

Emmanuel MULLER

Diplôme Professionnel Son 2^{ème} Année

2007-2008

Conception et réglage d'une enceinte acoustique



SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
I / RAPPEL THÉORIQUE	3
1) Le Haut parleur	3
2) Principe de l'enceinte acoustique	7
3) Paramètre TS	9
4) Calcul de l'enceinte close	13
II/ UNE ENCEINTE 2 VOIES	14
1) Théorie : couplage de deux haut-parleurs	14
2) Modification du filtre	16
3) Le bass-reflex	18
III/ UN CAISSON DE BASSE	20
1) Le pavillon acoustique	20
2) Le pavillon arrière	24
IV/ UN SYSTEME MULTIAMPLIFIE	30
1) Filtrage actif	30
2) Remise en phase	33
SOURCES, BIBLIOGRAPHIE	37
ANNEXES	38

INTRODUCTION

L'enceinte acoustique est le dernier élément que le sonorisateur peut contrôler, par son placement ou sa conception.

Une fois le son émis, les éléments influant sur l'écoute, tels que l'architecture de la pièce ou les conditions climatiques, ne sont plus de son ressort.

Pour parer d'éventuels problèmes, il devra modifier le signal envoyé vers les enceintes.

Il est donc important de connaître les règles de conceptions d'une enceinte, pour l'amateur souhaitant en construire bien évidemment, mais aussi pour un technicien qui est amené à acheter, réparer ou calibrer un système de diffusion.

Cependant, la conception d'enceintes de qualité demeure une science expérimentale.

D'une part parce que les phénomènes intervenant n'ont pas encore été suffisamment étudiés, tant au niveau de l'acoustique, du fonctionnement électromagnétique du haut parleur ou de la perception et l'interprétation des sons par l'auditeur.

D'autre part, les conditions optimales n'étant jamais réunis hormis peut être dans quelques laboratoires d'acoustiques suréquipés et les paramètres contrôlables souvent restreints, la sensation sonore produite par un système de diffusion est difficilement prévisible par la théorie seulement.

La recherche des réglages optimaux implique donc une étape d'essai.

Il serait prétentieux de croire que l'oreille humaine est plus précise qu'une mesure rigoureuse, mais seule l'écoute permet de synthétiser tous les phénomènes et leurs interactions afin de juger de la qualité du rendu sonore.

C'est pourquoi la plupart des sonorisateurs considèrent que l'écoute est le principal instrument de réglages d'un système de diffusion.

Le lecteur trouvera ici les bases nécessaires au calcul d'une enceinte acoustique, ainsi que le minimum d'explication pour manipuler correctement ces outils, sans rentrer dans les plus fines subtilités.

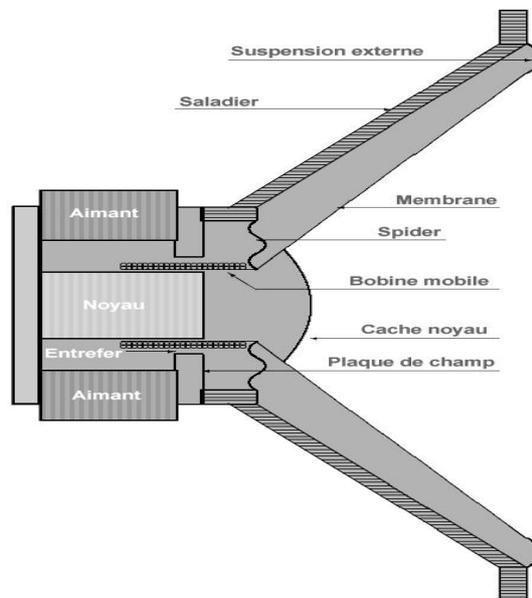
J'espère ainsi lui permettre d'entreprendre sa propre expérimentation et inciter les plus curieux à approfondir les différents sujets abordés ici.

Rappels théoriques

Le haut parleur

Le haut parleur électrodynamique, le plus couramment utilisé, est constitué d'une membrane reliée mécaniquement à une bobine qui est plongée dans un champ magnétique, c'est-à-dire entourée d'un aimant.

La membrane est reliée par des suspensions aux autres parties du haut parleur.



Lorsque l'on envoie un signal alternatif aux bornes de la bobine, celle-ci avance et recule sur son axe en entraînant la membrane. C'est la vibration de la membrane qui produit le son.

Le haut parleur est donc un des éléments les plus importants dans la chaîne de diffusion sonore puisque c'est lui qui transforme le signal électrique en vibration acoustique.

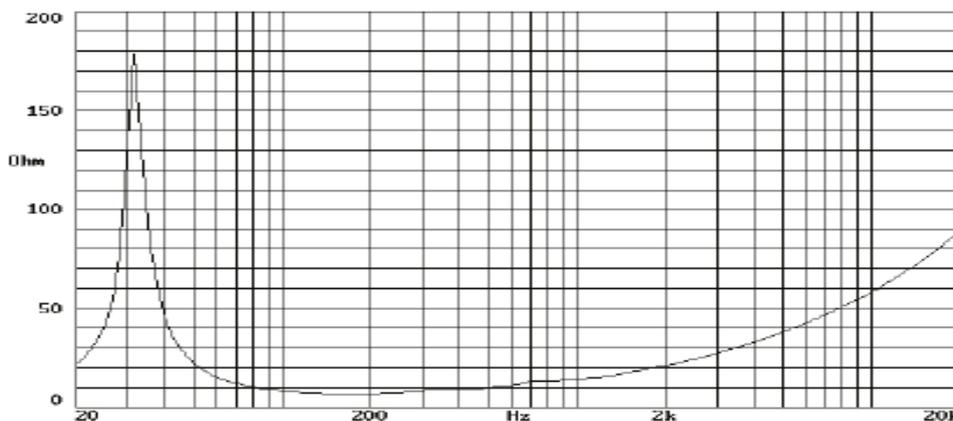
Les matériaux et les technologies employés pour sa constitution influent sur ses caractéristiques électromagnétiques et mécaniques qui déterminent ses performances.

Impédance Z en Ohms Ω :

La courbe d'impédance d'un haut parleur représente sa résistance électrique en fonction de la fréquence.

Dans le cas d'un HP électrodynamique, elle sera de la forme :

FREE AIR IMPEDANCE CURVE



On sait que la bobine dans le champ magnétique exerce une force lorsqu'elle est traversée par un signal électrique, mais elle produit inversement un signal électrique lorsqu'on lui soumet une force :

Une force est un concept physique qui représente l'origine d'une modification de mouvement. En gros la bobine « pousse » la membrane lorsqu'on lui envoie un signal. Mais si on pousse la membrane, la bobine envoie un signal, c'est le principe du microphone électrodynamique.

Or les suspensions de la membrane, ainsi que la membrane du HP elle-même, ont une certaine élasticité qui va provoquer une force inverse au déplacement de la membrane et donc un signal aux bornes de la bobine. C'est cette réaction qui entraîne ce pic d'impédance important dans les basses fréquences.

La fréquence pour laquelle l'impédance est à son point culminant est appelé fréquence de résonance F_s .

C'est une caractéristique fondamentale du HP car elle détermine sa fréquence de coupure c'est-à-dire sa limite de fonctionnement dans le grave.

Ce que l'on appelle couramment « l'impédance d'un HP » est la valeur minimale de l'impédance, ici 8Ω , dans la zone quasi plane qui détermine aussi le domaine d'utilisation du haut-parleur, ici environ 50Hz - 2KHz.

Rendement, sensibilité et puissance :

Le rendement est le rapport entre la puissance acoustique émise par le haut parleur et la puissance électrique qu'on lui a fournit.

Le plus souvent, se rapport est de l'ordre de quelques pourcents.

La sensibilité est le niveau acoustique mesuré à 1m pour un signal de 1W aux bornes du HP.

Cependant, il est difficile d'obtenir 1W à toutes les fréquences en raison des variations d'impédance du HP (on rappelle que $P=U^2/R$). C'est pourquoi on mesure la sensibilité pour une valeur de tension fixe aux bornes du HP plutôt qu'une valeur de puissance.

On choisit 2,83V car $2,83^2/8=1W$ pour un HP de 8Ω

La sensibilité s'exprimera alors en dB/2,83V/1m

La puissance d'un HP est le nombre de Watt admissibles par celui-ci.

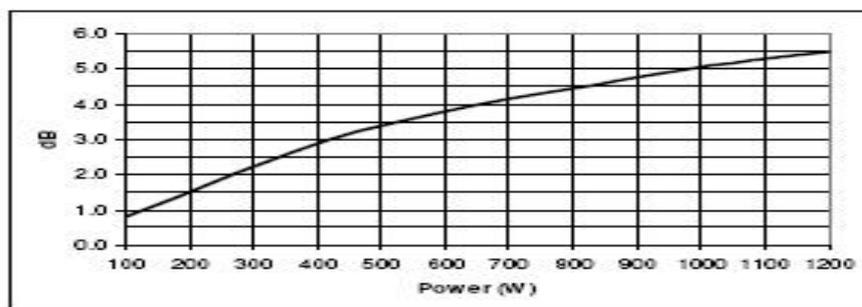
On rappelle que pour augmenter le niveau sonore de 3dB, il faut doubler la puissance acoustique, pour 6dB il faut donc la quadrupler.

C'est pourquoi, un HP de 1200W ayant une sensibilité de 92dB/2,83/m

Ne fera jamais plus de son qu'un HP de 300W à 98dB/2,83/m

Il faut savoir également que tous les hauts parleurs ont un effet de compression, c'est à dire une perte de sensibilité lorsque la puissance fournie augmente.

POWER COMPRESSION LOSSES



Note: These losses are calculated from a five minutes AES power test applying band limited pink noise (50-500 Hz). The loudspeaker is free-air standing.

Faisons un calcul rapide, disons que ces deux HP ont la même courbe de compressions (celle-ci-dessus, trouvée sur internet) :

Nous avons la sensibilité à 1W

Sachant que 2W=+3dB 4W= +6db 8W=+9dB etc...

300W=+24,8dB

1200W=+30,8dB

Donc l'enceinte de 300W à 98dB/W/m avec 2,5dB de pertes dues à la compression,

Donnera au maximum 120,3dB

L'enceinte 1200W 92dB/W/m et 5,5dB de compression donnera au max 117,3dB

Dans ce cas, l'enceinte de 300W sonne simplement deux fois plus fort que celle de 1200W, et avec un ampli quatre fois moins puissant !

Cette caractéristique de puissance est pourtant souvent mise en avant par les revendeurs.

C'est qu'il est surement plus aisé pour le constructeur de doubler la puissance admissible par le HP que de doubler sa sensibilité. De plus, il est connu que le watt est une unité de puissance, un HP de 500W paraît alors « plus puissant » qu'un HP de 200W pour un public non averti.

Nous venons de voir qu'il n'en est rien.

Pire encore, à cause des pertes de compression, le rendement du HP n'est plus tout à fait linéaire en fonction de la puissance admise.

C'est pourquoi, il faut toujours privilégier la sensibilité.

En gros, pour un HP donné, on aura plus de niveau sonore avec un HP deux fois moins « puissant » mais deux fois plus sensible.

Paramètres Theile&Small

La plupart des constructeurs fournissent avec leur HP une batterie de paramètres normalisés, appelés paramètres Theile&Small, du nom de deux expérimentateurs qui ont modélisé mathématiquement le comportement du haut parleur électrodynamique.

Ces données nous permettent véritablement de nous faire une idée des performances du HP, et servent à choisir et à calculer les caractéristiques de l'enceinte appropriée.

Les formules reliant ses différents paramètres permettent de calculer des données manquantes. Et même lorsque l'on a tout les renseignements voulus, on peut dans un premier temps recalculer les paramètres entre eux pour vérifier la pertinence des données du constructeur.

De plus chaque HP admet des tolérances de fabrication et les données fournis sont souvent des moyennes sur plusieurs HP d'un même modèle.

Les plus méfiants pourront, avec un minimum de matériel et de rigueur, effectuer eux même les mesures de ces paramètres (voir annexe 3).

Re : C'est la résistance de la bobine au courant continu

Le : L'inductance de la bobine

Qms : coefficient de surtension mécanique

Qes : coefficient de surtension électrique

Une résistance en série, due à un filtre passif ou un ampli avec un facteur d'amortissement faible, modifie ce paramètre en

$Qes' = Qes * (Re + R) / Re$ avec R la résistance adjointe

Qts : coefficient de surtension total

$$Qts = Qms * Qes / (Qms + Qes)$$

Attention à répercuter l'éventuelle modification du Qes

Sd : C'est la surface émissive de la membrane

Xmax : c'est l'élongation maximale de la membrane

Cms : La compliance de la suspension, c'est-à-dire l'inverse de la raideur

$$Cms = Vas / [\rho * (c * Sd)^2] \quad (\text{voir plus bas})$$

Mms : la masse en mouvement du haut parleur, c'est-à-dire la masse de la bobine+ masse de la membrane+ réactance du rayonnement de l'air

Fs : c'est la fréquence de résonance du haut parleur

$$F_s = 1/[2 * \pi * \sqrt{(M_{ms} * C_{ms})}] \quad \text{ou} \quad F_s = \sqrt{(K/M_{ms})}/2 * \pi$$

avec K la raideur de la suspension en $N.m^{-1}$ ($\alpha \text{ Kg.s}^{-2}$)

BL : coefficient de couplage électrodynamique exprimé en $N.A^{-1}$, il représente la force produite par la bobine lorsque l'on impose un ampère à ses bornes.

$$BL = \sqrt{(2 * \pi * F_s * M_{ms} * Re / Q_{es})}$$

On remarque que le coefficient **BL / Mms**, qui est l'accélération de la membrane pour un ampère aux bornes de la bobine, est lié à la sensibilité du haut parleur (voir annexe).

Vas : c'est le volume d'air équivalent à l'élasticité de la suspension.

Sachant que l'air est un fluide qui a une certaine élasticité, il faut un certain volume d'air pour obtenir une élasticité égale.

Dans la littérature technique, on trouve la formule

$$V_{as} = (\rho/M_{ms}) * [(c * S_d)/(2 * \pi * F_s)]^2 \quad \text{avec } \rho \text{ la masse volumique de l'air} = 1,2 \text{ Kg.s}^{-2}$$

Avec $F_s = \sqrt{(K/M_{ms})}/2 * \pi$ on obtient :

$$V_{as} = (\rho / K) * (c * S_d)^2 \quad \text{ou} \quad V_{as} = C_{ms} * \rho * (c * S_d)^2$$

On constate que cette formule est homogène et que lorsque la raideur K diminue (cad. l'élasticité augmente) le volume V_{as} est plus grand

Pour vérifier les tolérances de fabrication, on peut calculer ces deux facteurs qui se révèlent plus constants entre les différents HP :

$$F_s / Q_{es} = BL^2 / (2 * \pi * Re * M_{ms}) \quad \text{et}$$

$$V_{as} * Q_{es}^2 = Re^2 * M_{ms} * S_d^2 * \rho * c^2 / BL^4$$

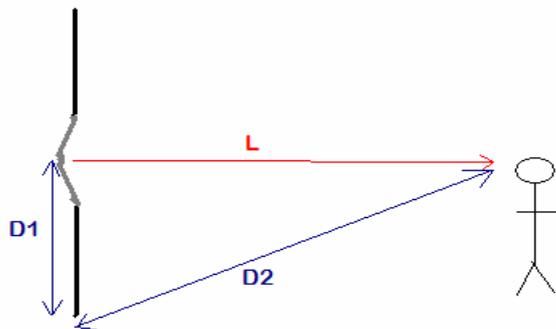
Principe de l'enceinte acoustique

La première et principale fonction d'une enceinte est de séparer l'onde avant et l'onde arrière du haut parleur.

Lorsque la membrane du haut parleur avance, il apparaît une zone de pression devant lui qui va se propager, c'est le son. Dans le même temps, une zone de dépression va se créer derrière la membrane entraînant une onde en opposition de phase. Lorsque cette onde arrière interfère avec l'onde avant, il se produit **un court circuit acoustique** qui se traduit par une perte de niveau en dessous d'une certaine fréquence. Cette fréquence dépend de la différence de parcours D entre l'onde avant et l'onde arrière.

$$F_{cc} = c / (2 * D) \quad \text{ou} \quad D = c / (2 * F_{cc})$$

L'idée la plus simple est alors d'encastrer le haut parleur dans un plan dont la dimension sera facilement calculée en fonction de la longueur d'onde émise par le haut parleur.



$$D2 = \sqrt{L^2 + D1^2}$$
$$D = D1 + \sqrt{L^2 + D1^2} - L$$

Pour simplifier les calculs, on prendra le cas où l'auditeur est très éloigné du HP, D1 est alors négligeable devant L et on peut approximer $D = D1$.

