

# Le caisson de grave

Francis Brooke

[www.francisaudio.fr](http://www.francisaudio.fr)

septembre 2011

La dernière version de ce document est disponible ici :  
[http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/Le\\_caisson\\_de\\_grave.pdf](http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/Le_caisson_de_grave.pdf)

## Sommaire

<b>0. Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Les limites physiques .....</b>	<b>7</b>
1.1 Première limite : le déplacement de la membrane .....	7
1.2 Deuxième limite : la contrainte température.....	12
1.3 Troisième limite : la puissance admise par le haut-parleur .....	14
1.4 Quatrième limite : la surface du haut-parleur .....	15
1.5 Cinquième limite : la charge du haut-parleur .....	16
<b>2. Le baffle plan .....</b>	<b>17</b>
<b>3. L'enceinte close.....</b>	<b>21</b>
<b>4. L'enceinte bass-reflex .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Conclusions .....</b>	<b>37</b>
<b>Annexe 1 : Coupe schématique d'un haut-parleur .....</b>	<b>42</b>
<b>Annexe 2 : Rendement et sensibilité .....</b>	<b>43</b>
<b>Annexe 3 : Vérification de la cohérence des paramètres TS .....</b>	<b>47</b>
<b>Annexe 4 : Modélisation de l'enceinte bass-reflex .....</b>	<b>48</b>
<b>Annexe 5 : Les accords bass-reflex Legendre et Bessel .....</b>	<b>53</b>

## Historique

Révision 8.1 du 15/09/2011 : Ajout complément chapitre 4  
Révision 8 du 23/08/2011 : Prise en compte des commentaires d'Eric Degny (ajout chapitre 4.6) et de J-C Balthazard  
Révision 7 du 27/05/2011 : Ajout conclusions  
Révision 6 du 4/05/2011 : Ajout chapitre 4  
Révision 5 du 13/04/2011 : Ajout annexe 5 et prise en compte des remarques de Jean-Michel Le Cléac'h et Eric Degny (ajout chapitre 2.2)  
Révision 4 du 5/04/2011 : Ajout annexe 4 et prise en compte des remarques de JIM82 et VieuxCoyotte (ajout chapitre 0 - Introduction)  
Révision 3 du 21/03/2011 : Ajout annexe 3 et prise en compte des commentaires de Rascalito, forr et Jean-Marc Plantefève  
Révision 2 du 16/03/2011 : Ajout chapitre 3  
Révision 1 du 13/03.2011 : Ajout annexe 2 et prise en compte des remarques de jimbee, Cyrille, Lpelec et forr.  
Révision 0 du 11/03/2011 : Edition initiale

## 0. Introduction

Un des objectifs d'un système de reproduction sonore haute-fidélité est d'obtenir une courbe de réponse en fréquence qui s'étend de 20 Hz à 20kHz.

La reproduction des fréquences les plus basses demande un haut-parleur adapté (essayer de faire sortir du grave à un tweeter à dôme de 25mm...) mais également une enceinte adaptée.

Ainsi, certains dispositifs comme le baffle-plan ne permettent pas de reproduire les basses fréquences et doivent être complétés par un caisson de grave spécifique.

Voir l'exemple de Martin Logan ci-contre.

Un avantage important d'un caisson de grave est « d'alléger » les enceintes principales en enlevant les fréquences graves.

Celles-ci vont donc mieux fonctionner et générer moins de distorsions.



On notera que même une enceinte à priori correcte dans le grave, puisque équipée d'un 38cm, comme la JBL K2 S9800 ci-contre, est complétée par 4 caissons S1S-EX à base de 46cm JBL 2242H dans une configuration home-cinéma ...

**Il est donc important d'identifier les contraintes liées à la reproduction du grave.**

**C'est l'objet de ce document.**

On trouve sur le marché deux approches pour la reproduction « haut de gamme » du grave.

Une approche « Hi-Fi » bien représentée par le Velodyne DD-18 avec un 46cm alimenté par un amplificateur classe D de 1250 W :

[http://www.velodyne.com/vproducts/detailpdf/DD-18\\_Details.pdf](http://www.velodyne.com/vproducts/detailpdf/DD-18_Details.pdf)

Une approche « professionnelle » bien représentée par le JBL 4642A équipé de deux 46 cm JBL 2241H :

<http://www.jblpro.com/pages/pub/cinema/4642a.pdf>

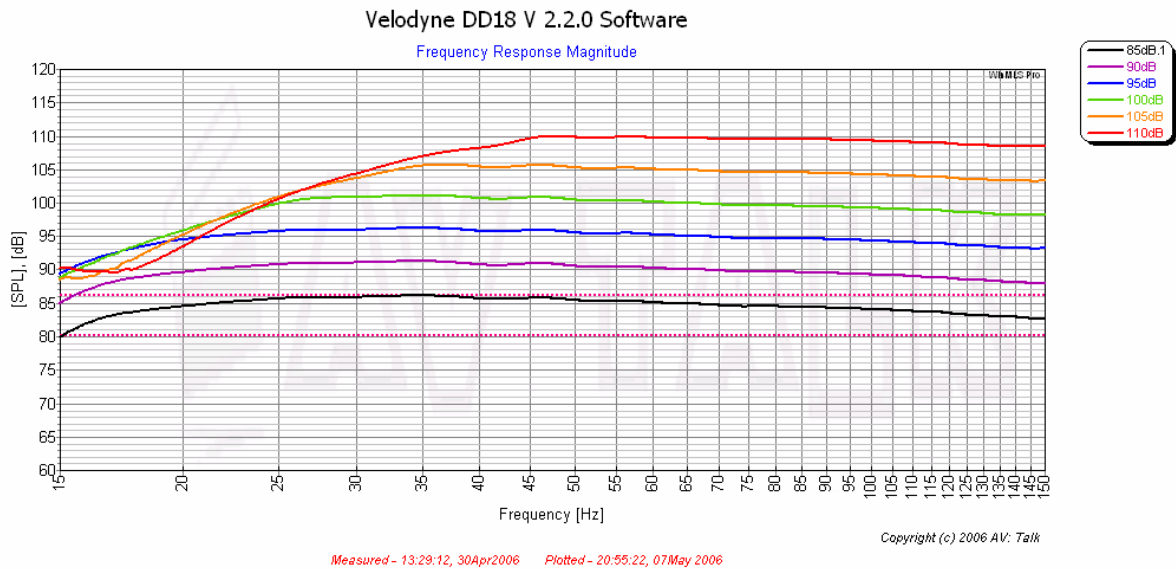
<http://www.jblpro.com/pages/pub/components/2241.pdf>

