longueur L , et déterminé que leur fréquence d'accord f est donnée par la

$$\text{formule } f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{L \cdot V}} \quad (\text{USI})$$

Choix du diamètre de l'évent. En fait, dans le choix précis du diamètre, réside la possibilité d'optimiser la réponse du HP (hors de portée de ce dossier). Pour simplifier, on prendra un diamètre d'évent un peu inférieur à la moitié de celui du BM, ce qui est très correct. Précisons s'il en était besoin que ces calculs ne concernent que le BM. Le tweeter, est clos à l'arrière (heureusement pour lui...) et son minuscule volume intérieur est calculé par le fabricant pour permettre son fonctionnement.

Calcul de la longueur théorique de l'évent L_e par la formule d'Helmoltz-Rayleigh-Snyder.

$$L_e = \frac{29830 \cdot S}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,825 \sqrt{S} \quad \text{où } L_e \text{ est obtenu en cm avec } S \text{ en cm}^2, f_b \text{ en Hz et } V_b \text{ en litres.}$$

Cette valeur théorique de L_e permet d'obtenir une courbe d'impédance $Z(f)$ où la résonance du HP est divisée en deux sommets d'égale amplitude. cette courbe idéale n'est cependant pas forcément la meilleure... Seuls les essais finaux nous le diront. On trouve habituellement des solutions intéressantes avec des événements 5 à 20 % plus longs que ceux prévus par la théorie. Il faut donc le prévoir à la découpe de l'événement.

Placement de l'événement : Aucune théorie vraiment claire là dessus. En théorie, les grandes longueurs d'ondes concernées ($>6m$) rendent le placement indifférent. En pratique, ne pas oublier que l'événement est le siège de turbulences violentes au voisinage de f_b . On peut donc l'éloigner mais un événement bas rend l'enceinte sensible au revêtement du sol. On peut aussi le mettre à l'arrière, dans l'axe du HP, comme c'est souvent le cas dans les enceintes de bibliothèques.

7 Etude de l'amortissement interne

Il est très rare qu'on arrive à déterminer du premier coup l'amortissement optimal pour une enceinte donnée. Il faut procéder par essais successifs en démarrant de configurations connues.

On utilisera de la laine de verre, de roche, du tissu, du papier de type essuie-tout, pas de polystyrène (ça chante...) les boîtes d'oeufs donnent des résultats variables, parfois intéressants souvent médiocres. Un constructeur d'enceintes utilise même le bull-pack avec des résultats réputés bons.

Le filtre de hotte aspirante, la laine sont intéressants, de même que la bourre d'oreillers en fibres synthétiques fines.

Ne pas remplir le volume intérieur d'une enceinte bass-reflex sous peine qu'elle ne fonctionne pas correctement (régime apériodique). On peut cependant se permettre un voile synthétique central (procédé courant dans les bas de gamme).

8 Rédaction d'un dossier de réalisation

8.1 Liste du matériel nécessaire

pour [] enceintes

Date :

<i>Matériel</i>	<i>Référence</i>	<i>Quantité</i>	<i>Prix Unitaire TTC (Euros)</i>	<i>Fournisseur / Rem</i>
Boomer				
Tweeter				
Cosse HP g.m				
Cosse HP p.m				
Visserie HP				
Panneau bois				
Visserie bois				
Colle bois				
Apprêt/impression				
Peinture				
Vernis				
Pâte à bois				
Agrafes				
Laine de verre				
Feutre				
Filtre poreux type hotte				
Mousse alvéolée				
Events				
F. Bananes mâles				
F. Bananes femelles				
Bornier bananes				
Résistances				
Selfs				
Condensateurs				
Cosses / F. bananes				
Câble interne enceinte				
Câble liaison ampli				
TOTAUX				

8.2 Fiche de débit ébénisterie

Découpe des panneaux.

Tracer sur toutes les faces concernées les lignes de vissage à 12 mm du bord et tracer les points de perçage régulièrement répartis. 1 trou tous les 12 cm suffira.

Perçage de toutes les faces à 4 mm, fraisage des trous (vis apparentes ou noyées ?)

Découpes circulaires des HP et évent en face avant, et du bornier en face arrière.

Dessins de construction.

8.3 Instructions d'assemblage

Vissage-collage des raidisseurs en croix avant montage.

On peut utiliser les chutes de découpes circulaires pour rigidifier l'intérieur de la face avant.

Montage face avant, latérales, sup et inf vissées, collées sous serre-joints.