C'est aussi le pire cas pour nous puisque F_{cc} diminue lorsque L diminue

$$\text{Reprenons } D = c / (2 * F_{cc}) \quad \text{Avec } c = 343,4 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et } F_{cc} = 50\text{Hz} \quad D = 3,34\text{m}$$

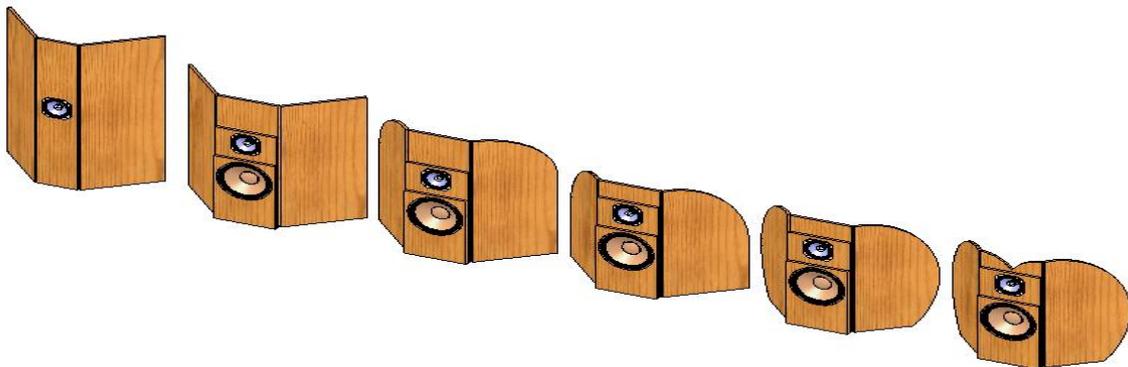
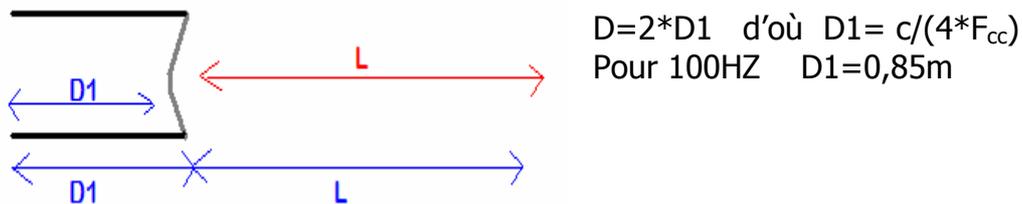
$$\text{Avec } F_{cc} = 20\text{Hz} \quad D = 8,59\text{m}$$

Ce qui veut dire que pour s'affranchir du court circuit acoustique à 20HZ avec un HP de 46cm, le plus petit baffle possible sera un disque de plus de 17m de diamètre !

On comprend vite que cette solution est difficilement réalisable pour les basses fréquences.

Cependant, à 5KHz $D=3,43\text{cm}$, on voit qu'avec une membrane de 1,5" on élimine déjà suffisamment le court circuit acoustique. Ce problème ne se posera donc pas pour les hautes fréquences.

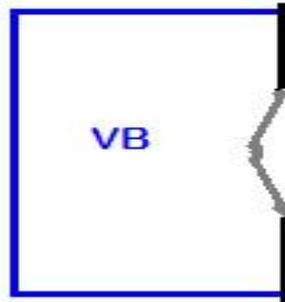
Certaines enceintes hifi utilisent cette solution en repliant le baffle en arrière pour doubler la différence de parcours.



Cela reste des constructions « faites maison » par des passionnés.



La plupart du temps, on place **une enceinte close** derrière le haut parleur afin d'empêcher le court circuit acoustique en utilisant un baffle de plus petite dimension.



Cependant, le volume d'air enfermé dans l'enceinte va altérer les mouvements de la membrane et va donc modifier le comportement du haut parleur.

On peut répercuter cette modification sur les paramètres T&S.

Les paramètres à prendre en compte dans une enceinte close deviennent FC, QMC, QEC, QTC

Soit $\alpha = \sqrt{[(V_{as} / V_B) + 1]}$ avec V_B le volume intérieur de la boîte

$$FC = F_s * \alpha$$

$$QMC = Q_{ms} * \alpha$$

$$QEC = Q_{es} * \alpha$$

$$QTC = QMC * QEC / (QMC + QEC) = Q_{ts} * \alpha$$

On démontre mathématiquement que $\alpha > 1$, donc tous ces paramètres vont être augmentés. Et ils le seront d'autant plus que V_B est petit par rapport à V_{as} .

C'est particulièrement gênant pour la fréquence de résonance qui va remonter la fréquence de coupure basse de l'enceinte.

L'idée de **l'enceinte infinie** est d'utiliser un V_B très grand (plusieurs m^3) afin de se rapprocher du comportement du haut parleur à l'air libre.

Interprétation du terme alpha :

En fait, l'air contenu dans le volume clos va s'opposer aux mouvements de la membrane, tout comme les suspensions.

On a donc la raideur totale k_{TOT} du système suspensions+«air dans l'enceinte»

$$k_{TOT} = k_{SUS} + k_{AIR} = (1 + k_{AIR} / k_{SUS}) k_{SUS}$$

Or on sait que la raideur d'une quantité d'air est inversement proportionnelle à son volume $k_V = \gamma * P_0 * S^2 / V$ avec P_0 la valeur moyenne de la pression et S la surface en mouvement. γ est une constante qui dépend de la nature moléculaire du gaz. Pour un gaz diatomique comme l'air il vaut 1,4.

Donc $k_{TOT} = (1 + V_{SUS} / V_{AIR}) k_{SUS}$

V_{SUS} n'est autre que V_{AS} et V_{AIR} est le volume de l'enceinte.

D'où $k_{TOT} = \alpha^2 * k_{SUS}$

J'en déduis que les termes précédents sont proportionnels à \sqrt{k} .

*Avec les formules des paramètres T&S on remarque $V_{AS} = (\rho / k) * (c * S d)^2$ d'où $k = (\rho / V) * (c * S)^2$ On voit apparaître la vitesse du son, ce qui n'est pas étonnant puisqu'il s'agit de la vitesse de transmission d'une variation de pression dans l'air.*

*On a aussi $c = \sqrt{\gamma * P_0 / \rho}$ qui dépend des conditions climatiques (P_0 et ρ) et de la nature du gaz γ .*

Réverbérations à l'intérieur du volume clos :

D'autre part, La membrane du haut parleur est plus ou moins perméable pour le son. Les réverbérations de l'onde arrière peuvent donc polluer le son émis par le hp.

Pour atténuer les réverbérations et les ondes stationnaires à l'intérieur de l'enceinte, il faut éviter les angles droits et les dimensions égales.

J'ai trouvé ces proportions proposées par un audiophile sur internet, qui peuvent servir de base de travail.

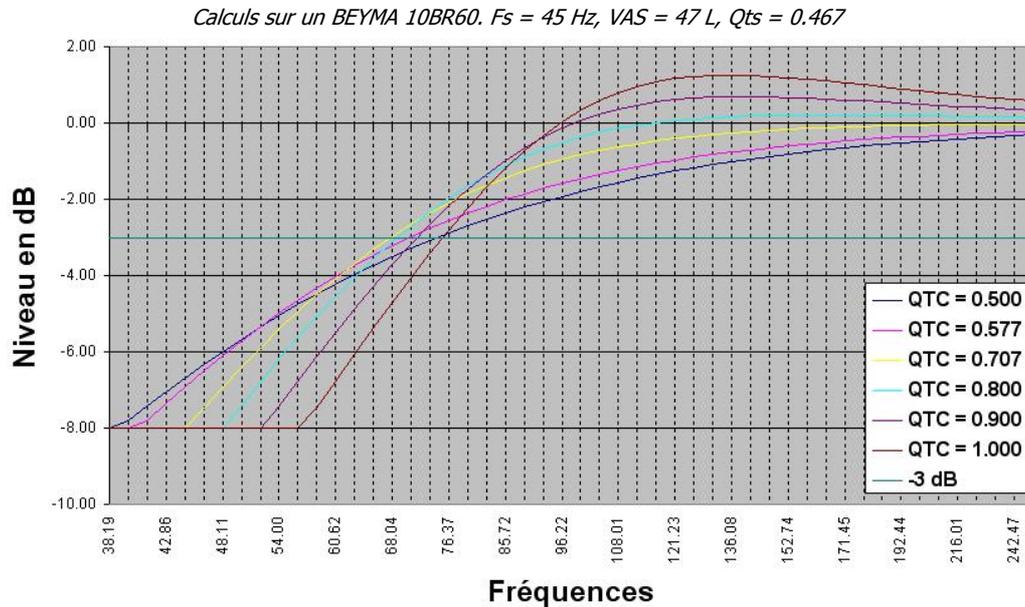
X	Y	Z
1.000	1,202	1,435
1.000	1,260	1,587
1.000	1,401	1,863

On peut également capitonner l'intérieur de l'enceinte avec un matériau absorbant comme de la laine de roche.

Calcul de l'enceinte close

On peut représenter l'action du volume clos sur le fonctionnement d'un haut-parleur par le QTC qui dépend du rapport V_{as}/V_B .

Plus l'enceinte est volumineuse, plus le QTC sera petit.



On observe bien une remontée de la fréquence de coupure pour des petits volumes d'enceinte ainsi qu'un pic de sensibilité pour les $Q_{TC} > 0,7$

La fréquence de ce pic est : $F_{PIC} = F_C / \sqrt{1 - 1/2Q_{TC}^2}$

Sa valeur en dB : $10\text{Log}[Q_{TC}^4 / (Q_{TC}^2 - 0,25)]$

La fréquence de coupure à -3dB $F_{-3dB} = F_C * \sqrt{[(Q_{TC}^2 - 2 + \sqrt{(Q_{TC}^2 - 2)^2 + 4}) / 2]}$

Le rendement dans l'enceinte close est donné par $RB = 4\pi^2 / c^3 * V_{as} / Q_{ts} * F_{-3dB}^3$

Une enceinte 2 voies : retour de scène passif 300W

Voyons maintenant un cas pratique.

Je me suis procuré pour un prix modique une paire d'enceinte de type retour de scène, équipés d'un 15" Beyma 15G40 et d'un moteur Selenium de 1" D210Ti

Un trou rectangulaire dans un coin de la face avant fait office de bass-reflex (nous y reviendrons).

A l'écoute, le 1" est nettement en avant, les basses sont baveuses sans être très puissantes.

Théorie : couplage de 2 hauts parleurs

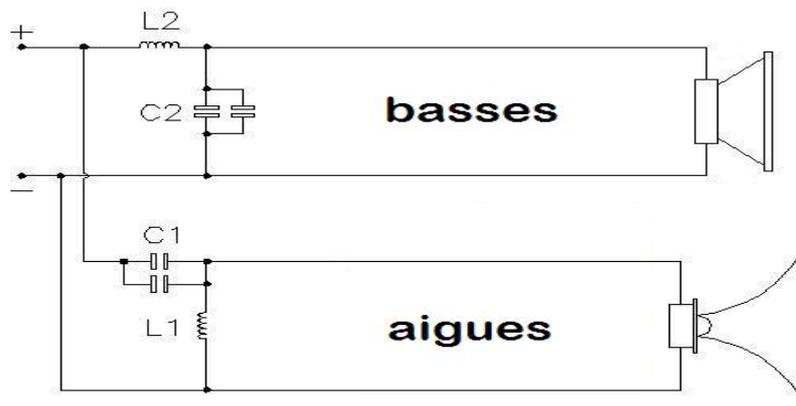
Comme nous l'avons vu, les HP ont un domaine d'utilisation restreint. C'est pourquoi, on utilise plusieurs HP pour reproduire la bande passante audible (20HZ-20KHZ).

Les HP qui ont une petite membrane, et donc plus légère, se spécialiseront dans les fréquences aigues tandis que les HP de larges diamètres sont dédiés aux basses fréquences.

Il faut donc séparer le signal audio entre les différents hauts parleurs, c'est ce que l'on appelle le filtrage.

Nous nous intéressons ici à un filtrage passif, parce qu'il est constitué de composants passifs et qu'il se situe dans la chaîne audio après l'amplification (c'est-à-dire le plus souvent dans l'enceinte). Il doit donc pouvoir encaisser des puissances élevées.

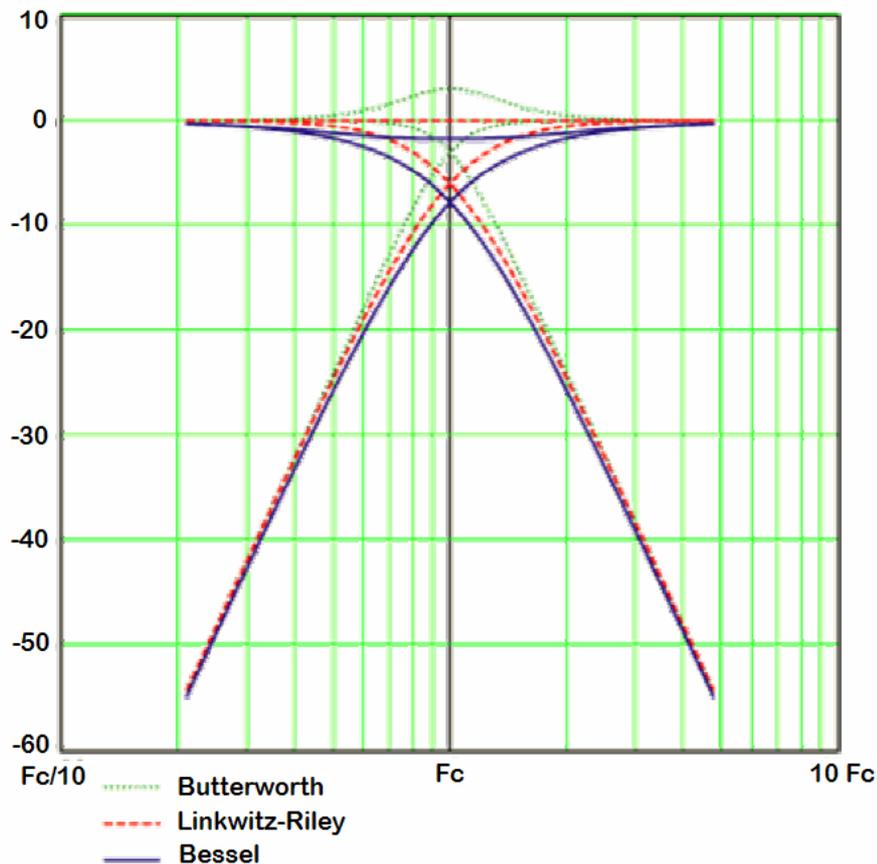
Filtre à 12 dB



La fréquence de coupure du filtre (qui est souvent la même pour les graves et les aigues) est la fréquence à partir de laquelle le filtre atténue le signal.

Son ordre ($1^e=6\text{dB}$; $2^e=12\text{dB}$; $3^e=18\text{dB}$; etc...) est l'atténuation par octave qu'il impose, c'est-à-dire la pente du filtre.

Le comportement de la résultante des deux voies au voisinage de la fréquence de coupure dépend du type de fabrication du filtre, on les dénomme du nom de leurs inventeurs :



Pour que deux sources sonores soient cohérentes, c'est-à-dire qu'elles semblent n'en former qu'une à l'écoute, il faut que la distance D qui les sépare soit inférieure à $c/2F$

C'est exactement la même chose que pour le court-circuit acoustique seulement maintenant on souhaite qu'il se produise à la fréquence de coupure du filtre, puisque les ondes sont en phase.

C'est pourquoi les hauts parleurs ne doivent pas être trop espacés sur le baffle.