Ces deux produits sont assez différents sur les critères de niveau sonore maximal ou d'encombrement.

Chacun choisira en fonction de sa contrainte principale...

Quelques remarques à propos du Velodyne DD-18.

Le niveau sonore maximal est obtenu au dessus de 50 Hz.



<http://www.avtalk.co.uk/showthread.php?t=15243>

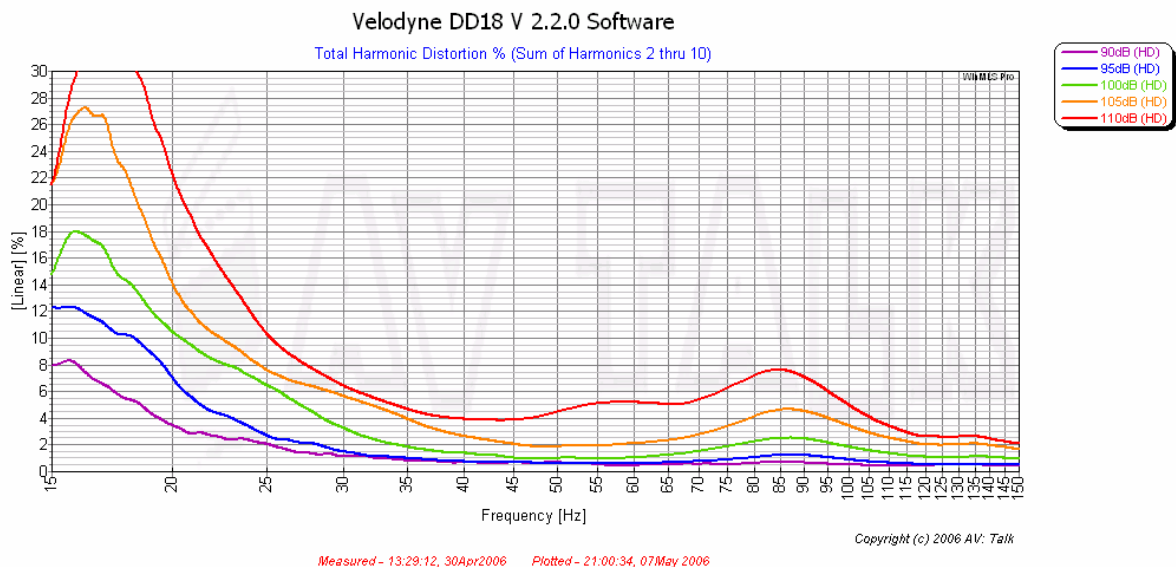
En dessous de cette fréquence deux contraintes apparaissent :

- la limitation du niveau sonore par le Xmax du haut-parleur,
- la mise en route du limiteur.

On constatera que, malgré l'augmentation du niveau sonore en dessus de 50Hz (95 -> 100 -> 105 -> 110 dB), le niveau sonore à 20 Hz reste d'environ 95 dB.

Par contre, avec cette version 2.2.0 du software, le taux de distorsion augmente lorsque le niveau sonore augmente au dessus de 50 Hz.

Il atteint ainsi environ 22% à 20Hz lorsque l'on vise 110 dB au dessus de 50 Hz.



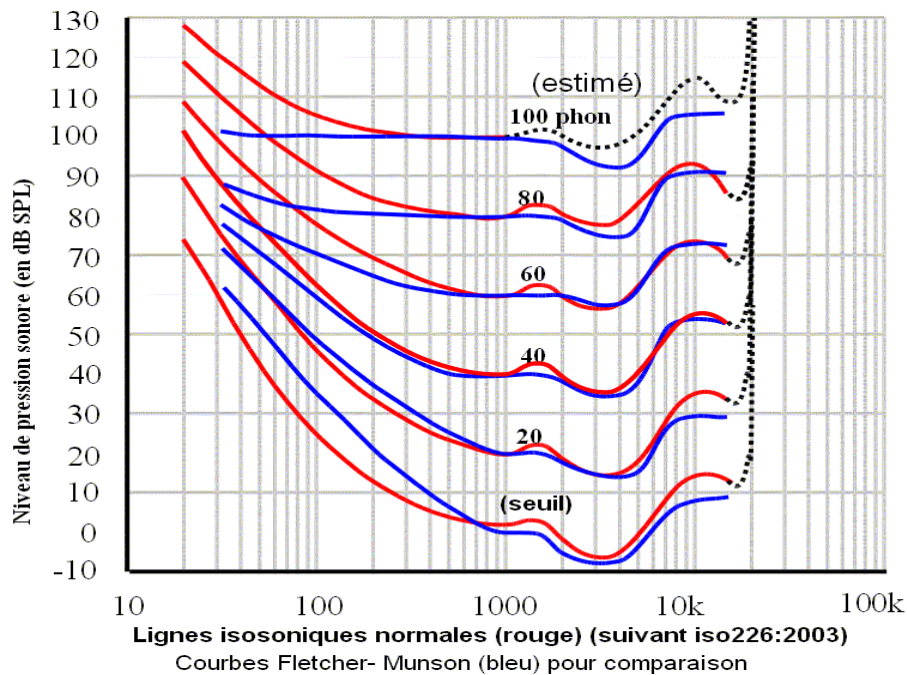
C'est probablement la mise en service du « très » efficace limiteur qui induit cette augmentation du taux de distorsion.