Ponçage, peinture de l'enceinte.

Installation de l'amortissement (en priorité sur la face arrière à la hauteur du BM, le reste...)

Equipement de la face arrière (Montage du bornier + du filtre + conducteurs 1,5 à 2,5 mm² de liaison filtre-HP en prévoyant 10 cm en plus pour le futur montage...)

Montage vissé non collé ! de la face arrière avec éventuellement une feuille joint.

Connexion puis montage du TW puis du BM avec ou sans pâte à joint.

9 Phase de réglages finaux

Si le caisson par son volume et le réglage d'un éventuel évent, influence prioritairement la réponse dans les **graves**, l'amortissement interne influence à la fois l'acuité des résonances et l'impression subjective du **médium** alors que le filtrage, dans le cas d'une deux voies, ayant une fréquence de coupure comprise entre 4 kHz et 6 kHz, concernera prioritairement les **aiguës**.

L'équilibre général de l'enceinte s'appuie d'abord sur le réglage de ces trois paramètres. Tous trois sont subjectivement liés par l'effet de masque (un défaut flagrant, masque d'autres défauts plus légers).

Exemples :

- un médium terne et peu réaliste peut très bien provenir d'une courbe de réponse trop relevée dans les graves et les aigus, tout comme il peut provenir d'un amortissement mal réglé ou d'une enceinte pas assez profonde.

- un gonflement des basses peut provenir d'un réglage d'évent mal effectué, d'un volume trop petit ou d'une résonance de salle due à la combinaison de la mauvaise disposition des enceintes par rapport aux murs parallèles réfléchissants. Il peut aussi provenir d'ondes stationnaires internes dues à un mauvais amortissement ou à une ébénisterie pas assez rigide.

- un défaut de timbre dans les aigus doit être recherché en priorité dans le filtrage, en gardant à portée de main les courbes de réponse constructeur du boomer-médium et du tweeter (corriger l'atténuation ?; La fréquence de coupure ?, éventuellement la pente mais cela sortirait du cadre de ce dossier).

9.1 Mesures électroacoustiques faisables au labo Mavelec

Les mesures se font conventionnellement à 1 W ou à 2,82 V. Attention : le comportement global d'une enceinte n'est pas, comme on pourrait le penser, le même quelle que soit la puissance. Ne pas

hésiter à faire quelques mesures à faible puissance (0,5 W ou 0,25 W par exemple) et un ou deux essais en bruit filtré, à 2 W pour juger de la rigidité de l'ébénisterie ou du montage des HP.

Les grands fabricants d'enceintes et de haut-parleurs disposent généralement de chambres anéchoïdes dans lesquelles ils effectuent les mesures conjointes d'impédance Z (Ω) et de niveau de réponse L (dB) en fonction de la fréquence f (Hz) pour des valeurs s'étendant de 20 à 20000 Hz. Les graphes sont généralement fournis sur papier semi-log à 3 modules en abscisse.

Les fabricants ne disposant pas de telles chambres anéchoïdes, comme c'est notre cas, ont le choix de combiner deux types de mesures :

- Les mesures en caisson acoustique (chambre anéchoïde de petites dimensions). Ces mesures ont l'avantage d'éliminer les fréquences de résonance dans le médium, et l'inconvénient de n'être pas fiables dans les basses fréquences pour lesquelles la longueur d'onde du signal dépasse les dimensions du caisson.

On les utilise au dessus de 500 Hz, pour vérifier si la transition BM/TW a été convenablement réalisée.

- Les mesures en milieu semi-réverbérant, (n'importe quelle pièce convenablement amortie, l'idéal étant de faire ces mesures dans le lieu d'écoute définitif).

On mesure $L(f)$ en tiers d'octave en bruit rose. (Placer l'enceinte sur des pieds de telle façon que l'axe du tweeter soit à 90 cm du sol environ) Ces mesures nécessitent un étalonnage du système d'acquisition visant à faire apparaître les défauts de la pièce. On évitera ensuite de déplacer la source et le récepteur. On effectue ensuite les mesures L (dB C) en fonction de f (Hz) . On verra apparaître les fréquences de résonance de la pièce, qu'il suffira ensuite de prendre en compte dans les mesures ultérieures. Ces mesures sont faciles à mettre en oeuvre mais peu précises dans les basses fréquences.