Modification du filtre

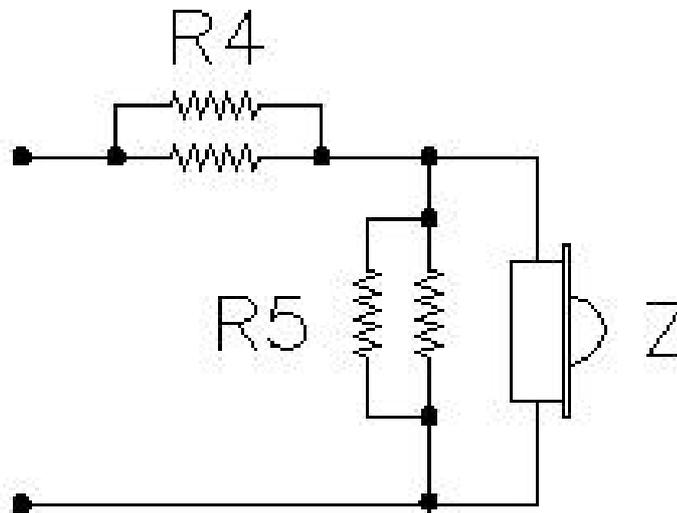
Le filtre en place sur ces enceintes accepte 300W et coupe à 2,5KHZ à 12dB/octave
Je récupère sur internet les fiches techniques des deux hauts parleurs (voir annexe 1 et 2).

Je remarque, immédiatement que le Sélénium est beaucoup plus sensible que le 15"

Pour tenter de linéariser la réponse en fréquence de l'enceinte, je décide d'atténuer les aigues de 7dB et de remplacer les filtres par une autre paire dont je dispose à 1,2KHz 12dB/octave.

On serait tenter d'atténuer encore plus le 1" mais je ne veux pas perdre trop de sensibilité dans les fréquences >10KHz. Et il faut rappeler que 3 dB d'atténuation provoquent déjà deux fois moins de puissance sonore.

L'atténuation se fera à l'aide de deux résistances (en pratique un peu plus), l'une en série avec le HP et l'autre en parallèle.



$$R4 = 4,34 \Omega \quad R5 = 6,74 \Omega \quad A = -6,8\text{dB}$$

Lorsque je démonte les filtres, je me remarque qu'une résistance en série de 8 Ω est déjà insérée sur la voie d'aigues. Ce qui provoque une atténuation de 3dB (le HP faisant lui aussi 8 Ω).

Cependant ce type d'atténuateur a un comportement très variable avec les changements d'impédance du HP. On remarque sur la courbe d'impédance de la fiche technique du HP l'impédance maximum 15 Ω et l'impédance minimum 7,5 Ω (annexe).

Avec une résistance en série R, l'atténuation est de :

$$A = 10 \cdot \text{Log} [Z/(Z+R)] \quad \text{avec } Z \text{ l'impédance du HP}$$

Pour une atténuation de -6,8dB sous 8 Ω il faut R = 30 Ω

$$\text{Pour } Z = 7,5 \Omega \quad A = -7\text{dB}$$

$$\text{Pour } Z = 15 \Omega \quad A = -4,77\text{dB}$$

Alors qu'avec les deux résistances on a : $R4 = 4,34 \Omega \quad R5 = 6,74 \Omega$

$$A = 10 * \text{Log} [\text{Req}^2 / (Z * \text{Rt})] \quad \text{avec } \text{Req} = Z * \text{R5} / (Z + \text{R5}) \quad \text{et } \text{Rt} = \text{Req} + \text{R4}$$

$$\text{Pour } Z = 7,5 \, \Omega \quad A = -6,72 \text{dB}$$

$$\text{Pour } Z = 15 \, \Omega \quad A = -7,93 \text{dB}$$

On voit que le deuxième atténuateur est plus linéaire en fonction de l'impédance.

Au final on aura perdu beaucoup de sensibilité dans le haut medium mais dans le même temps, on a augmenté la capacité de l'enceinte.

En effet, on voit sur la fiche technique que la compression a une capacité de 60W RMS lorsqu'elle est filtrée à 1,5KHz. Cependant l'ensemble HP₁+atténuateur accepte beaucoup plus de puissance.

Ici 287 W RMS, les résistances ont été choisies en conséquence.

Le boomer acceptant 700W ne pose aucun problème et le filtre est indiqué pour 500W.

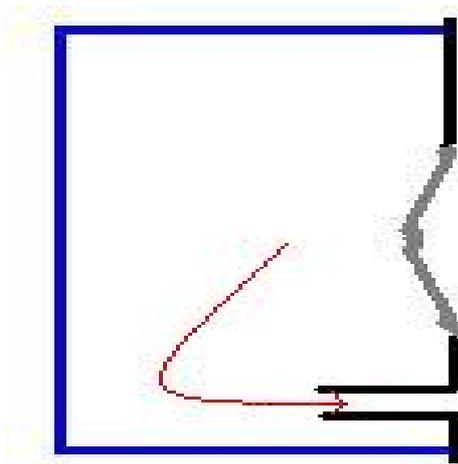
L'enceinte acceptera donc plus de puissance sans que l'on ait modifié la sensibilité dans le grave. De plus, l'usage d'un filtre passif déphase le signal (cf. **remise en phase**).

Pour un filtre du second ordre, ce déphasage est de 180°, je branche donc le HP d'aigus en inversant les polarités pour procéder à une remise en phase électrique.

Le bass reflex

Le principe du bass-reflex est d'amener l'onde arrière en opposition de phase au niveau de la face avant.

Pour cela on utilise le plus souvent un tube qui crée un chemin d'onde dont la longueur et le diamètre détermine une fréquence précise, on dit que le Bass reflex est accordé.



La relation entre la longueur de l'évent L , sa surface S et la fréquence d'accord est donnée par :

$$L = \left(\frac{c}{2 * n * FB} \right)^2 * S / VB - [K * \sqrt{S}]$$

ou

$$FB = \left(\frac{c}{2 * n} \right) * \sqrt{S / \left([L + K * \sqrt{S}] * VB \right)}$$

K est un coefficient de correction d'extrémité qui dépend du placement de l'évent. Calculé par Jörg Panzer, il vaut ;

0,677	si le tube déborde des deux cotés
0,846	si le tube débord d'un seul coté
0,959	si le tube est raz des deux cotés

Un autre facteur à prendre en compte est la forme de l'évent.

Les formules précédentes, qui dépendent de la surface de l'évent, sont calculé pour un événement circulaire.

Mais si l'évent est rectangulaire la surface à prendre en compte n'est plus celle de l'évent lui-même, car un événement rectangulaire ne réagit pas de la même manière qu'un événement circulaire pour une même surface.

Il faut alors utiliser le diamètre hydraulique qui correspond au diamètre du conduit cylindrique engendrant la même perte de charge linéaire pour la même vitesse d'air.

$$D_H = 1,3 \times \left[\frac{(L \times H)^5}{(L + H)^2} \right]^{1/8} \quad \text{avec } L \text{ et } H \text{ les dimensions du rectangle}$$

Les formules deviennent alors :

$$L = \frac{c^2 * D_H^2}{16 * n * FB^2 * VB} - [K * D_H * \sqrt{n} / 2]$$

$$FB = \frac{c * D_H * \sqrt{n}}{[L + K * D_H * \sqrt{n} / 2] * VB} / (4 * n)$$

Avec l'évent actuel, je calcule un $D_H = 0,131071 \text{ m}$

Avec $V_B=0,07 \text{ m}^3$ $c= 343,3 \text{ m.s}^{-1}$ $K = 0,959$ $L = 0,01\text{m}$ (l'épaisseur de la face avant)
On a $FB = 68,8\text{Hz}$ c'est la fréquence d'accord initiale du Bass-reflex.

Il faut rappeler que ce HP dans la même boîte sans Bass reflex donnerait $FC = 65,4\text{Hz}$

La fiche technique du haut parleur nous donne la réponse de l'enceinte prévue en Bass reflex. Attention, il ne s'agit pas ici d'une courbe de sensibilité mais de l'atténuation engendrée par la boîte, qu'il faudra donc ajouter à la courbe de réponse du HP.

Cette courbe est donnée pour un accord dans 80L à 45HZ, qu'on peut considérer sûrement comme les conditions optimales pour ce haut parleur puisque le constructeur n'a pas intérêt à donner des performances plus mauvaises.

Or mon enceinte est moins volumineuse et le bass reflex est plus haut en fréquence, j'ai donc toutes les raisons de penser que la coupure dans le bas est encore plus accentuée.

Je décide donc d'ajouter deux plaques de bois afin d'allonger l'évent à l'intérieur de la boîte et d'étendre la réponse de l'enceinte dans le bas.

En effet, pour un diamètre donné, si la longueur d'évent augmente, la fréquence d'accord diminue.

En comptant l'épaisseur de l'évent rajouté, le nouveau diamètre est $D_H = 0,119883 \text{ m}$

Avec $K= 0,846$ et $FB =45\text{Hz}$ On a $L = 0,148\text{m}$

A l'écoute, l'atténuation sur le tweeter est très appréciable. L'effet sur les basses fréquences est plus subtil, elles semblent plus épurées et on ressent à prime abord une perte de niveau. Après quelques essais, je m'arrête sur une longueur d'évent de 12cm, soit une fréquence d'accord légèrement supérieure.

Rappelons que l'on peut maintenant charger l'enceinte avec un ampli plus puissant.

Un caisson de basse : le scooper bass

Le « problème » des basses fréquences vient des longueurs d'ondes mises en jeu ($\lambda_{100\text{Hz}} = 3,4\text{m}$; $\lambda_{50\text{Hz}} = 6,8\text{m}$; $\lambda_{20\text{Hz}} = 17\text{m}$). Et malgré toutes les évolutions technologiques à venir, cela ne risque pas de changer.

De plus, les HP spécialisés dans les fréquences basses ont un Vas élevé (souvent plusieurs centaines de litres).

C'est pourquoi, quelle que soit le type d'enceinte, il faudra de grandes dimensions afin de reproduire correctement les grandes longueurs d'ondes.

Et ceci n'est pas seulement une tentative hasardeuse de justification d'un penchant naturel pour les enceintes gargantuesques.

Le pavillon acoustique

Réflexion des ondes et adaptation d'impédance :

Lorsque qu'une onde qui se déplace rencontre un milieu de nature différente (du point de vue de sa propagation) Il se crée des phénomènes de réflexion à l'interface.

Une partie de l'énergie va repartir en sens inverse, **ce qui se traduit par une perte d'énergie de l'onde transmise.**

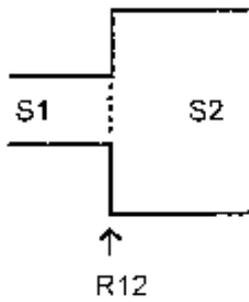
Pour les transmissions à haute fréquence par exemple, on souhaite limiter les réflexions aux interfaces (émission/réception) pour éviter les ondes stationnaires dans le câble de transmission.

On procède à une adaptation d'impédance en puissance, c'est-à-dire que les impédances des appareils doivent être égales.

Il en va de même pour les ondes acoustiques et on parle alors d'impédance acoustique de l'air. La première qualité du pavillon acoustique est de procéder à une adaptation d'impédance entre le HP de petite surface et la grande surface d'air qu'il doit exciter.

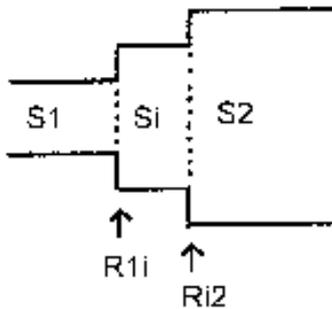
On procède à une adaptation en puissance pour optimiser le rendement.

Prenons le cas d'une source sonore dans un tube qui débouche sur une pièce de surface beaucoup plus grande. Il y a une forte variation d'impédance acoustique au niveau du changement de surface.



Le coefficient de réflexion est égale à
 $R = [(S_2 - S_1) / (S_2 + S_1)]^2$

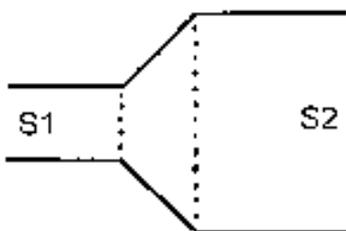
Si l'on procède à une adaptation progressive,



Avec les coefficients successifs,
 $R_{1i} = [(S_i - S_1) / (S_i + S_1)]^2$
 $R_{i2} = [(S_2 - S_i) / (S_2 + S_i)]^2$

On démontre mathématiquement que le coefficient de réflexion résultant est plus faible que dans le premier cas.

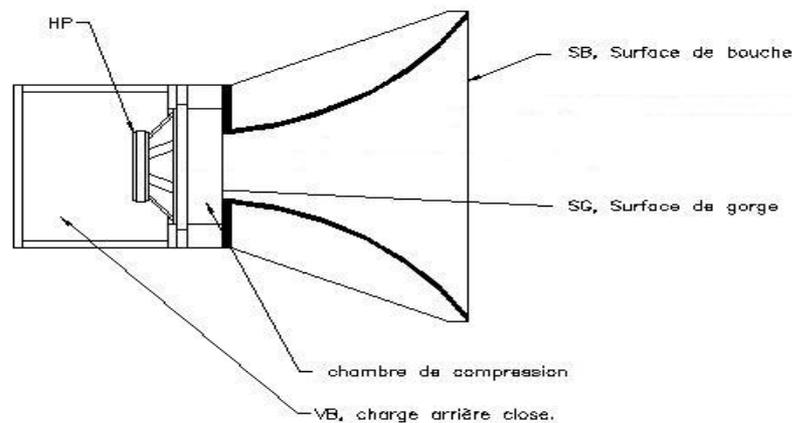
Une transition progressive optimise le coefficient de transmission entre les deux surfaces.



L'impédance acoustique doit varier le plus lentement possible pour respecter l'adaptation en puissance.

Calcul du pavillon :

Un pavillon acoustique présente toujours une chambre de compression débouchant sur une cavité de surface croissante. La surface d'entrée du pavillon est appelée surface de gorge et à la sortie la surface de bouche.



Le pavillon se comporte comme un filtre passe-bande.

La forme du pavillon, exprimée par sa **loi d'expansion**, détermine la fréquence centrale de la bande passante reproduite.

La chambre de compression agit comme un filtre coupe haut dont la fréquence dépend de ses dimensions.

La taille de la bouche détermine une fréquence en dessous de laquelle le pavillon ne rayonne plus correctement.

Lorsque le HP est monté dans une enceinte close, on choisit le volume VB pour que la fréquence de coupure FC du volume clos soit la fréquence centrale du pavillon.

On rappelle $FC = F_s \cdot \sqrt{[(V_{as} / V_B) + 1]}$

D'où $V_B = V_{as} / [(FC/F_s)^2 + 1]$

En fonction de la fréquence centrale voulue.

La bande passante théorique du pavillon en fonction de sa fréquence centrale FC et du hP utilisé est donnée par :

$$F_b = F_C * [\sqrt{(4 * Q_{ts}^2 + 1)} - 1] / (2 * Q_{ts})$$

$$F_h = F_C * [\sqrt{(4 * Q_{ts}^2 + 1)} + 1] / (2 * Q_{ts})$$

Plus le Q_{ts} du HP utilisé sera élevé, plus la bande passante du pavillon sera réduite. C'est pourquoi on dit que les pavillons sont adaptés pour des Q_{ts} faibles (<0,25), mais on peut très bien utiliser des HP à Q_{ts} élevés si l'on souhaite une bande passante plus petite.

De plus, la chambre de compression impose une fréquence de coupure haute FH en fonction de son volume VC.

$$F_H = c * S_g / (2 * \pi * V_C)$$

Cette fréquence diminue lorsque le volume de la chambre de compression augmente. On peut donc calculer le volume maximum en fonction de la surface de gorge pour respecter la bande passante théorique :

$$V_{C_{MAX}} = c * S_g / (2 * \pi * F_h)$$

Cette condition est facilement respectée pour des pavillons de grave mais devient critique lorsque l'on souhaite calculer des pavillons de mediums et d'aigues.