Pour terminer cette introduction, voici quelques réflexions à propos de la « Hi-Fi ».

Histoire de bien mettre les pieds dans le plat, disons de suite que la « Hi-Fi » est fidèle à pas grand chose !

La première cause majeure de non-fidélité d'une installation « Hi-Fi » concerne le niveau sonore.

En effet, les courbes de Fletcher et Munson montrent que la réponse de l'oreille est très dépendante du niveau sonore :



[http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe\\_isotonique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_isotonique)

En clair, si vous écoutez à un niveau moyen de 60 dB ou de 85 dB, vous n'allez pas percevoir le même équilibre sonore.

A titre d'illustration, voici une anecdote racontée sur un forum :

« Il y a quelques années (1980), j'animais des soirées étudiantes et je venais d'acheter le dernier 33t d'AC/DC Back in Black tout juste arrivé dans les bacs.

Passage sur la sono en fin d'après-midi et première réflexion :  
Purée !!! C'est nul, c'est déséquilibré, on entend que le médium...

Après quelques instants de réflexion, la lumière jaillit : mais oui, mais c'est bien sûr !!!

Une bonne rotation du bouton de volume dans le sens des aiguilles d'une montre et vient la deuxième réflexion :

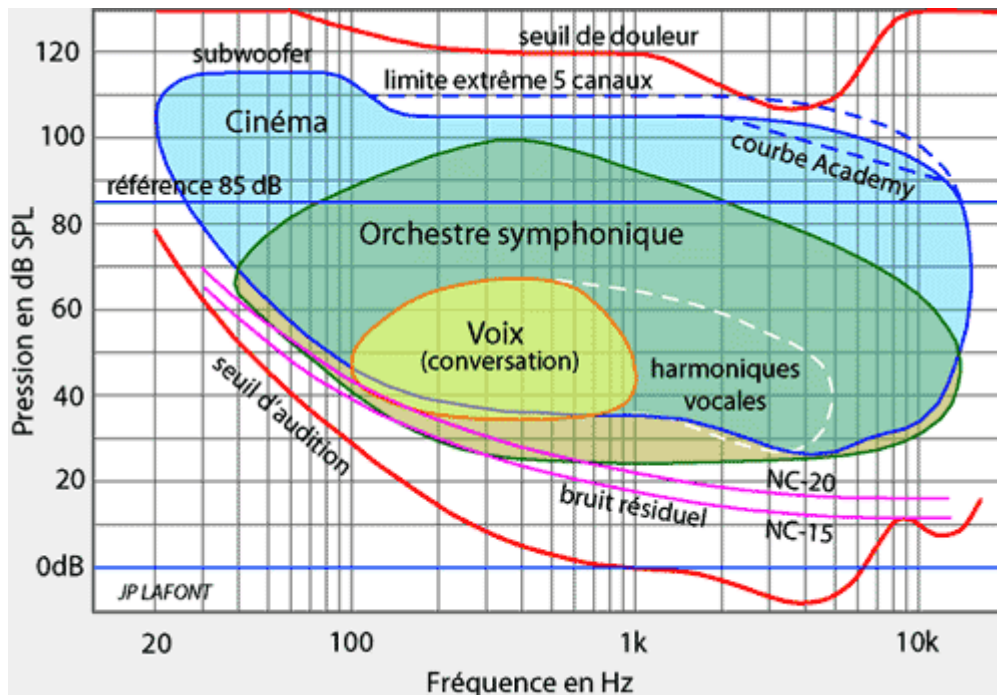
Purée !!! C'est excellent, ça tape, c'est bien équilibré ! »

Plusieurs morales à cette histoire :

- la loi des  $400000 \text{ Hz}^2$  (une enceinte qui a une bande passante de 20-20kHz est aussi équilibrée qu'une enceinte qui a une bande passante de 100-4kHz) est, AMHA, une légende urbaine,
- la principale cause de non fidélité d'une installation « Hi-Fi » est un volume sonore inadapté,
- les albums d'AC/DC sont prévus pour être écouté FORT !

En « hi-fi », lorsque vous achetez un CD, rien ne vous informe sur le niveau sonore adapté afin de reproduire fidèlement l'équilibre sonore voulu par l'ingénieur-son.