Les mesures portent sur la partie haute de sa bande passante. Il faut disposer du document constructeur établi dans les conditions normalisées donnant la courbe de réponse de référence et opérer une contre-mesure dans le laboratoire pour des fréquences allant de 2000 à 20000 Hz, sur le haut-parleur monté dans l'enceinte étudiée La comparaison des deux courbes permettra d'étalonner notre système de mesures tout en constatant l'influence de la pièce et de l'enceinte.

9.2 Choix des pistes à écouter

Signalons d'entrée l'excellent CD Test n°11 supplément à la nouvelle Revue du Son n° 226 S de janvier 1999. Il contient :

6 prises de sons stéréo de référence, de morceaux classiques.

3 enregistrements : stéréo, gauche, droite du même morceau.

17 plages test de bruit filtré en tiers d'octave espacées d'un tiers d'octave $L = -11$ dB g+d $t = 10$ s

$f \in [20 ; 800]$ Pratique pour les mesures en milieu semi-réverbérant et efficace pour tester la rigidité des ébenisteries à 1 W

32 plages sinusoïdales espacées d'un tiers d'octave, $L = -11$ dB g+d $t = 1$ min $f \in [16 ; 20000]$

2 plages de bruit de surface de disque vinyles spécial « amateurs éclairés de l'époque 33tours».

Pour les autres CD, choisir des morceaux contenant

- des jeux de basse riches et variés (électriques et acoustiques)
- des voix diverses et des applaudissements (pour le rendu général des timbres)
- des percussions (pour avoir une idée des qualités impulsives)

Eviter les enregistrements techno ou rap qui ne sont pas forcément issus d'une prise de son, qui sont informatiquement travaillés souvent de façon grossière et dont les timbres artificiels et l'absence de réel étagement des plans sonores, sont audiophilement sans intérêt et apportent peu de

renseignements sur les qualités et les défauts des enceintes étudiées.

9.3 Importance des câbles

L'importance des câbles n'apparaît que lorsqu'on a déjà atteint une certaine transparence dans le système.

La qualité d'un système câble/fiches est lié à sa conductance et à son pouvoir de transmission des transitoires.

Les câbles multibrins sont réputés donner de meilleurs résultats que les monobrins et les fiches bananes plaquées or de meilleurs contacts que les fiches bananes industrielles étamées ou inox... mais le débat est loin d'être clos. Le mieux sera donc de faire soi même les essais suivis d'écoutes attentives, pour choisir les câbles qui donneront les meilleurs résultats.

L'expérience prouve qu'il faut prendre en compte également l'amplificateur et sa «personnalité propre» .

9.4 Positionnement des enceintes pour l'écoute

- Possibilité de mettre les enceintes près d'un mur plutôt réfléchissant, et le fauteuil plutôt dans un lieu absorbant ou diffractif.
- Enceintes plus ou moins pincées vers le point d'écoute ou bien parallèles ?
- Valeur de l'entraxe ? (entre 2 et 3 m pour une distance d'écoute de 2,50 m ?)
- Dégagement par rapport au mur arrière ? (30 cm ?)
- Amortissement du socle et/ou découplage des pieds (pointes, patins) ?

9.5 Ecoute puis retouche éventuelle de l'amortissement

Retouche de l'amortissement trop => son terne pas assez => possibles ondes stationnaires
Attention : une diminution de l'amortissement peut obliger à raccourcir l'évent dans le cas d'un bass-reflex.

9.6 Ecoute puis réglage de l'évent

9.7 Ecoute puis retouche éventuelle du filtre

9.8 Reprise éventuelle de la procédure -> 9.4

10 Dossier de réalisation : enceintes PPCP 1PMAE 2002-2003

10.1 Cahier des charges

Ces enceintes, au nombre de 12, feront partie de systèmes 5.1.

Elles sont destinées à équiper les auditoriums de travail de la section Mavelec, dans lesquels les élèves effectuent les tests des systèmes étudiés.

10.2 Choix du type d'enceinte

La gamme de volumes donnée rend plus adéquat l'emploi du bass-reflex

A la fois pour des raisons esthétiques et pour ne pas poser de problèmes de placement au mur, on opte pour le bass-reflex avant.

Dans le but d'innover un peu, on choisit de positionner le tweeter de façon centrale selon une configuration chère à M. Lapp, un avantage accessoire de cette configuration étant d'éloigner l'évent du boomer, un autre avantage étant de resserrer la source.

10.3 Choix des transducteurs

Une première série de calculs a été menée pour tenter d'utiliser le W 170 S de Visaton.

Les calculs de S en bass-reflex ont montré que le W 170 S était difficilement utilisable en dessous de 40 L, en tout cas loin de la gamme des 6 à 20 Litres qui nous concerne.