Le rapport entre la surface de gorge et la surface de la membrane détermine le rendement du pavillon :

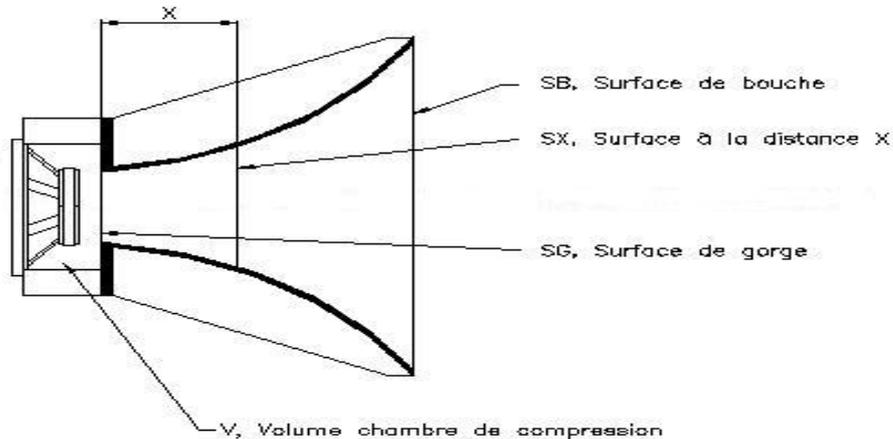
$$A = S_g / S_d$$

$$Rend = 100 * B L^2 * Re * A / (\rho * c * S_d * [Re + A * (Re + B L^2 / [2 * \rho * c * S_d])]^2)$$

Ce rendement est théoriquement optimisé pour $A = Re / (Re + [B L^2 / (2 * \rho * c * S_d)])$

Le pavillon arrière: toboggan

L'avantage du pavillon arrière est de pouvoir utiliser la courbe de réponse du HP à l'air libre. En effet, celui-ci n'étant pas contraint par un volume clos, aucune raideur ne vient s'ajouter au système.



L'idée étant ensuite de « tordre » le pavillon pour ramener l'onde sonore sur le même plan afin qu'elle s'ajoute au rayonnement direct du HP.

Le volume de la chambre de compression et la loi d'expansion du pavillon se calculent de la même manière que pour le pavillon avant.

Loi d'expansion :

La loi d'expansion du pavillon donne le rapport entre la surface du pavillon à une distance x de la gorge et la surface de gorge, en fonction de cette distance x .

C'est elle qui détermine la forme du pavillon et donc la fréquence sur laquelle sera centrée sa bande passante.

Une fois choisies la fréquence du pavillon et la surface de bouche, on peut donc calculer la surface du pavillon en tout point du parcours.

La loi d'expansion d'un pavillon hyperbolique est :

$$S(X) = Sg * [\cosh(M * X) + T * \sinh(M * X)]$$

cosh/sinh :cosinus/sinus hyperbolique

M étant le coefficient d'expansion et T un facteur de forme

Selon Mario Rossi le T optimal vaut 0,707 (= $\sqrt{2}/2$) nous avons donc
$$S(X) = Sg * [(e^{(M * X)} + e^{(-M * X)}) / 2 + \sqrt{2} * (e^{(M * X)} - e^{(-M * X)}) / 4]$$

Cependant, lorsque T=1 la formule devient :
$$S(X) = Sg * e^{(M * X)}$$

On parle alors de pavillon exponentiel et on a par équivalence:

$$S(X)/Sg = e^{(M * X)}$$

$$\ln(S(X)/Sg) = M * X$$

$$\ln(S(X)) = \ln(Sg) + M * X$$

Le coefficient M est fixé par la fréquence choisie

$$M = 4 * \pi * F / c$$

Ce coefficient doit être corrigé en fonction de la forme du pavillon.

On divise le résultat par 2,5 pour les pavillons exponentiel, par 1,5 dans le cas d'un pavillon hyperbolique avec T=0,707.

Surface de bouche et rayonnement :

Un principe important d'acoustique est qu'une cavité ne peut pas rayonner correctement une longueur d'onde supérieure à son périmètre.

C'est-à-dire que pour rayonner parfaitement le 20Hz, le pavillon devrait avoir une bouche de 17 m de périmètre. Soit un disque de 5,4 m de diamètre ou un carré de 4,3m de coté.

Ne perdons pas espoir car cet effet doit être nuancé en fonction de l'angle de diffusion (angle solide pour une diffusion dans l'espace)

En effet, on peut imaginer que l'onde sonore « s'appuie » sur les parois du pavillon pour se former. Si le périmètre maximum du pavillon est trop petit par rapport à la longueur d'onde, celle-ci n'aura pas la place pour se former complètement.

Mais si on ajoute une surface dans le prolongement du pavillon (comme lorsque l'enceinte est posée au sol), l'onde sonore va pouvoir « s'appuyer » contre cette surface et donc se former pour des longueurs d'onde plus grandes.

Plus l'angle, solide est petit (cad. qu'il y a plus de surfaces à disposition), plus la longueur d'onde pourra être élevée.

$$\Delta_R = \sqrt{(4 \pi / \alpha) * P}$$

P étant le périmètre de la bouche et α l'angle solide

On obtient -3dB par rapport à la réponse « naturelle » du pavillon à la demi-octave inférieure.

$$F_{-3} = F / \sqrt{2} \text{ d'où } \Delta_{-3dB} = \sqrt{(2 * \pi / \alpha) * 2 * P}$$

$\alpha = 4 \pi$ diffusion dans l'espace (pavillon d'aigu en hauteur)

$\alpha = 2 \pi$ diffusion contre une surface (enceinte posée au sol)

$\alpha = \pi$ diffusion contre deux surfaces (avec un mur juste derrière l'enceinte)

$\alpha = \pi / 2$ diffusion contre trois surfaces (enceinte dans un angle de la salle)

Dans notre cas, on prendra $\alpha = 2 \pi$ et donc $\Delta_{-3dB} = 2 * P$

Sachant que 20Hz $\leftrightarrow \Delta = 17\text{m}$ il faut $P=8,5\text{m}$ pour obtenir -3dB à 20HZ

Cela reste conséquent mais 30Hz $\leftrightarrow \Delta = 11,3\text{m}$ $P_{-3}=5,7\text{m}$

Et 40Hz $\leftrightarrow \Delta = 8,5\text{m}$ $P_{-3}=4,3\text{m}$ soit un carré d'un mètre de coté.

Attention, ceci n'est pas véritablement la fréquence de coupure de l'enceinte.

Considérant que dans l'extrême grave, la sensibilité du pavillon est bien supérieure à celle du HP direct, la coupure basse devrait donc être celle du pavillon seul (fb).

Or il est aisé d'obtenir un fb suffisamment bas en adaptant la loi d'expansion, mais dessiner une enceinte réalisable et transportable avec un périmètre de bouche de 17m est une autre affaire.

C'est donc bien le mauvais rayonnement de la bouche qui limitera ici la réponse dans le grave.

Idéalement on souhaiterait $c / \Delta_R = fb$, concrètement obtenir $c / \Delta_{-3dB} = fb$ est déjà sportif (surtout pour ceux qui portent les caisses).

Cette méthode n'est pas très rigoureuse et des mesures nous en apprendraient plus. Je ne dispose pas d'un analyseur de spectre mais j'ai encore le temps d'en trouver avant d'avoir construit tout ce qu'il me faut mesurer.

En attendant, je considère c / Δ_{-3dB} (qui sera supérieur à fb) comme fréquence de coupure en arrondissant au hertz supérieur.

Avec toutes ces formules et un peu (sic !) de géométrie, j'ai dessiné les plans d'un caisson pour un haut parleur Beyma18LX60 (annexe 5).

Après quelques essais « volumineux », j'arrive à un modèle de moins de deux mètres qui proviens d'un compromis ; la surface de gorge doit être adaptée à partir du calcul d'optimisation, en fonction du trajet estimé et de la loi d'expansion voulue afin d'obtenir une surface de bouche ni trop petite (mauvais rayonnement), ni trop grande (transport, stockage, etc...). Sachant que l'on perd en rendement à mesure que l'on s'éloigne de l'optimum et sans oublier qu'il faudra adapter le volume de compression en fonction de la surface de gorge choisie.

Tout cela en restant relativement simple dans les formes puisque le matériel d'ébénisterie dont nous disposons est suffisant sans être fabuleux.

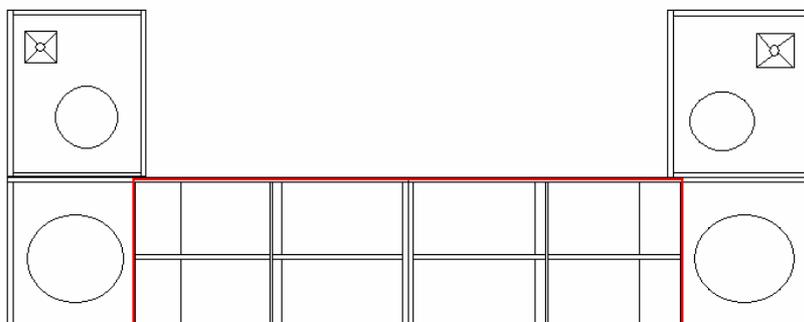
Au final le pavillon est exponentiel avec $M=1$ soit une fréquence centrale de 68Hz

$$f_b=22\text{Hz} \quad \text{et} \quad f_h=206\text{Hz}$$

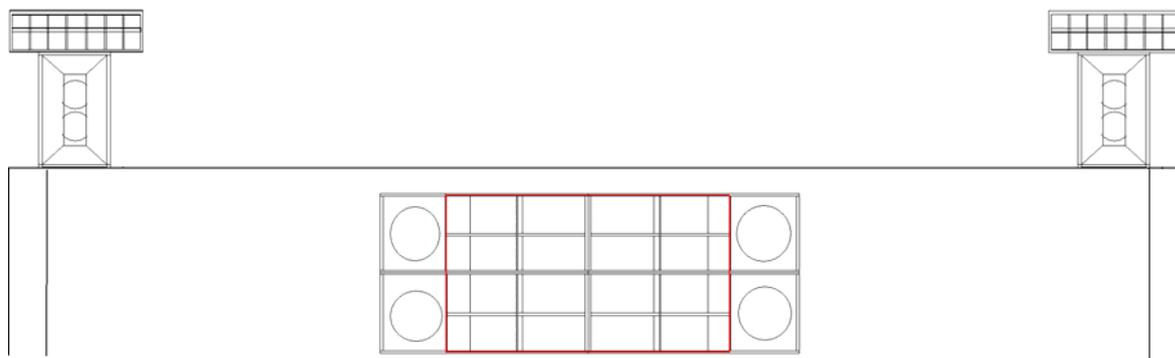
Le rendement théorique est d'environ 18% soit un gain de 8,5dB par rapport au rendement à l'air libre.

Le périmètre de bouche mesure 3,8m soit $f_{-3\text{dB}}=45\text{Hz}$

Le principe du scooper est d'être utilisé en groupe afin de coupler les surfaces de bouche des pavillons et d'améliorer le rayonnement dans le grave.



$P=6,3\text{ m}$ $F_{-3}=28\text{Hz}$



$P=7,7\text{ m}$ $F_{-3}=23\text{Hz}$

Le pavillon arrière présente tout de même un inconvénient notable qui n'aura pas échappé au lecteur assidu.

Le signal sortant du pavillon est en fait le signal envoyé au HP, en opposition de phase puis retardé par la durée du trajet de l'onde dans le pavillon.

On pense donc au cours circuit acoustique qui pourrait éliminer certaines fréquences du signal. Cependant, dans le domaine d'utilisation de la caisse, la sensibilité du pavillon est bien supérieure à celle du HP seul (dans ce cas +8,5dB).

C'est pourquoi la superposition des deux ondes ne crée pas de perte franche (pas de disparition totale de fréquence).

De plus, le signal reproduit par le caisson sera retardé par rapport au reste du spectre (mediums/aigus).

Ici le parcours final est d'environ 2,4m soit un retard de 7ms environ.

Cette solution n'est donc pas de la haute fidélité.

Tout comme le bass reflex, on sacrifie ici un peu de qualité d'écoute afin de gagner en sensibilité. Mais « c'est tricher ».

Je vous laisse cependant imaginer un pavillon avant de 2,4m de long avec une enceinte de 90L à l'arrière. Ce n'est déjà pas très pratique au transport. En sachant que ce sont les HP qui doivent être alignés et non les bouches des pavillons pour que les signaux soient en phase, il faudrait insérer un delay ou laisser plusieurs mètres entre la scène et le public pour placer les pavillons.

Un Hp de meilleure qualité, avec un Qts plus faible et un Vas réduit, permettrait une boîte moins volumineuse et un coefficient M plus grand d'où une longueur de pavillon plus courte (pour obtenir la même surface de bouche). S'il est suffisamment sensible, on peut également augmenter la surface de gorge pour gagner en longueur.

Mais cela ne changerait pas le problème de rayonnement dans le grave. Il faudrait donc autant de caisses pour une fréquence de coupure équivalente, le budget sera sensiblement supérieur.

Un système multiamplifié

Comme nous l'avons vu, pour optimiser la linéarité du système il faut spécialiser les Hp en fonction des fréquences à reproduire. Mais le filtrage passif entraîne des pertes en puissance en raison de la résistance interne des filtres. Plus on « découpe » le signal et plus les pertes seront importantes.

Grace à un filtrage pré-amplification (dit actif), on évite le gaspillage de puissance ce qui signifie un meilleur rendement global du système. On peut également spécialiser les amplificateurs en fonction du spectre à reproduire.

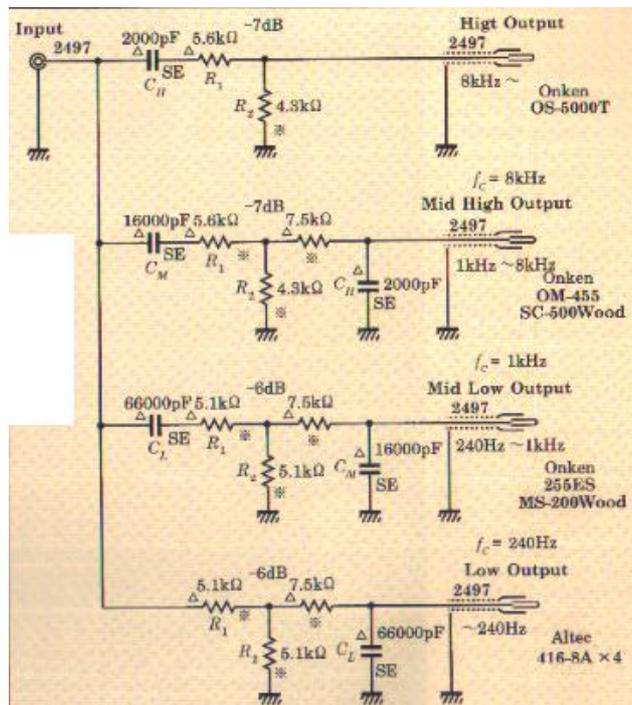
On peut aussi adapter les dimensions et le type d'enceinte pour chaque voie de diffusion. L'atténuation sur chaque voie et le positionnement des enceintes peuvent facilement être adaptés aux conditions.

On comprend vite que le filtrage pré amplification ne présente à peu près que des avantages. Le principal souci est que pour chaque voie de filtrage supplémentaire, il faudra un amplificateur de plus. Le budget sera donc lui aussi différent.

Le Filtrage actif

Les filtres actifs numériques offrent, en une seule machine, de grandes possibilités de réglage. Notamment des ordres très élevés pour séparer les signaux entre les haut-parleurs et des « notch » resserrés pour éliminer précisément d'éventuelles fréquences gênantes. La plupart du temps, on peut également retarder et atténuer les différentes voies séparément.

Cependant, on peut aussi profiter des avantages du filtrage pré amplification avec des filtres analogiques.