Dans le contexte du home-cinéma, les choses sont beaucoup plus précises puisque normées : pour un signal à 0dbFS, le niveau sonore doit être de 105 dB(SPL) pour les enceintes principales et 115 dB(SPL) pour le caisson de grave :

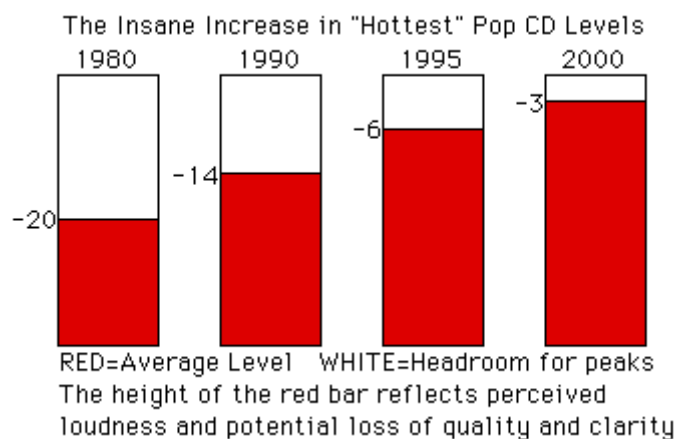


[http://www.lafontaudio.com/divers/dynamic\\_moyn.gif](http://www.lafontaudio.com/divers/dynamic_moyn.gif)

La référence 85dB est une recommandation de Dolby. C'est le niveau sonore mesuré en pondération C et mesure lente pour un signal à -20 dBFS

<http://www.lafontaudio.com/dossiers/85dB.htm>

Cette référence n'existait pas en « Hi-Fi », en témoigne l'évolution à la hausse du niveau moyen des CD de musique Pop :



<http://www.digido.com/images/insane.gif>

Suite à ce constat, certains ingénieurs du son comme Bob Katz recommandent d'utiliser cette référence pour une cabine de monitoring en enregistrement « Hi-Fi » :

<http://www.digido.com/level-practices-part-1.html>

<http://www.digido.com/level-practices-part-2-includes-the-k-system.html>

<http://www.digido.com/audio-faq/m/monitor-calibration.html>

La deuxième cause majeure de non-fidélité d'une installation « Hi-Fi » concerne le local d'écoute.

En effet, la pièce intervient dans le résultat final pour environ 60% (dans le médium-aigu) à 90% (dans le grave).

Ici aussi, la haute-fidélité consistera à entendre la même chose que ce que l'ingénieur-son a voulu faire... dans son lieu de mixage.

Les contraintes d'un studio de mixage sont parfaitement définies car normées : le temps de réverbération doit être de l'ordre de 250 ms pour un volume de 100 m<sup>3</sup> (ITU-R BS.1176) :

La valeur moyenne du temps de réverbération,  $T_m$ , dans la gamme de fréquences comprises entre 200 Hz et 4 kHz, doit être:

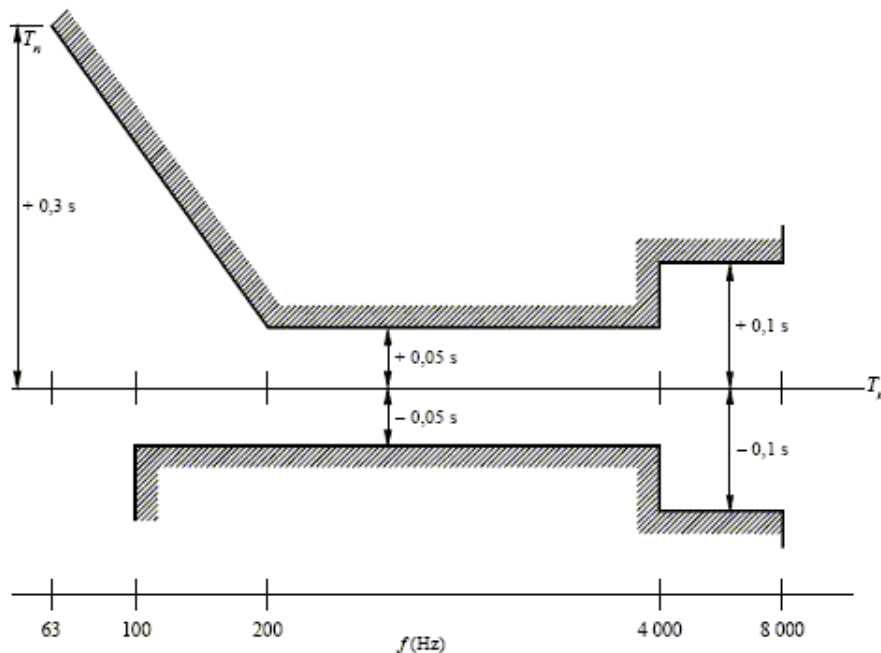
$$T_m = 0,25 (V / V_0)^{1/3} \quad \text{s}$$

où:

$V$ : volume du local

$V_0$ : volume de référence de 100 m<sup>3</sup>.

La Fig. 1 présente les tolérances valables pour  $T_m$  dans la gamme comprise entre 63 Hz (voir la Note 1) et 8 kHz.



[http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-III!PDF-F.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-III!PDF-F.pdf)

Sauf qu'environ 100% des installations « Hi-Fi » ne respectent pas cette règle !

Certes, il peut être agréable de rajouter de la réverbération, du traînage et de perdre en définition et intelligibilité, conséquence d'un temps de réverbération trop important et d'un rapport champ direct sur champ diffus insuffisant, mais c'est clairement de la non-fidélité.