Nous avons donc décidé d'utiliser le transducteur de qualité équivalente, immédiatement inférieur dans la gamme des diamètres c'est à dire le boomer medium Visaton W 130 S 8 Ω . $P_0 = 50$ W

Le tweeter est un Audax TW010E1 8 Ω série économique à dôme polymère, $P_0 = 25$ W qui se différencie du TW010F1 par la forme de sa face avant, E1 = carrée, F1 = circulaire.

Les puissances nominales de ces transducteurs sont suffisantes pour l'application envisagée.

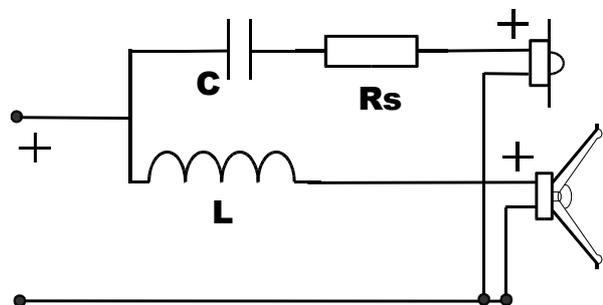
10.4 Calcul du filtre 2 voies

On choisit d'utiliser un filtrage au premier ordre avec atténuation par résistance série.

10.4.1 Détermination de f_0

La superposition des courbes de réponse donne : $f_0 = 6000$ Hz. (Le léger défaut de la courbe de réponse du boomer permettrait même de couper le tweeter vers 6500 Hz).

On lit, de même, sur les courbes, que le niveau de réponse du tweeter (91 dB) est supérieur de 1 dB à celui du boomer (90 dB) (donc $A = -1$) et que à 6000 Hz, $Z_B = 13 \Omega$ et $Z_T = 6,3 \Omega$.



10.4.2 Calcul de R_s

La formule utilisée $R_s = Z_{HP} \cdot (10^{-\frac{A}{20}} - 1)$ avec $A = -1$ donne $R_s = 6,3 (10^{0,05} - 1)$

$R_s = 0,77 \Omega$. On choisira $R_s = 0,82 \Omega$, valeur la plus proche dans la série E6

10.4.3 Calcul de C

On simplifie le calcul en considérant que l'impédance du groupement Tweeter + $R_s = 7,1 \Omega$ (Ce calcul suppose qu'on puisse négliger la partie réactive de l'impédance du tweeter, ce qui est discutable, et nous obligera probablement à retoucher C à la baisse). la formule générale donnant la

valeur de C pour le filtrage au premier ordre recherché, est $C = \frac{1}{2 \pi Z f}$. (USI)

Cela donne $C = 3,74 \mu\text{F}$. On prendra $C = 3,3 \mu\text{F}$

10.4.4 Calcul de L

La formule générale $L = \frac{Z}{2 \pi f}$ (USI) donne $L = 0,34 \text{ mH}$ On prendra $L = 0,33 \text{ mH}$ quitte à diminuer encore la valeur de C à $3 \mu\text{F}$ si les écoutes en montrent la nécessité.

La fiche de débit qui suit est calculée par les élèves dans le cadre des activités géométriques et du PPCP en cours de maths, puis mise au propre par un petit groupe.

10.8 Calcul de l'évent

Le volume intérieur est donné par $V_b = l_{int} \times h_{int} \times p_{int}$ en négligeant le volume pris par l'évent.

où $l_{int} = 138 \text{ mm}$ $h_{int} = 362 \text{ mm}$ $p_{int} = 166 \text{ mm}$. cela donne $V_b = 8,29 \text{ L}$.

Le choix du diamètre de l'évent est en rapport avec celui du HP. On choisit un petit évent de diamètre intérieur $3,2 \text{ cm}$ ($S_v = 8 \text{ cm}^2$).

Les calculs de mise en enceinte bass-reflex conduisent à $f_b = 60 \text{ Hz}$ (fréquence de résonance du HP monté en enceinte bass-reflex).

La formule d'Helmoltz-Rayleigh-Snyder, qui est $L_v = \frac{29830 S_v}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,825 \sqrt{S_v}$ avec L_v en cm, S_v

en cm^2 V_b en Litres et f_b en Hertz, donne $L_v = 5,7 \text{ cm}$.

Cependant, ce calcul ne nous donne qu'une borne inférieure, car

1/ Nous ne savons pas encore la quantité d'absorbant acoustique que nous allons devoir utiliser.