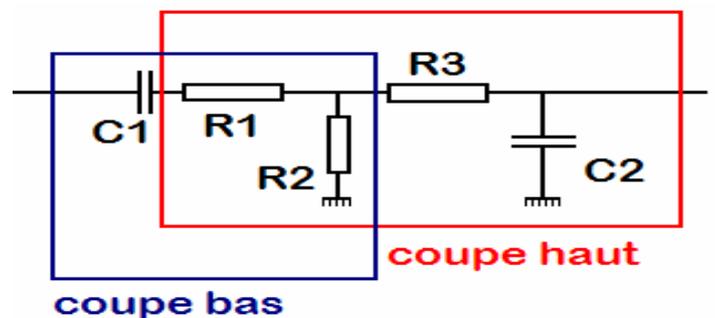


Pour chaque voie le coupe bas se calcul :

$$F_b = 1 / (2 * \pi * C_1 * [R_1 + R_2])$$

Pour le coupe haut on a $1 / R_{eq} = (1 / R_1) + (1 / R_2)$
et

$$F_h = 1 / (2 * \pi * C_2 * [R_{eq} + R_3])$$



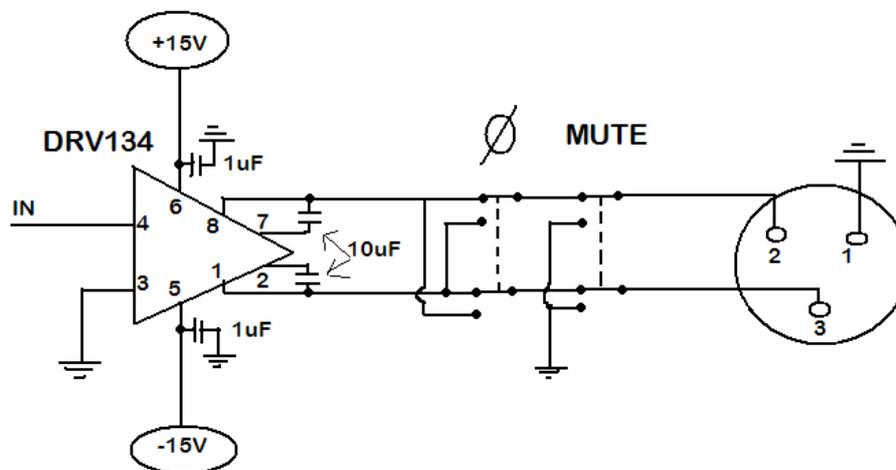
Il faudra ajouter des condensateurs variables en parallèle afin de pouvoir régler les fréquences de coupures. Cependant pour régler sur un seul potard la fréquence d'un coupe-haut d'une stéréo et la fréquence du coupe-bas de la voie supérieure, il faudrait des condensateurs variables quadruples.

Or les condensateurs variables doubles ne sont déjà pas très rependus. Il faudra donc choisir entre régler séparément la gauche et la droite ou la fréquence de coupure haute et la fréquence de coupure basse supérieure.

Cette dernière solution me semble plus judicieuse car on est plus souvent amené à souhaiter une fréquence différente qu'une asymétrie gauche/droite.

Dans ce cas, on pourra également utiliser des résistances variables pour régler les passe-bas, ce qui coûte souvent moins cher.

On peut sans doute faire l'économie d'un atténuateur puisqu'on en trouve sur la plupart des amplificateurs mais un petit étage de symétrisations avec mute et opposition de phase sur chaque voie ne semble pas de trop.



*Les condensateurs de découplage (sur les bornes d'alimentations) doivent être au plus proche du CI.
Je conseil d'externaliser l'alimentation pour n'amener que du courant continu dans l'appareil*

La qualité des composants et de la fabrication ne doit pas être négligée puisque tout le son diffusé passera à travers.

Une telle construction en sortie d'un égaliseur graphique permet déjà quelques réglages.

Remise en phase

Un déphasage des ondes sonores provenant de deux haut-parleurs différents provoque un filtrage en peigne qui nuit à la linéarité de la réponse en fréquence.

On remarque que ce facteur est souvent négligé dans la conception d'enceintes passives, même commerciales, où la bouche du pavillon est simplement alignée avec la fixation du boomer.

Plus le déphasage est important et plus la puissance des haut-parleurs est égale, plus les perturbations seront importantes.

Sur une enceinte 2 voie par exemple, si le signal est déphasé, des pertes en fréquences vont apparaître dans le domaine de fréquence où les deux haut-parleurs sont en fonctionnement, c'est-à-dire aux alentours de la fréquence de coupure.

On cherche donc, dans un premier temps, à obtenir des ondes en phases à la fréquence de coupure car les deux haut-parleurs émettent à un niveau égal.

Alignement des sources sonores :

Pour que les sources sonores des différentes voies soient en phase, pour un même signal, il faut qu'elles soient alignées dans le plan vertical.

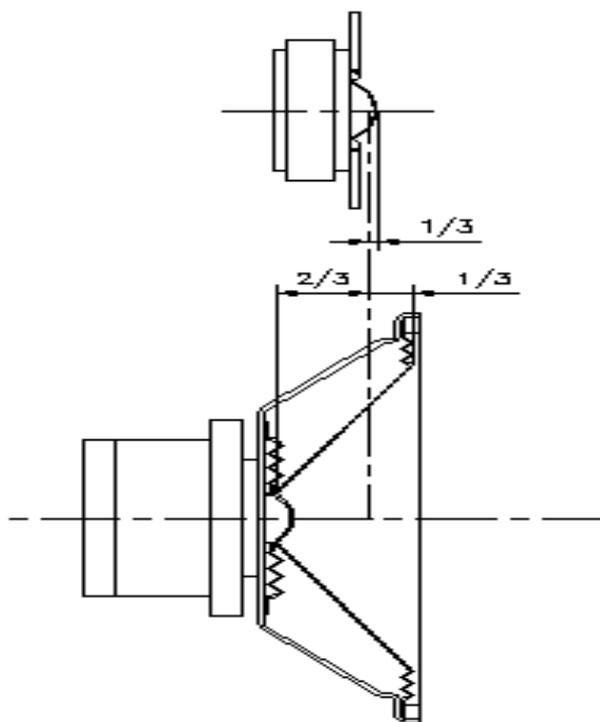
Cependant, les haut parleurs ont une certaine profondeur et déterminer le point de source avec précision est assez complexe. D'autant plus que celui-ci peut varier en fonction de la fréquence reproduite. Là encore, la mise au point à l'écoute est le plus souvent recommandée.

On cherche donc le point moyen de formation du son dans le HP. En première estimation, on peut prendre le plan vertical qui sépare la surface de la membrane en deux.

Pour un boomer, il se trouve environ à $1/3$ de la profondeur du HP en partant du côté le plus grand.

Cependant, pour les hautes fréquences, c'est le fond du boomer qui émettra plus de puissance, le point source se déplace donc vers le fond du boomer si on filtre à une fréquence élevée.

Pour les tweeters à dôme, il faut prendre le $1/3$ de la profondeur en partant de la pointe du dôme.



A ce stade, avoir des boîtes séparées pour chaque haut-parleur permet déjà un réglage précis puisque la demi-longueur d'onde du 12kHz fait 1,43cm ou 0,04 ms de delay.

Dans le cas d'une enceinte passive, il faudra une étape de mise au point sur une plaque avant temporaire, en utilisant la caisse et le filtre définitifs.

Déphasage du filtre :

L'usage d'un filtre analogique déphase le signal audio entre les différentes voies filtrées.
La plupart des filtres numériques utilise des logarithmes reproduisant leur fonctionnement et sont donc sujet au même problème.

Le retard de phase est de $\pi / 2$ pour les filtres du 1^{er} ordre
 π pour les filtres du 2^e ordre
 $3 \pi / 2$ pour les filtres du 3^e ordre
 2π pour les filtres du 4^e ordre

Ce retard est le même pour tout les types de filtre (Bessel, Linkwitz, etc...).

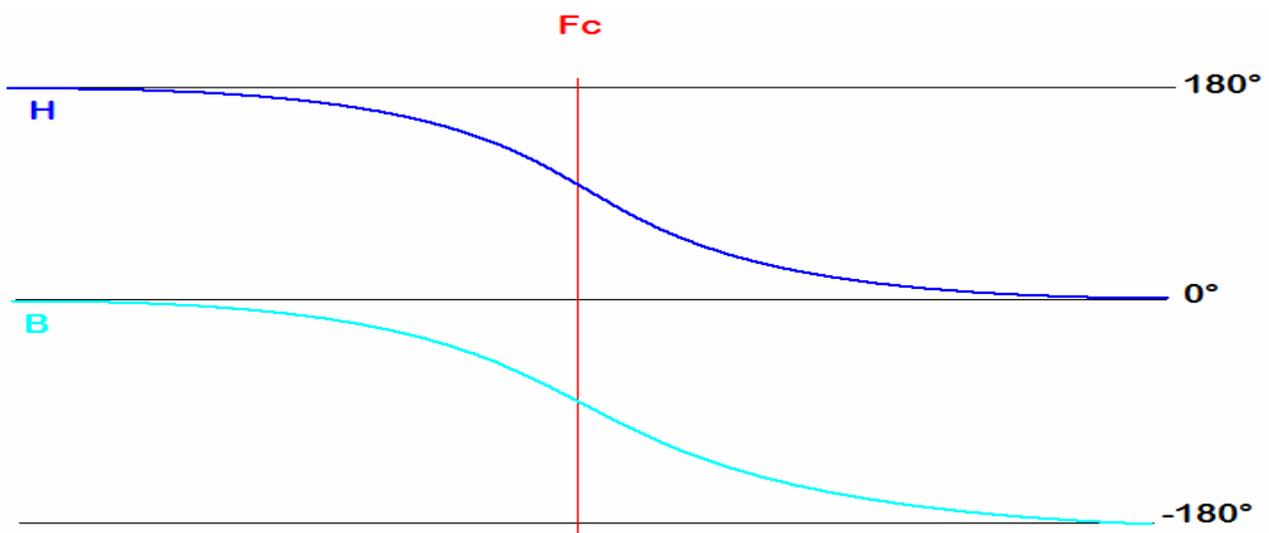
Cependant, on sait que la courbe de réponse aux alentours de la fréquence de coupure n'est pas la même. C'est à dire surtout que la différence de niveau entre les haut-parleurs n'est pas la même.

Or la phase absolue et la variation de phase à la fréquence de coupure changent elles aussi en fonction du filtre utilisé.

L'effet de ce déphasage sur la courbe de réponse du système sera donc différent.

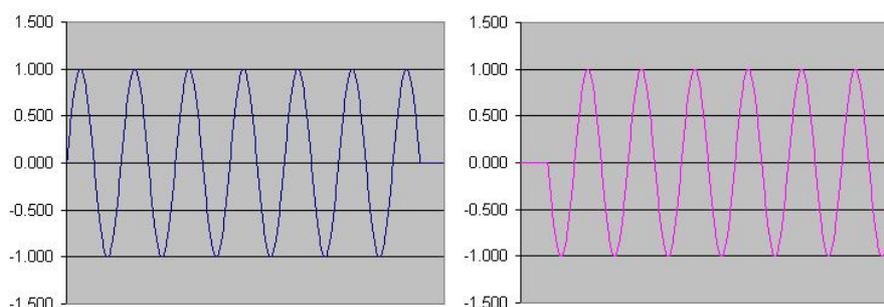
Ici l'usage d'un delay semble inapproprié puisqu'un retard constant au niveau temporel donne un retard de phase qui varie en fonction de la fréquence.

On voit l'intérêt d'inverser la phase dans un système deux voies filtré à 12dB/octave :

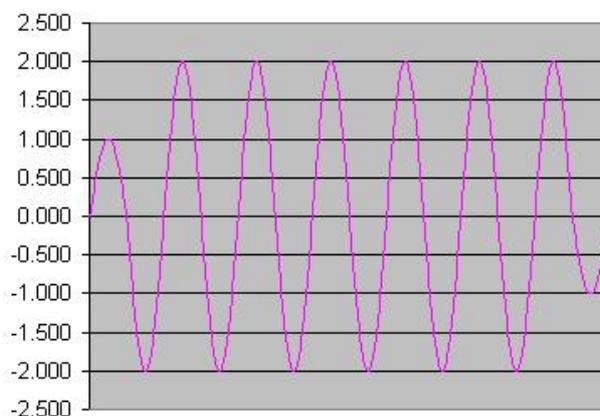


On récupère ainsi les signaux en phase sur les deux hauts parleurs **à condition d'avoir aligné les points sources auparavant.**

Réponse aux impulsions :



Lorsque l'on additionne un train de huit oscillation avec ce même signal retardé de $\pi / 2$ et mis en opposition de phase, le résultat est un train d'onde plus long d'une demi-oscillation et dont la première et la dernière demi-oscillation sont plus faibles en amplitude.



Or la musique est constituée de trains d'oscillations complexes qui varient constamment. La simple remise en phase n'est donc pas suffisante pour obtenir une restitution dite « musicale » du son.

Des méthodes existent pour déterminer la qualité de la réponse aux impulsions d'un système. L'idée étant de jouer sur la polarité, le delay, les fréquences de coupure, le type et l'ordre du filtre appliqués à chaque voie afin d'obtenir les meilleurs mesures.

Cependant, même s'il on peut l'optimiser expérimentalement, il est difficile de quantifier ce qu'il faut privilégier entre la linéarité de la réponse en fréquence et la réponse aux impulsions, pour obtenir une restitution la plus fidèle possible des sons musicaux.

Et en pratique, il est très rare de pouvoir contrôler tous les paramètres.

C'est pourquoi une oreille bien entraînée demeure actuellement le meilleur outil pour calibrer un système de diffusion.

Savoir quoi compenser et comment est sans doute aussi une aide importante.

Sources et Bibliographie

Cours de l'EMC : <http://www.emc.fr>

Site de Dominique Petoïn : <http://www.petoindominique.fr>

Un passionné d'audio qui s'inspire principalement du travail de Mario Rossi et de Francis Ibre et qui a le bon goût d'agrémenter son site avec les remarques des internautes.

Site de Francis BROUCHIER : [http://www.brouchier.com/livre/LE LIVRE.html](http://www.brouchier.com/livre/LE_LIVRE.html)

Traité universitaire un peu plus poussé sur le fonctionnement du haut-parleur. Nécessite un petit niveau en mathématique.

Enceintes acoustiques et haut-parleurs de Vance DICKASON

Itinéraire d'un audiophile de Francis Ibre

Audio de Mario Rossi

Un CI mystérieux ? <http://www.datasheetcatalog.com/> <http://www.datasheetarchive.com/>

Un mode d'emploi perdu ? [http://www.free-service-manuals.com/Audio Hi Fi/index.html](http://www.free-service-manuals.com/Audio_Hi_Fi/index.html)

ANNEXES

ANNEXE 1 : Fiche technique BEYMA 15G40	39
ANNEXE 2 : Fiche technique SELENIUM 210Ti	41
ANNEXE 3 : Mesure des paramètres T&S	43
ANNEXE 4 : Simulation du bass-reflex	51
ANNEXE 5 : un pavillon arrière	52

ANNEXE 1

Fiche technique BEYMA 15G40

beyma **PROFESSIONAL LOUDSPEAKERS**

15G40

G40 Series

KEY FEATURES

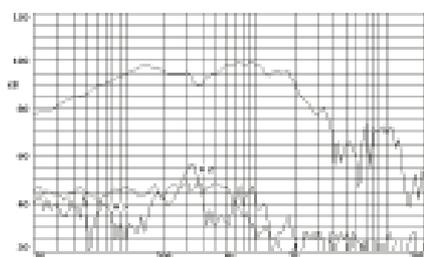
- High power handling (700 W_{MS})
- Waterproof paper cone
- 4" edgewound copper voice coil with polyimide fiber glass former
- Optimum winding length for increased linear excursion
- Spiders of improved temperature behaviour: retain good mechanical properties at high power
- Designed for woofer applications



GENERAL DESCRIPTION

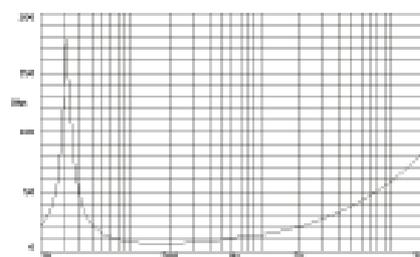
This low frequency transducer is specially intended for the most demanding applications. Its design concept arises from the need of achieve a more resistant loudspeaker that matches the more and more power given by ultimate amplification systems. In order to accomplish that, almost every component of the speaker has been reconsidered: its voice coil has the benefits of an improved manufacturing process and the highest quality materials, while the dual spider configuration includes a nomex spider that maintains its compliance constant with the applied power. Moreover, the magnetic structure construction generates a symmetrical magnetic field and, at the same time, provides an efficient thermal path which contributes to heat dissipation. Furthermore, its parameters has been optimized to obtain an excellent bass response when used in small bass-reflex cabinets.

FREQUENCY RESPONSE AND DISTORTION CURVES

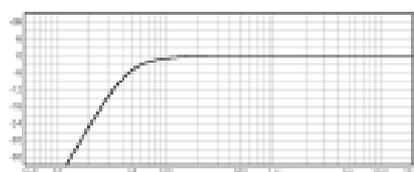


Note: on axis frequency response measured with loudspeaker standing on infinite baffle in anechoic chamber, 1m @ 1m.