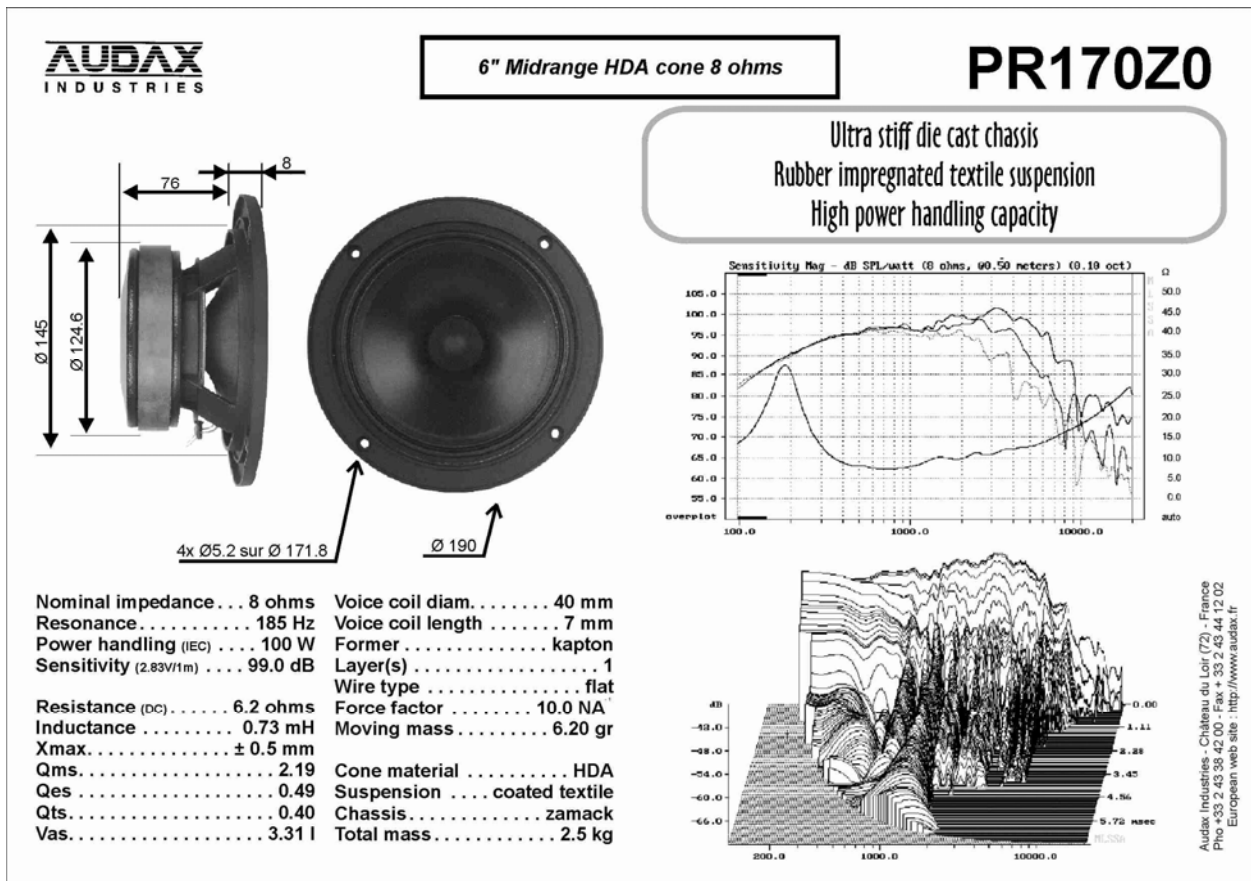
**En résumé, une installation « Hi-Fi », c'est un système non calibré dans un local inadapté dont les défauts sont plaisants à son propriétaire...**

Après cette page philosophique, revenons à notre caisson de grave.

# 1. Les limites physiques

## 1.1 Première limite : le déplacement de la membrane

Prenons un haut-parleur de médium haut-rendement comme l'Audax PR170Z0 dont les caractéristiques sont détaillées ici :

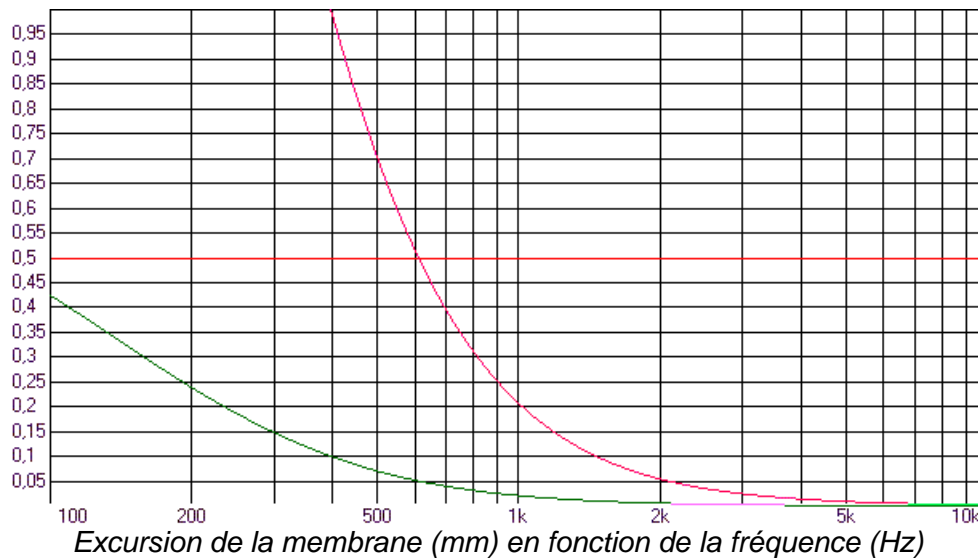


<http://www.audax.fr/archives/pr170z0.jpg>

Pour émettre du son, la membrane doit bouger !

Le déplacement de la membrane va dépendre de la puissance électrique apportée au haut-parleur (plus la tension aux bornes du haut-parleur est élevée, plus le déplacement sera important), mais également de la fréquence.