2/ L'adaptation des enceintes à leur auditorium nécessitera des retouches de L_v .

En conclusion, l'évent Visaton BR 6.8 dont la longueur nominale est de $6,5 \text{ cm}$ devrait convenir pour commencer.

10.5 Liste du matériel nécessaire**Date****pour [12] enceintes**

Matériel	Référence	Quantité	Prix Unitaire TTC (Euros)	Fournisseur / Rem
Boomer 8 Ω	Visaton W 130 S	12	30,00	Sté xxxx Besançon
Tweeter 8Ω	Audax TW010 E1	12	12,00	Sté yyyyy Besançon
Cosse HP g.m		24		
Cosse HP p.m		24		
Visserie HP Boomer	4 × 20 tête hom	70		
Visserie HP Tweeter	3 × 20 tête hom	50		
Visserie bois	4×20 tête fraisée	100		
Colle bois				
Panneau bois	Agglo 19 mm			
Apprêt/impression				
Peinture				
Vernis				
Pâte à bois				
Agrafes				
Laine de verre				
Feutre				
Filtre poreux type hotte				
Mousse alvéolée				
Events	Visaton BR 6.8	12	02,00	
F. Bananes mâles				
Bornier bananes	Visaton ST 77	12	09,00	
Résistances				
Selfs				
Condensateurs				
Cosses / F. bananes				
Câble interne enceinte				
Câble liaison ampli				
TOTAUX				

Commande de matériel pour le PPCP 1 PMAE 2002-2003

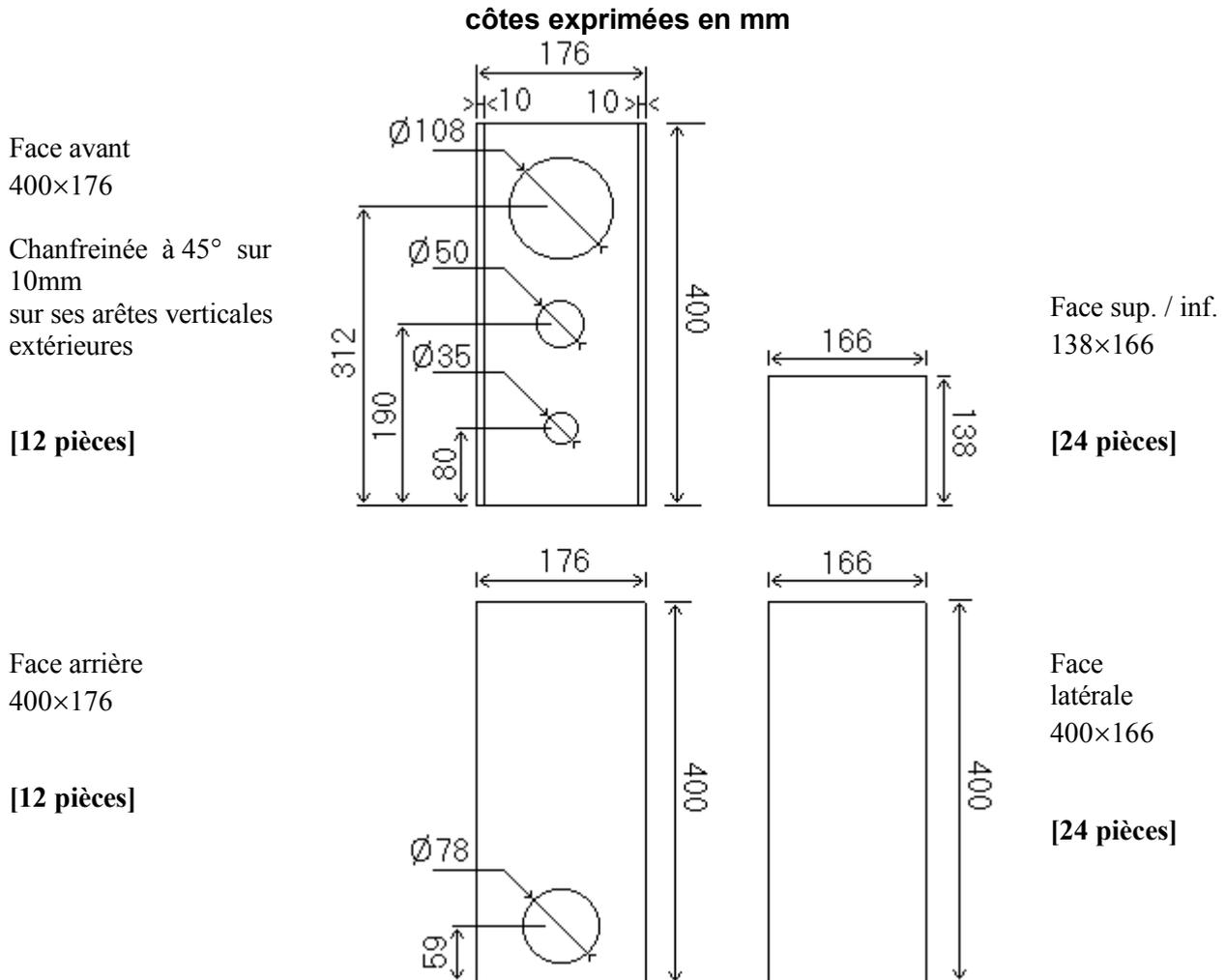
(Remises de 15 % du fournisseur Microprocessor déjà déduites.)