FREE AIR IMPEDANCE CURVE

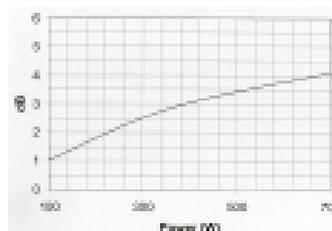


PREDICTED LOW FREQUENCY RESPONSE



Note: Bass-reflex cabinet, Vb=60 l, fb=45 Hz

POWER COMPRESSION LOSSES



Note: These losses are calculated from a five minutes A/B power test applying band limited pink noise (25-1200 Hz). The loudspeaker is free-air standing.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Nominal diameter	380 mm. 15 in.
Rated impedance	8 ohms.
Minimum impedance	7 ohms.
Power capacity*	700 w AES
Program power	1400 w
Sensitivity	97 dB 2.83v @ 1m @ 2w
Frequency range	25 - 1500 Hz
Recom. enclosure vol.	40 / 150 l 1.4 / 6 ft. ³
Voice coil diameter	100 mm. 4 in.
Magnetic assembly weight	9 kg. 19.8 lb.
BL factor	23 N / A
Moving mass	0.122 kg.
Voice coil length	23 mm.
Air gap height	9.5 mm.
X damage (peak to peak)	33 mm.

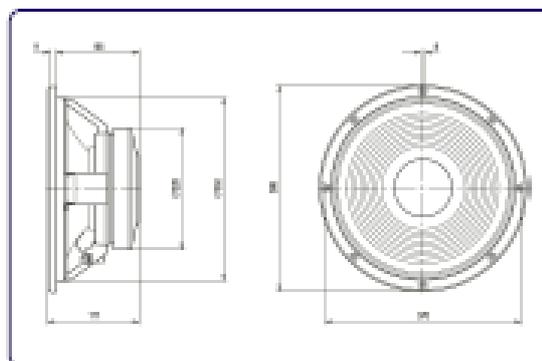
MOUNTING INFORMATION

Overall diameter	388 mm. 15.28 in.
Bolt circle diameter	370 mm. 14.57 in.
Baffle outlet diameter:	
- Front mount	352 mm. 13.86 in.
- Rear mount	355 mm. 13.98 in.
Depth	171 mm. 6.7 in.
Volume displaced by driver	7 l 0.25 ft. ³
Net weight	10.4 kg. 22.9 lb.
Shipping weight	11.5 kg. 25.4 lb.

THIELE-SMALL PARAMETERS**

Resonant frequency, fs	37 Hz
D.C. Voice coil resistance, Re	5.9 ohms.
Mechanical Quality Factor, Qms	9.95
Electrical Quality Factor, Qes	0.31
Total Quality Factor, Qts	0.30
Equivalent Air Volume to Cms, Vas	149 l
Mechanical Compliance, Cms	155 µm / N
Mechanical Resistance, Rms	2.8 kg / s
Efficiency, ηo (%)	2.3
Effective Surface Area, Sd (m ²)	0.0830 m ²
Maximum Displacement, Xmax	7 mm.
Displacement Volume, Vd	576 cm ³
Voice Coil Inductance, Le @ 1 kHz	2.9 mH

DIMENSION DRAWINGS



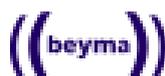
MATERIALS

- **Voice coil:** edgewound copper wire with high temperature bonding strength. Polyimide fiber glass former able to withstand high temperatures.
- **Cone:** waterproof paper cone capable of endure the most extreme conditions.
- **Surround:** treated cloth to assure good retaining of elasticity in despite of continuing use.
- **Spider:** dual spider combination made of nomex + polycotton to maintain good mechanical properties at high applied power.
- **Metal parts:** anti-corrosion coated back plate designed to resist aggressive environmental conditions
- **Basket:** specially designed die cast aluminium basket to avoid disturbing resonances.
- **Magnet:** high Curie temperature ferrite.

Notes:

* The power capacity is determined according to AES3-1984 (2002) standard. Program power is defined as the transducer's ability to handle normal music program material.

** T-S parameters are measured after an exercise period using a preconditioning power test. The measurements are carried out with a velocity-current laser transducer and will reflect the long term parameters (once the loudspeaker has been working for a short period of time).



acústica beyma, s.a.

Polígono Industrial Moncada II - Cf. Pont Sec, 1c - 46113 MONCADA - Valencia (Spain)
- Tel. (34) 96 130 13 75 - Fax (34) 96 130 15 07 - <http://www.beyma.com> - E-mail: beyma@beyma.com -

ANNEXE 2

Fiche technique SELENIUM 210Ti



DRIVER TITANIUM D210Ti

High quality compression driver with dome diaphragm in pure titanium, offers high efficiency and low distortion over the medium and high frequency band.

It can be successfully used in studio monitors, stage boxes and sound reinforcement in small rooms, where a high performance is requested.

This performance results from the proper combination of the components.

Diaphragm type dome in pure, rigid, light and extremely thin titanium (0.025 mm). To avoid stress and distortion, the suspension has a special design.

Injected phase plug in engineering plastic, optimized to eliminate undesirable phase oscillations.

Magnetic assembly that concentrates flux in the gap, optimized using FEA (Finite Element Analysis), steel parts with se-coating black finish, the bobbin has a large diameter.

Voice coil manufactured in CCW (Copper Clad Aluminium), Kapton former, assures great stability and thermal resistance.

The moving assembly has a perfect auto-centering characteristic that turns replacement in an easy task.

Model D210Ti uses standard 1/2" screw - 18 threads per inch, for better fitting with Selenium horns.



SPECIFICATIONS

Nominal impedance	8 Ω
Minimum impedance @ 3,750 Hz	7.5 Ω
Power handling	
Musical Program (af cover 1,500 Hz 12 dB f oct)	120 W
Musical Program (af cover 2,000 Hz 12 dB f oct)	180 W
Sensitivity	
On horn, 2.5W/1m, on axis*	107 dB SPL
On pressure tube, 0.0894V*	118 dB SPL
Frequency response @ -6 dB	800 to 20,000 Hz
Throat diameter	25 (1) mm (in)
Diaphragm material	Titanium
Voice coil diameter	46 (1.7) mm (in)
R _e	6.0 Ω
Flux density	1.60 T
Minimum recommended crossover (12 dB f oct)	2,000 Hz

* Power handling specifications refer to normal speech and/or music program material, reproduced by an amplifier imposing no more than 1% distortion. Power is calculated using RMS voltage squared divided by the nominal impedance of the loadspeaker. This voltage is measured at the input of the recommended passive crossover when placed between the power amplifier and loudspeaker.

Musical Program 2x 1/3 Oct.

Measure with H114-05 horn, 1,200 - 15,000 Hz average

* These results represent the SPL in a 20 cm terminated tube, 800 - 2,000 Hz average.

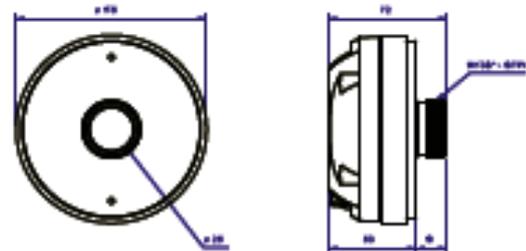
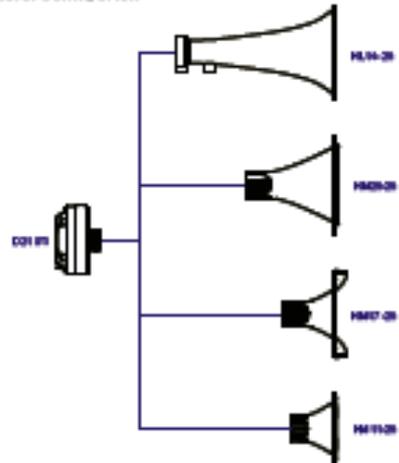
ADDITIONAL INFORMATION

Magnet material	Barium ferrite
Magnet weight	665 (24) g (oz)
Magnet diameter x depth	115 x 15 (4.52 x 0.59) mm (in)
Magnet assembly weight	1,800 (6.37) g (lb)
Housing material	Plastic
Housing finish	Black
Voice coil material	CCAW
Voice coil former material	Polyimide (Neptron®)
Voice coil winding length	3.5 (11.40) mm (in)
Voice coil winding depth	3.6 (0.14) mm (in)
Wattless temperature coefficient of resistance (α ₂₅)	0.00435 1/°C
Volume displaced by driver	0.5 (0.018) l (fl)
Net weight	1,730 (3.81) g (lb)
Gross weight	1,810 (3.99) g (lb)
Carton dimensions (W x D x H)	12 x 12.8 x 10 (4.7 x 5.0 x 3.9) cm (in)

MOUNTING INFORMATION

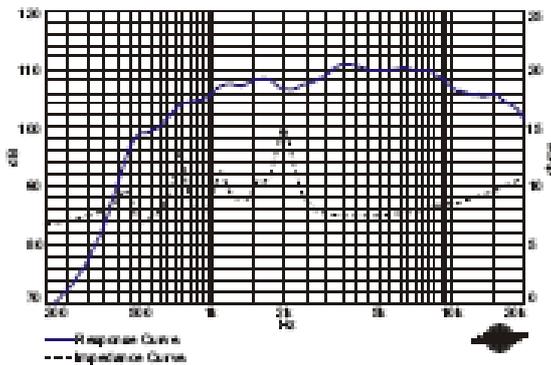
Horn connection	Screw-on 1/2" - 18 TPI
Connectors	Push terminal tabs
Polarity	Positive voltage applied to the positive terminal (red) of the springs on the lower throat

DRIVER x HORN CONNECTION

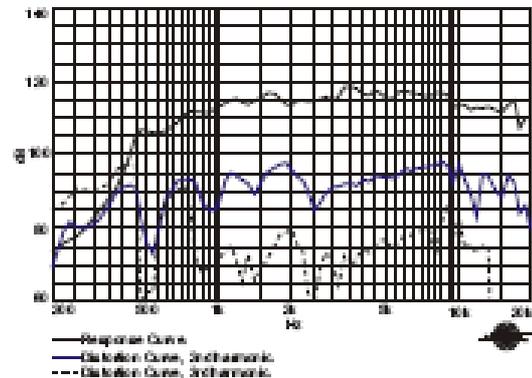


Dimensions in mm.

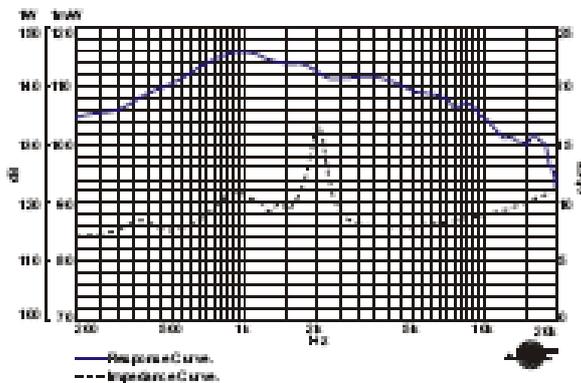
RESPONSE AND IMPEDANCE CURVES W/ HL14-25 HORN INSIDE AN ANECHOIC CHAMBER, 1 W / 1 m



HARMONIC DISTORTION CURVES W/ HL14-25 HORN, 5 W / 1 m.

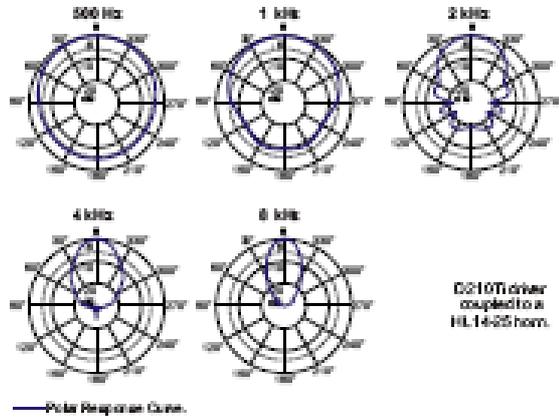


RESPONSE AND IMPEDANCE CURVES W/ PLANE-WAVE TUBE, 1 mW

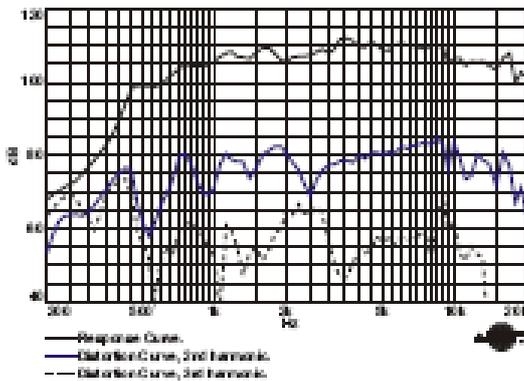


Frequency response and impedance curves measured with 25 mm terminated plane-wave tube.

POLAR RESPONSE CURVES



HARMONIC DISTORTION CURVES W/ HL14-25 HORN, 1 W / 1 m.



HOW TO CHOOSE THE RIGHT AMPLIFIER

The power amplifier must be able to supply twice the RMS driver power. This 3 dB headroom is necessary to handle the peaks that are common to musical programs. When the amplifier clips those peaks, high distortion arises and this may damage the transducer due to excessive heat. The use of compressors is a good practice to reduce music dynamics to safe levels.

FINDING VOICE COIL TEMPERATURE

It is very important to avoid maximum voice coil temperature. Since moving coil resistance (R_{vc}) varies with temperature according to a well known law, we can calculate the temperature inside the voice coil by measuring the voice coil DC resistance:

$$T_v = T_a + \left(\frac{R_{vc}}{R_{vc0}} - 1 \right) \left(T_c - 20 + \frac{1}{\alpha_{vc}} \right)$$

T_v , T_c = voice coil temperatures in °C

R_{vc} , R_{vc0} = voice coil resistances at temperatures T_v and T_a respectively.

α_{vc} = voice coil wire temperature coefficient at 25 °C.

Registered: Do. Pat. trademarks.

Patented: Patent holder's corporate trademark.

Specifications subject to change without prior notice.

Cod:152001 Rev: 03_01/05

ELÉTRICA SELENIUM S.A.
BR 200 Km 420 - Nova Serrá PMA/RS - Brasil -
CNPJ 09490-0/00
Tel: 21-479400 Fax: 21-426-1100
www.selenium.com.br
Atendimento Técnico: 0800 21 41 01

SELENIUM S.A. S.P.A.
Rua Aquino, 127 - São Paulo/SP - Brasil - CNPJ 09090-0/00
PABX: 11 2126 0000 Fax: 11 2126 0000

SELENIUM USA / SELENIUM EUROPE
www.selenium.com.br
S&P Fax: 1 800 363 02 10

ANNEXE 3

Mesure des paramètres T&S

Extrait du livre de Charles-Henry DELALEU « L'Optimisation des haut-parleurs et enceintes acoustiques » parue au Édition Radio en 1983.

Sujets indirectement abordés méritant attention:

- Les dimensions et cotes du Baffle Plan normalisé.
- Valeur de la résistance série lors du relevé de la courbe d'impédance du HP.
- La célérité du son n'est pas une constante. Elle varie en fonction de la température et de l'altitude. Une approche peut être donnée par la formule suivante :

$$C = 20.046796 \sqrt{(t + 273.6 - 6.5 \cdot 10^{-3} * z)}$$

Avec C exprimé en m/s, t = température en °C au niveau 0 (de la mer), z = Altitude en mètre.

Mesure des paramètres d'un haut-parleur

Courbe amplitude fréquence

La courbe amplitude fréquence est relevée par un microphone étalon, le signal est amplifié grâce à un amplificateur de mesure, puis enregistré sur papier. L'enregistrement est asservi au générateur qui excite le haut-parleur.

Le signal peut être une sinusoïde ou un bruit rose filtré par tiers d'octave (la méthode sinusoïdale permet de déceler plus facilement les accidents de parcours). La vitesse d'écriture de l'enregistreur doit être suffisamment rapide, et le signal injecté au haut-parleur est maintenu constant (2,83 volts pour un haut-parleur de 8 Ω, 2 volts pour 4 Ω). Le haut-parleur est placé, pour un relevé de courbe de réponse ou de distorsion, sur un baffle plan normalisé.