Le graphe qui suit illustre le déplacement de la membrane en fonction de la fréquence (entre 100 et 10 kHz) pour une tension de 2,8 V<sub>eff</sub> donnant 1 W / 8 ohm (courbe verte) et de 28 V<sub>eff</sub> donnant 100 W / 8 ohm (courbe rose) :



Plus la fréquence est basse, plus le déplacement de la membrane est important.

**Le déplacement maximal X<sub>max</sub> est donc un des facteurs limitant d'un haut-parleur destiné à faire du grave.**

De façon plus précise, dans la plage utile et pour un même niveau sonore, le déplacement  $x$  est inversement proportionnel au carré de la fréquence (si la fréquence  $F$  est divisée par 2, le déplacement  $x$  est multiplié par 4) et proportionnel à la racine de la puissance (si la puissance  $P$  est multipliée par 100, le déplacement  $x$  est multiplié par 10).  
Soit  $x = \text{constante} * \text{racine}(P) / F^2$

La loi de Laplace s'applique à la bobine mobile d'un haut-parleur et exprime la force motrice  $F$  appliquée à la bobine :

$$F = B * L * I \text{ avec}$$

$B$  : champ magnétique créé par l'aimant

$L$  : longueur du fil dans l'entrefer

$I$  : courant traversant la bobine mobile

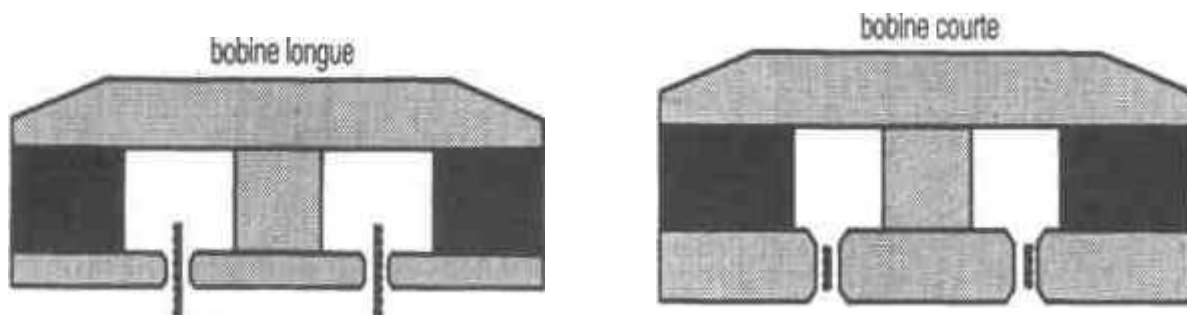
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Force\\_de\\_Laplace](http://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Laplace)

Ce qui fait bouger la membrane, c'est donc le courant qui passe dans la longueur de fil située dans l'entrefer dans lequel règne le champ magnétique généré par l'aimant.

Lorsque le déplacement de la bobine mobile devient trop important, une partie de la bobine quitte l'entrefer, ce qui réduit la longueur  $L$  de fil dans l'entrefer et réduit donc la force motrice.

On rencontre deux types de bobines :

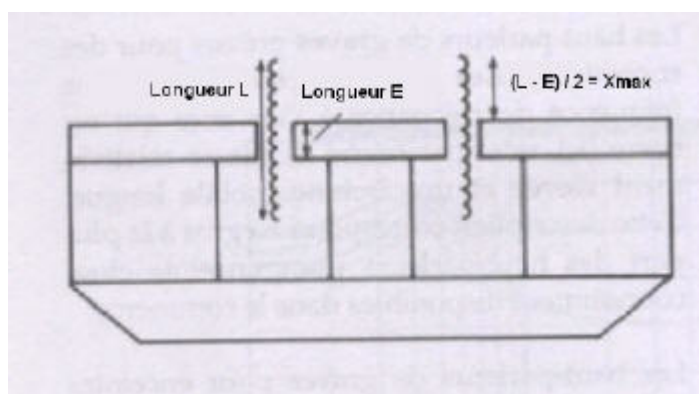
- les bobines longues : la hauteur de la bobine ( $L$  ou  $H_c$  ou  $H_{coil}$  ou  $Voice\ coil\ length$ ) est plus importante que la hauteur de l'entrefer ( $E$  ou  $H_g$  ou  $H_{gap}$  ou  $Air\ gap\ height$ ),
- les bobines courtes : la hauteur de la bobine  $H_c$  est plus faible que la hauteur de l'entrefer  $H_g$ .



<http://www.pure-hifi.info/conseils-astuces-technologie-menu-vertical/2110-le-haut-parleur-2>

On rencontre généralement des bobines longues.

On définit alors le déplacement maximal  $X_{max}$  de la membrane par le déplacement pour lequel la longueur de fil dans l'entrefer reste constante soit  $(L-E)/2$  ou  $(H_c-H_g)/2$  :



<http://www.pure-hifi.info/images/stories/cad/les%20parametres/xmax-close.jpg>

Pour le PR170Z0  $L=7$  mm et  $E=6$  mm. Le  $X_{max}$  est donc de  $(7-6)/2 = 0,5$  mm. Le trait en rouge sur le graphe en tête de ce chapitre représente cette limite.

On constatera que cette limite est dépassée en dessous de 600 Hz pour la puissance nominale de 100 W. Ceci justifie la recommandation du constructeur de filtrer ce haut-parleur à 600 Hz (avec un passe-haut d'ordre 3).

Certains constructeurs de haut-parleurs utilisent d'autres définitions de ce déplacement maximal  $X_{max}$ . A titre d'illustration, RCF emploie cette définition :  $X_{max} = (H_c-H_g)/2 + H_g/4$

[http://www.rcf.it/fr\\_FR/products/precision-transducers/low-frequency-transducers/l18p300](http://www.rcf.it/fr_FR/products/precision-transducers/low-frequency-transducers/l18p300)

Dans la pratique, le  $X_{max}$  défini par  $(H_c-H_g)/2$  est plutôt un ordre de grandeur.