Matériel	Marque	Modèle	Référence	P. U. HT	Quantité	P. Tot HT	Fournisseur
Boomer	Visaton	W130S 8 ohms	Ref : 9023	22.03	12	264.36	Microprocessor
Tweeter	Audax	TW010E1 8 ohms		10.00	12	120.00	Radiospares
Cosse HP		4,8 mm			100	5.53	Reboul
Cosse HP		2,8 mm			100	4.87	Reboul
Events	Visaton	BR 6.8	Ref : 5212	1.35	12	16.20	Microprocessor
Bornier	Visaton	ST 77	Ref : 5183	6.28	12	75.36	Microprocessor
Résistances	7 Watts	0,82 ohms	RB 57082	0.80	12	9.60	Reboul page 47
Sels	Visaton	0,33mH à air	Ref : 4995	1.24	12	14.88	Microprocessor
Condensateurs	MKT	2,2 micro F		0.80	12	9.60	Reboul page 48
Condensateurs	MKT	1 micro F		0.40	12	4.80	Reboul page 48
Totaux HT	525.20	Taxe 19,6 %	102.94	Totaux TC	628.14	Euros	

10.6 Fiche de débit et de découpe des panneaux

Total à réaliser : 12 enceintes identiques 8 Litres 2 voies bass-reflex pour systèmes 5.1

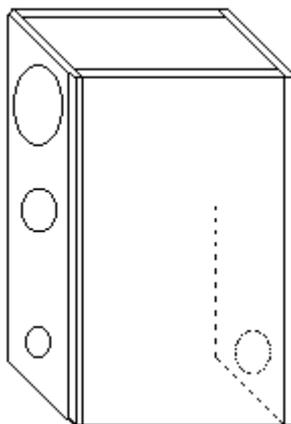
Matériau : aggloméré ou médium $e = 19 \text{ mm}$ (épaisseur critique)



10.7 Instructions d'assemblage

Schéma d'assemblage

Face avant,
faces latérales,
face supérieure et
face inférieure
collées et vissées.



Face arrière
uniquement
vissée afin de
permettre le
démontage.

Nomenclature des éléments implantés

Élément	Marque	Implantati on sur la face	Référence	∅ découpe (mm)	Côte du centre (mm)	∅ extérieur de l'élément (mm)
BM	Visaton	Avant	W 130 S 8Ω	108	312	146
TW	Audax	Avant	TW 010 E1 8Ω	50	190	60/69,7
Évent	Visaton	Avant	BR 6.8 art 5212	35	80	42,5
Bornier	Visaton	Arrière	ST 77 art	78	59	104

Caractéristiques du W 130 S

Membrane cellulose enduite, suspension caoutchouc, bobine 25 mm

Po = 50 W Pmax = 80 W Zo = 8 Ohms Rdc = 6,0 Ohms

SD = 79 cm² mmd = 6,2 g Bl = 3,60 N/A L = 0,61 mH

fr = 49 Hz Qts = 0,43 Vas = 15 L Vb optimal théorique (20.Vas.Qts^{3.3}) = 19 L

Calculs de la mise en enceinte Bass-reflex du W 130 S avec ENCEINTE.EXE

Coeff surtension S =	2.2	2.5	2.9	5.7	8
Volume Vb (L)	6	7	8	16	22
f _{-3dB} inf. (Hz)	73	69	65	48	41
f _b (Hz)	65	62	60	48	43
L évent Dint = 4,4 cm	14,5	13,5	12,7	9,0	7,6