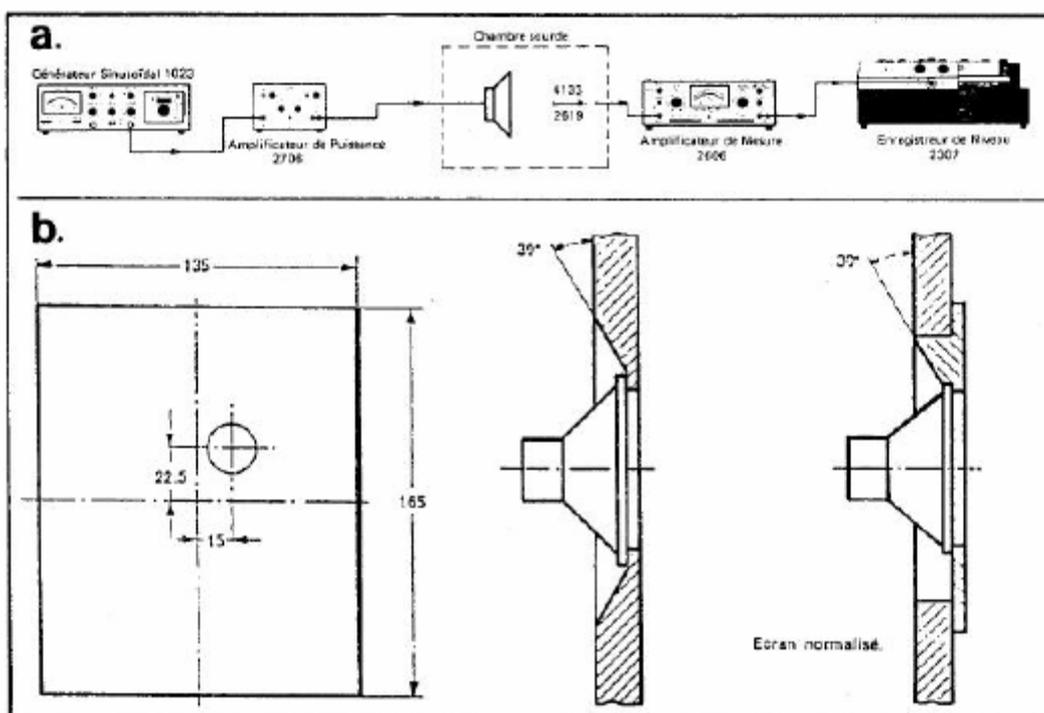


Fig. 27 : Mesure d'un haut-parleur sur baffle-plan
a. le banc de test ; b. le baffle plan normalisé.

Courbe d'impédance

Le relevé de la courbe d'impédance doit être effectué avec un haut-parleur rôdé (fréquence de résonance stabilisée). Celui-ci est placé sur baffle plan. Il est alimenté en courant constant à travers une résistance série de 300Ω à $1 \text{ k}\Omega$ ($R_{cc} \times 10$), et enregistré sur une gamme de 25 dB.

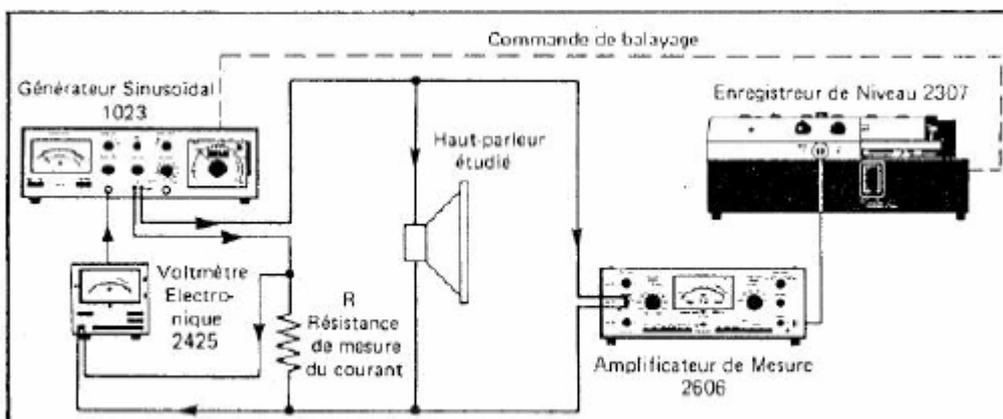


Fig. 28 : Mesure de la courbe d'impédance.

Facteur BL

Un courant i connu qui parcourt la bobine, donnant naissance à un déplacement de l'équipage mobile. Ce déplacement est annulé par un poids placé sur la membrane (équilibre).

$$\text{Soit : } mg = BLi \quad \Rightarrow \quad BL = \frac{mg}{i}$$

m = masse d'équilibrage ; g = constante de gravitation ; i = courant (quelques dixièmes d'ampères).

Induction dans l'entrefer

Une bobine très courte est placée dans l'entrefer (le nombre de spires, et la longueur L sont connus). La force engendrée par le passage d'un courant i est équilibré par la méthode de la balance.

$$B = \frac{mg}{Li}$$

Flux

Soit S la surface de l'entrefer

$$\begin{aligned} \Phi &= BS \\ S &= \pi dh \end{aligned}$$

h = hauteur de l'entrefer ; d = diamètre moyen de l'entrefer.

Fréquence de résonance

La fréquence de résonance correspond au maximum de la valeur du module de l'impédance (fig. courbe d'impédance).

Détermination de la masse mobile

Une masse additionnelle m connue est ajoutée à la masse de l'équipage mobile M_{ms} . Une nouvelle fréquence de résonance F' est relevée. La masse mobile incorpore la masse d'air chargeant les deux faces de la membrane du transducteur considéré, monté sur baffle plan infini.

$$\text{Soit : } M_{ms} = \frac{m}{\left(\frac{FR}{F'}\right)^2 - 1}$$

m = masse additionnelle ; FR = fréquence de résonance à l'air libre ; F' = fréquence de résonance avec la masse additionnelle.

Mesure des paramètres suivant la méthode de A.N. Thiele

Le relevé de la courbe d'impédance est effectué, on mesure l'impédance maximum, ainsi que la résistance courant continu.

$$\text{Soit : } r_0 = \frac{Z_{\max}}{R_{cc}}$$

Puis recherche des fréquences F_1 et F_2 (fréquences ayant une position parfaitement symétrique sur la courbe d'impédance de part et d'autre de la fréquence de résonance). Ces fréquences sont placées à une valeur de module de l'impédance (r_i) égale à :

$$Z_{F_1 F_2} = \sqrt{r_0 \times R_{cc}}$$

$$\text{Soit la fréquence de résonance : } FR = \sqrt{F_1 \times F_2}$$

Soit les coefficients de surtension :

$$Q_m = \frac{FR \times \sqrt{r_0}}{F_2 - F_1} \quad Q_e = \frac{Q_m}{r_0 - 1} \quad Q_t = \frac{Q_m}{r_0}$$

Mesure du volume d'air équivalent à l'élasticité de la suspension du haut-parleur.

Le haut-parleur est chargé par un volume parfaitement clos. Les paramètres sont relevés une seconde fois.

Soit V = le volume de charge ; FR_c = la fréquence de résonance, HP chargé ; Q_{ec} = le coefficient de surtension électrique, HP chargé.

$$V_{as} = V \left(\frac{FR_c \times Q_{ec}}{FR \times Q_e} - 1 \right)$$

De ces deux expériences découlent les paramètres suivants :

$V_{as} \rightarrow C_{as} \rightarrow M_{as} \rightarrow M_{ms} \rightarrow R_{ms} \rightarrow C_{ms} \rightarrow B_l \rightarrow C_{es} \rightarrow R_{es} \rightarrow L_{es} \rightarrow n$

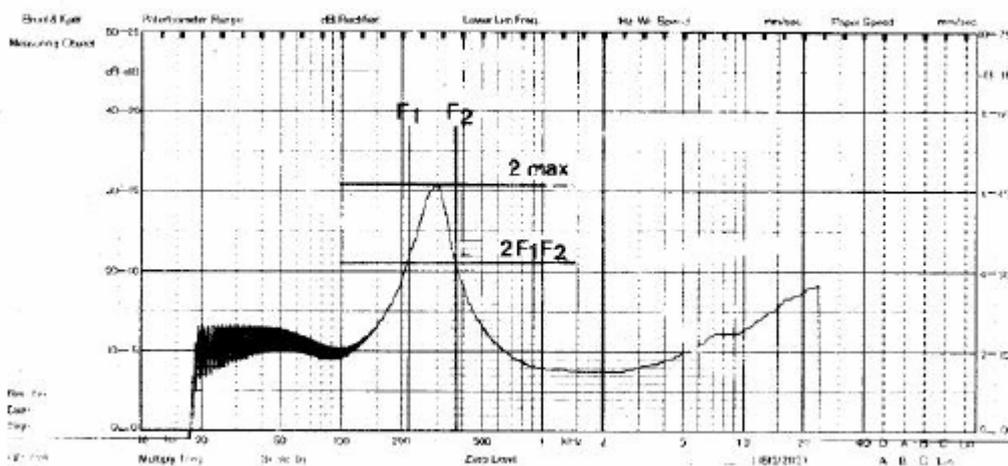


Fig. 29 : Détermination de $F_1 F_2 - F_{\max} \cdot Z_{F_1 F_2}$.

Mesure des paramètres suivant la méthode de J. Christophorou

A l'aide d'un accéléromètre (*) J. Christophorou mesure de façon précise l'accélération, la vitesse et le déplacement d'un diaphragme de haut-parleur. On obtient la réponse acoustique en onde stationnaire sans utiliser de chambre insonore.

La pression PF rms, produite par un piston circulaire rigide monté sur un baffle plan, est dépendante de la vitesse du piston Urms aux fréquences où la longueur d'onde est grande comparée aux dimensions de la source.

$$\text{Soit } PFR_{rms} = \frac{\rho_0 \omega \alpha_0^2 U_{rms}}{2r}$$

ρ_0 = densité de l'air ; ω = fréquence angulaire ; α_0 = rayon effectif de la membrane ; r = distance du point de mesure au centre de la membrane ; PF = pression ; U = vitesse.

Soit le déplacement : $X = X_0 e^{j\omega t}$ (**).

Soit la vitesse : $U = \frac{dX}{dt} = j\omega X$,

Soit l'accélération : $\alpha = \frac{dU}{dt} = j\omega U = j\omega \frac{dX}{dt} = -\omega^2 X$,

$$\text{Soit la pression : } PFR_{rms} = \frac{\rho_0 \alpha_0^2 \alpha_{rms}}{2r}$$

$$QTS = \frac{X \omega = \omega S}{X \omega \rightarrow 0} = \frac{X \omega = \omega S}{X \omega \gg \omega S} = \text{antilog } \frac{1}{10} \frac{dB}{2}$$

dB est la différence de niveaux entre le niveau à la fréquence de résonance et le niveau de référence en dB de la courbe d'impédance.

$$Q_m = r_0 QTS, r_0 = \frac{RE}{RE} \quad Q_e = \frac{Q_m}{r_0 - 1},$$

$$RE = RE + RES.$$

RE = résistance courant continu ; RES = résistance ayant la même valeur ohmique que l'impédance à la résonance.

Pression acoustique :

$$PA = \frac{\rho_0}{2\pi C} SD^2 \alpha_{rms}^2,$$

SD = surface effective du cône ; C = célérité du son dans l'air ; α_{rms} = rendement

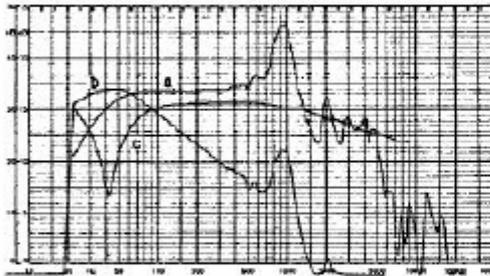


Fig. 30 : Mesure d'un haut-parleur à l'aide d'un accéléromètre. a. a. accélération ; b. vitesse ; c. admittance.

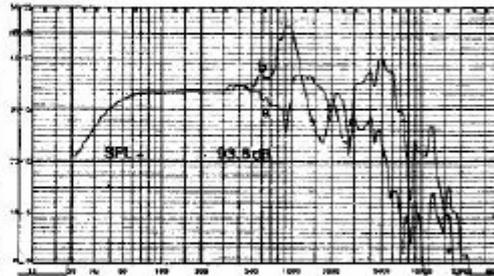


Fig. 30 : b. a. réponse en pression ; b. accélération.

* Masse maximum de l'accéléromètre = 5 grammes.

** Se référer aux notices sur les mesures par accéléromètre Bruel et Kjaer.

$$n = \frac{PA}{PE} \text{ (PE = puissance électrique aux bornes du haut-parleur),}$$

$$n = \frac{\varphi_0}{2\pi C} SD^2 \alpha_{rms}^2 \frac{RE}{V^2} \text{ (V = tension aux bornes du HP).}$$

$$V_{as} = \frac{nQ_e}{9,6 \times 10^{-10} FS^2} \text{ FS = fréquence de résonance.}$$

$$M_{ms} = \frac{\varphi_0 C^2 SD^2 \times 10^6}{4\pi^2 FS^2 V_{as}} \text{ Masse de l'accéléromètre incluse.}$$

$$BL = \left[\frac{2\pi FS RE M_{ms}}{Q_e} \right]^{-1}$$

Mesure des paramètres suivant la méthode simplifiée

La méthode de mesure des paramètres d'un haut-parleur par masse additionnelle consiste à mesurer et calculer les caractéristiques du haut-parleur jusqu'au QTS suivant la méthode Thiele. Au lieu d'utiliser un volume clos pour les autres paramètres, on détermine la valeur de la masse mobile M_m par masse additionnelle suivant la méthode décrite précédemment. De cette expérience découlent les paramètres suivants :

$M_{ms} \rightarrow M_{as} \rightarrow C_{as} \rightarrow V_{as} \rightarrow C_{ms} \rightarrow R_{ms} \rightarrow BL \rightarrow L_{es} \rightarrow C_{es} \rightarrow R_{es} \rightarrow n$

Mesure des paramètres suivant la méthode de O. Jacobsen

La réponse en tension aux bornes d'entrée d'un haut-parleur et la réponse en pression acoustique au centre du diaphragme, à partir d'un signal en escalier, sont enregistrées sous forme d'oscillogramme ou sur une table traçante. On en tire les éléments d'un circuit électrique équivalent et le facteur de force peut être déterminé et les paramètres dérivés calculés.

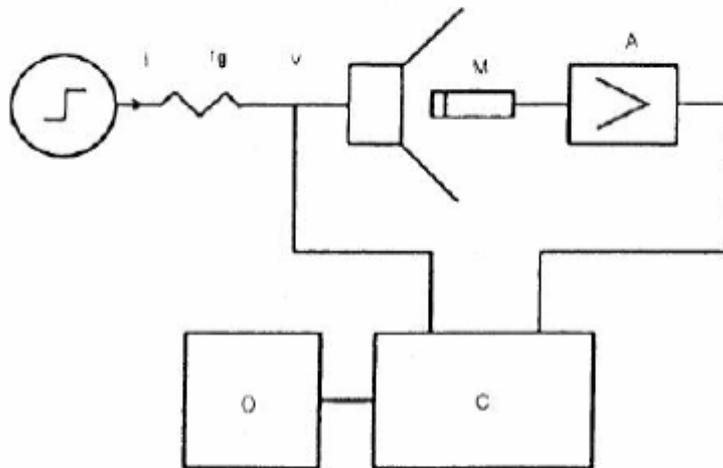


Fig. 31 : Mesure d'un haut-parleur par impulsion : les paramètres

R_g : résistance série ; c. : calculateur ; facultatif ; o : oscilloscope ; M : microphone ; A : amplificateur de puissance.

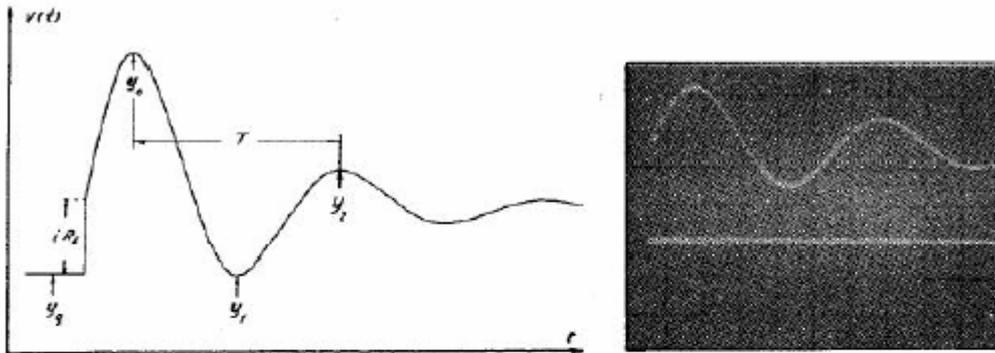


Fig. 32 : Réponse en tension aux bornes du haut-parleur (signal en escalier).