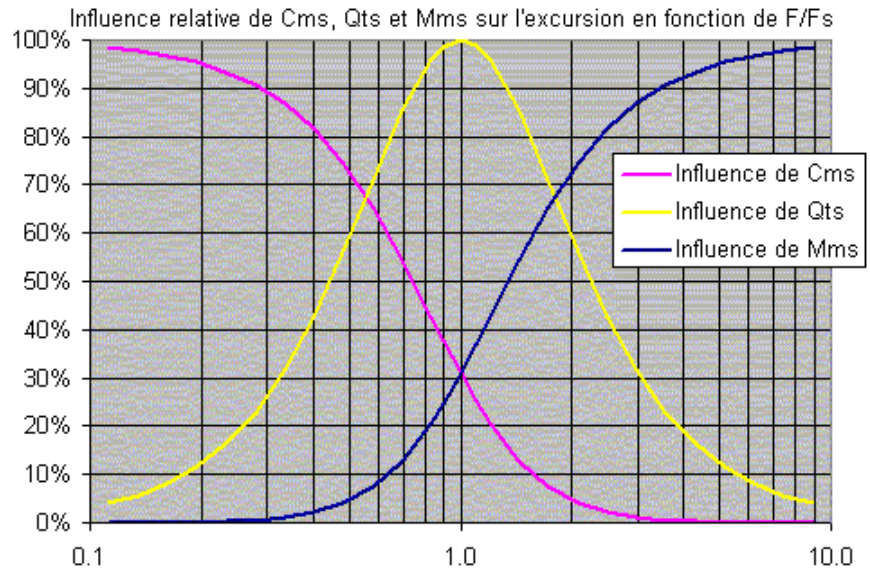
En effet, le modèle proposé par Thiele et Small est un modèle linéaire, c'est à dire qu'il suppose que les paramètres  $BL$ , raideur de la suspension  $K_{ms}=1/C_{ms}$ , résistance mécanique  $R_{ms}$  et masse mobile  $M_{ms}$  sont indépendants de l'excursion de la bobine.

Or certains de ces paramètres ne sont pas constants, même lorsque l'excursion de la bobine mobile est faible et inférieure à  $(H_c-H_g)/2$ .

Rappelons que la force motrice est la force de Laplace  $BL \cdot I$  et que les forces résistantes sont :

- la force de rappel de la suspension (proportionnelle à la raideur de la suspension  $K_{ms}$ , inverse de  $C_{ms}$ ),
- les forces de frottement (amortissement mécanique proportionnel à  $R_{ms}$  et amortissement électrique proportionnel à  $BL^2/Re$ )
- la force d'inertie (proportionnel à  $M_{ms}$ ).

Ces trois forces résistantes ont un impact relatif différent en fonction de la fréquence :



En dessous de la fréquence de résonance  $F_s$ , la force résistante principale est la force de rappel,  
 Autour de  $F_s$ , la force résistante principale est la conséquence de l'amortissement  $Q_{ts}$ ,  
 Au dessus de  $F_s$ , la force résistante principale est la force d'inertie.

Une première cause de non-linéarité, qui concerne les basses fréquences, est la non-linéarité de  $C_{ms}$ , inverse de la raideur de la suspension  $K_{ms}$  :

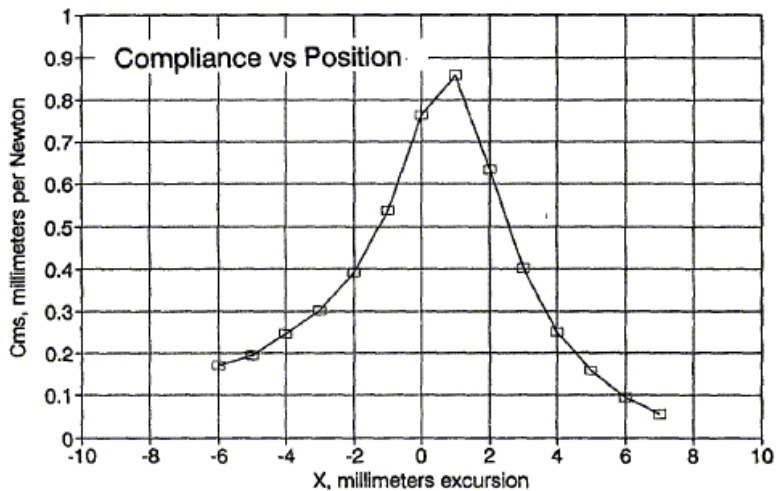


Figure 4.  $C_{MS}$  versus excursion for the 6 X 9 inch automotive woofer.  $C_{MS}$  drops to 20% by +5 mm of excursion.