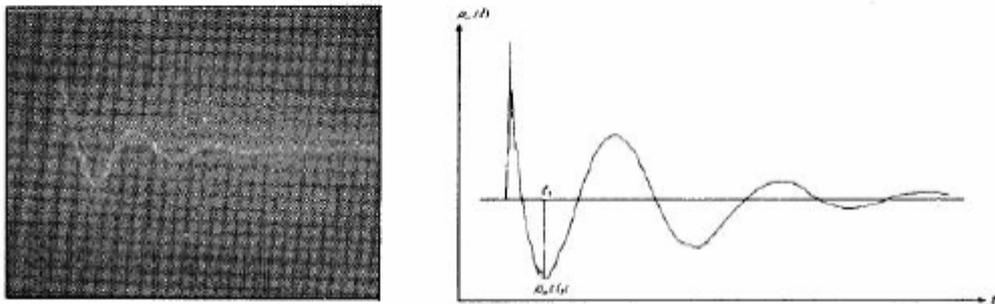


Fig. 33 : Réponse en pression acoustique (micro sur le plan d'émission), signal en escalier.

Le haut-parleur est excité par un générateur de signaux carrés ou par une pile électrique. Une résistance R_g est placée en série entre la source et le transducteur $R_g = R_{cc} \times 10$.

$$Fr = \frac{1}{T} \quad T = \text{période}$$

$$Ces = \frac{iR_{cc} \exp(\alpha t_0)}{\omega A_0 R_{cc}} \quad i = \text{courant}$$

$$t_0 = \frac{T}{4} + \frac{\tan^{-1}(\alpha/\omega)}{\omega}$$

$$Res = \frac{-1}{(2\alpha Ces)} \quad Les = \frac{1}{\omega^2 Ces}$$

$$BL = \frac{\varphi_0 \alpha eg}{P_{\mu C} (R_g + R_{cc})} \quad P_{\mu C} = \text{pression acoustique au centre du cône}$$

De ces données, nous pouvons calculer : RMS, CMS, MMS, puis Mas, Cas, Vas.

φ_0 = densité de l'air ; d = rayon effectif du diaphragme ; eg = tension aux bornes du générateur ; $\omega_0 = FR$ = fréquence de résonance du haut-parleur ; α = amortissement du système ; A_0 = amplitude de la première oscillation aux bornes du haut-parleur.

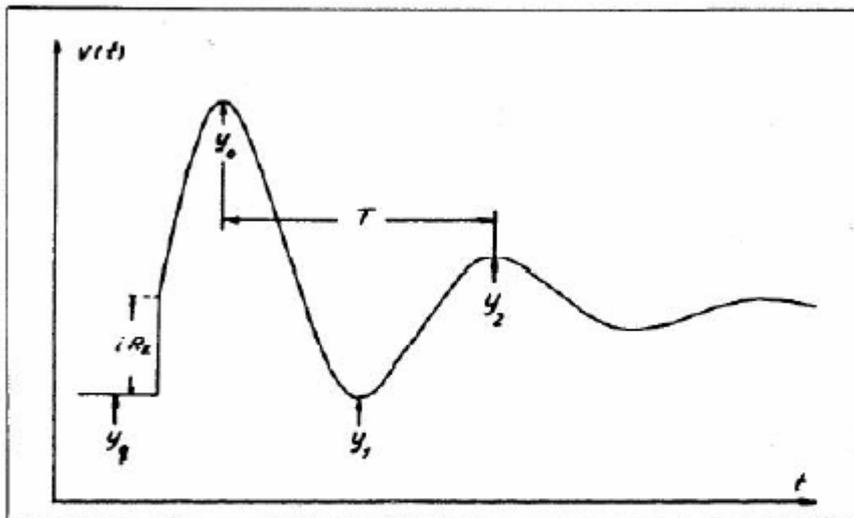


Fig. 34 : Détermination des points de référence.

Les ordonnées y_q, y_o, y_1, y_2 sont lues en unité arbitraire.

$$f = \frac{A_1}{A_0} = \exp\left(\frac{\alpha T}{2}\right)$$

$$y_o - y_1 = A_0 + A_1 = A_0(1 + f)$$

$$y_o - y_2 = A_0 - A_2 = A_0(1 - f^2)$$

$$\frac{y_o - y_2}{y_o - y_1} = 1 - f$$

$$f = \frac{y_2 - y_1}{y_o - y_1}$$

$$\alpha = \frac{2 \ln f}{T}$$

$$A_0 = \frac{y_o - y_1}{1 + f}$$

$$\omega_0^2 = \omega^2 + \alpha^2$$

$$iRE = y_o - A_0 - y_q$$

A_0 = amplitude 1^{er}, oscillation direction positive ; A_1 = amplitude 1^{er}, oscillation direction négative ; A_2 = amplitude 2^e, oscillation direction positive ; f = rapport entre les 2 premières oscillations ; \ln = logarithme népérien.

Nota : $Res = \frac{(B)^2}{RMS}$ $Les = (B)^2 \times CMS$ $Ces = \frac{Mms}{(B)^2}$

Détermination des paramètres électro-mécano-acoustiques

$$R_0 = \frac{Z_{\max}}{R_{cc}} \dots \dots \dots \Omega$$

$$ZF_1F_2 = \sqrt{R_0 \times R_{cc}}$$

$$FS \text{ Ou } FR = \sqrt{F_1 F_2} = \frac{1}{2 \pi \sqrt{M_{as} \times C_{as}}} \dots \dots \dots \text{ Hz}$$

$$Q_m = \frac{\sqrt{R_0 \times FR}}{(F_2 - F_1)}$$

$$Q_e = \frac{Q_m}{R_0 - 1}$$

$$Q_t = \frac{Q_m}{R_0} = \frac{Q_m \times Q_e}{Q_m + Q_e}$$

$$M_{ms} = \frac{m'}{\left(\frac{F_s}{F_s'}\right)^2 - 1} = M_{as} \times S^2 \dots \dots \dots \text{ kg}$$

$$M_{as} = \frac{M_{ms}}{S^2} = \frac{1}{2\pi FR \times C_{as}} \dots \dots \dots \text{ kgm}^4$$

$$C_{as} = \frac{1}{(2\pi FR)^2 \times M_{as}} = \frac{V_s}{\varphi_0 \times C^2} \dots \dots \dots \text{ m}^3\text{N}$$

φ_0 = densité de l'air en m^3 ; C = célérité du son.

$$V_{as} = C_{as} \times 140\,449 = C_{as} \times (\varphi_0 \times C^2) = V \left[\frac{FRC \times Q_e C}{FR \times Q_e} - 1 \right] \dots \text{ m}^3$$

$$R_{ms} = \frac{2 \times \pi \times FR \times M_{ms}}{Q_m}$$

$$C_{ms} = \frac{C_{as}}{S^2} \dots \dots \dots \text{ mN}$$

S = surface active de la membrane.

$$BL = \sqrt{\frac{2\pi \times FR \times M_{ms} \times R_{cc}}{Q_e}}$$

$$C_{es} = \frac{M_{ms}}{(BL)^2} \dots \dots \dots \text{ F}$$

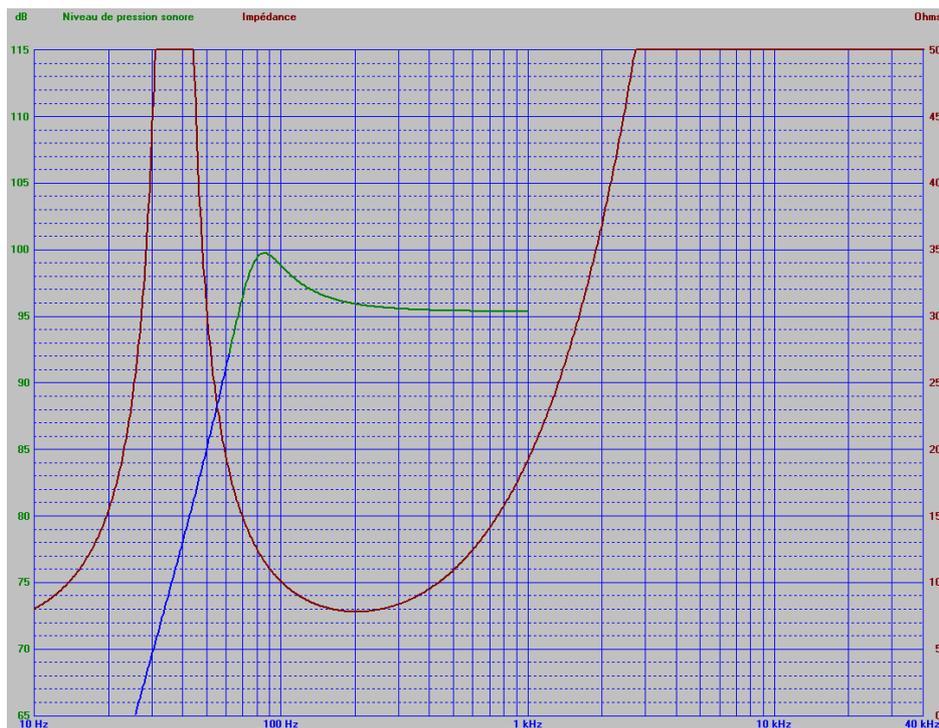
$$R_{es} = \frac{BL^2}{R_{ms}} \dots \dots \dots \Omega$$

$$L_{es} = BL^2 \times C_{ms} \dots \dots \dots \text{ H}$$

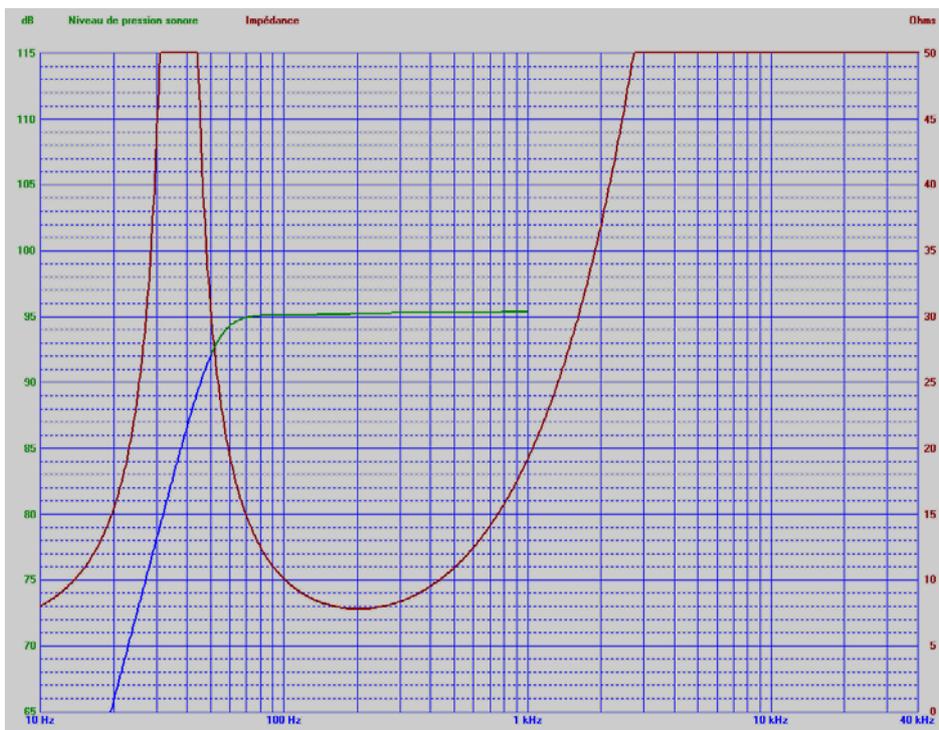
$$n = \text{rendement} = \frac{9,6 \times 10^{-7} \times (FR)^3 \times V_{as}}{Q_e} \times 100 \dots \dots \dots \%$$

$$\text{Efficacité} = \left[10 \log_{10} \left(\frac{\text{rendement}}{0,065} \right) \right] + 80 \dots \dots \dots \text{ dB}$$

ANNEXE 4 : Simulation du bass reflex

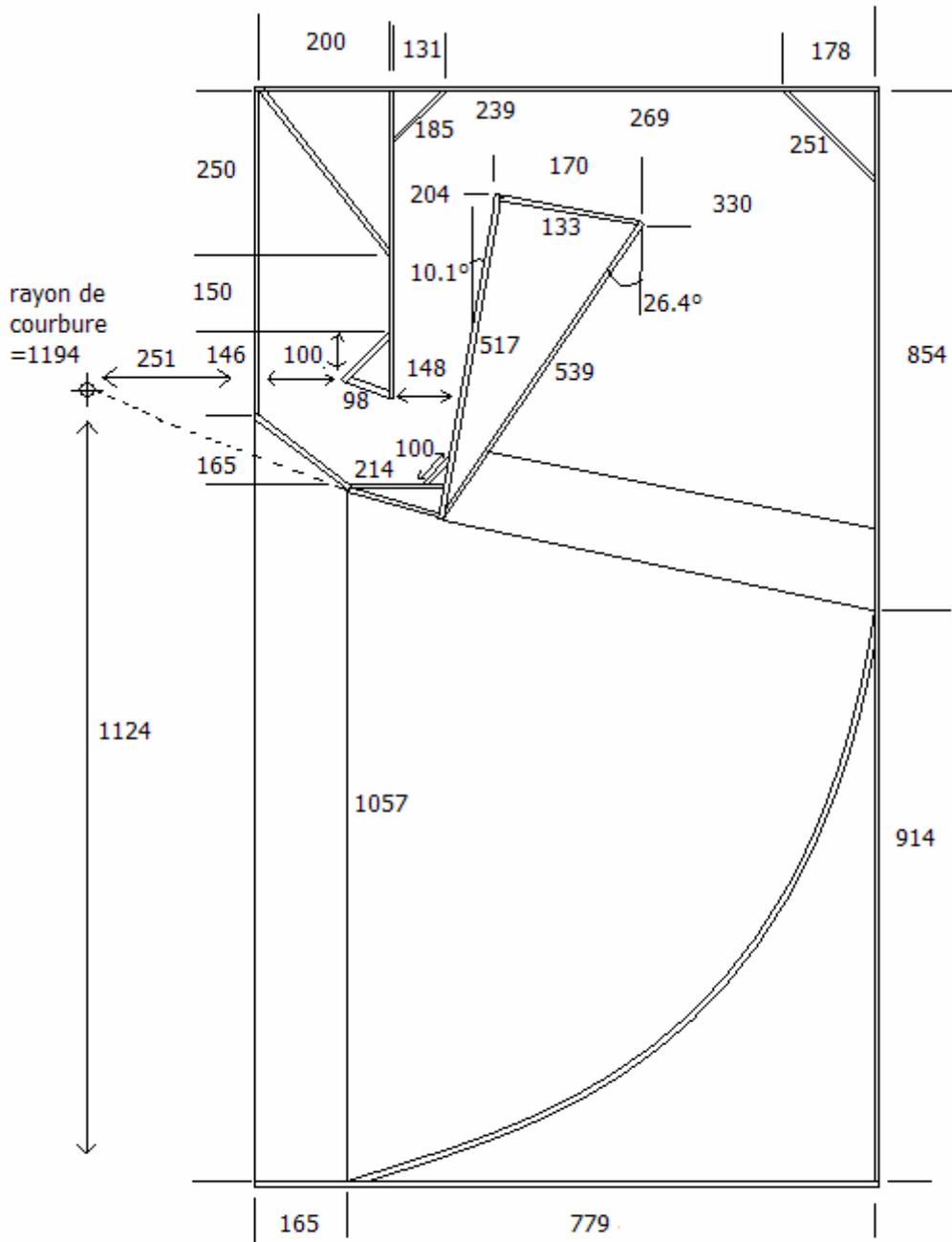


Le bass-reflex accordé à 68,8HZ ; coupure -3dB à 62Hz



La même enceinte accordée à 45HZ ; la coupure -3dB descend à 50HZ

ANNEXE 5 Un pavillon arrière



Le plan n'est pas à l'échelle
les planches font toutes 20mm d'épaisseur