Une deuxième cause de non-linéarité, est la non-linéarité du BL :

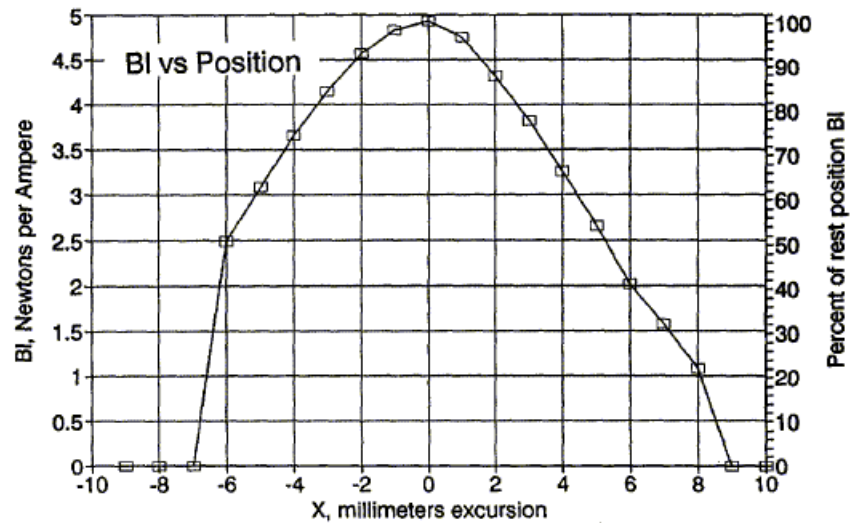


Figure 3. BI factor versus excursion for the 6 X 9 inch automotive woofer. BI drops to 50% of the rest position value by +5 mm of excursion.

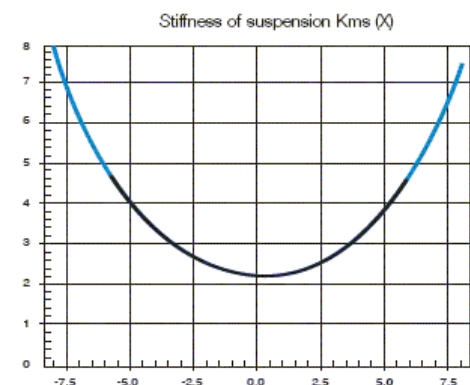
<http://jipihorn.free.fr/Projets%20en%20cours/Mesures/dlcpaper.pdf>

Certains (rares) fabricants donnent les courbes d'évolution du BL et de la raideur Kms en fonction du déplacement de la bobine mobile. Voir, par exemple, Celestion et sa gamme NTR :

Typical NTR BL Symmetry

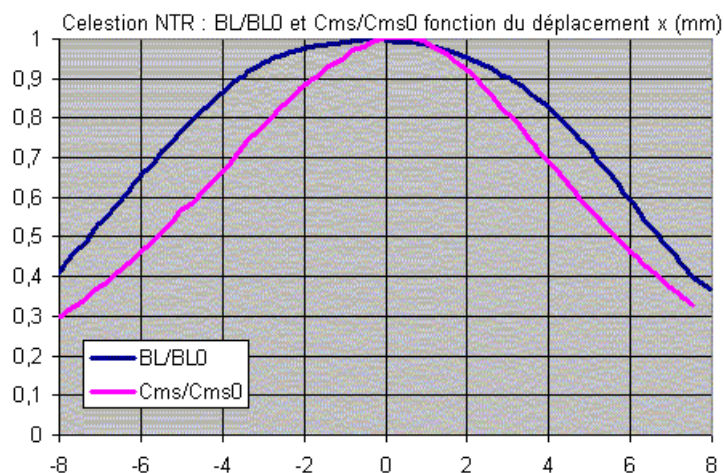


Typical NTR Stiffness (K) Symmetry



[http://professional.celestion.com/pro/media/celestion\\_oem.pdf](http://professional.celestion.com/pro/media/celestion_oem.pdf)

On notera, ce qui est le cas général, que la non-linéarité du Cms est plus importante que celle du BL :



## 1.2 Deuxième limite : la contrainte température

### 1.2.1 La tenue en température

Si le niveau sonore augmente régulièrement avec la puissance à faible niveau (1 -> 10 W donne normalement + 10 dB(SPL)), ce n'est plus tout à fait le cas à forte puissance...

En effet le rendement de transformation de l'énergie électrique en énergie acoustique par un haut-parleur est très faible : environ 2,5 % seulement pour un haut-parleur « haut rendement » de 97 dB(SPL) !

La majorité de la puissance transmise au haut-parleur est donc perdue sous forme de chaleur dans la bobine mobile par effet joule :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_Joule](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Joule)

Cette chaleur augmente la température de la bobine mobile.

Ceci se traduit par une augmentation de la résistance électrique de la bobine.

En effet la résistance de la bobine mobile dépend de la résistivité  $\rho$  (qui varie avec le matériau utilisé), de la longueur de fil L et de la section du fil S :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

<http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivité%C3%A9>

La résistivité  $\rho$ , caractéristique du matériau, dépend de la température :

$$\rho = \rho_0 * ( 1 + \alpha * (T - T_0) )$$

avec  $\rho_0$  résistivité à la température  $T_0$  (environ  $1,712 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  à  $25^\circ C$  pour le cuivre).

et  $\alpha$  coefficient de température (environ  $0,00393 \text{ } 1/^\circ C$  pour le cuivre).

La température maximale acceptable par une bobine mobile dépend du type de vernis et du matériau du support de la bobine (Nomex, Kapton...).

Poyun fabricant de bobine pour haut-parleur donne comme température maximale du support de la bobine :  $220^\circ C$  pour le Nomex,  $250^\circ C$  pour la fibre de verre,  $300^\circ C$  pour le Kapton...

<http://www.poyun.com/en/materialinc.jsp?id=49&csid=41>

Poyun donne également des indications sur l'effet du type de vernis sur la tenue en température

[http://www.poyun.com/en/zrqb\\_x\\_y\\_2.jsp](http://www.poyun.com/en/zrqb_x_y_2.jsp)

## 1.2.2 La compression thermique

Afin d'illustrer l'effet de compression thermique, prenons une température maximale de 250°C.

En passant de 25 à 250°C, la résistivité et la résistance augmente d'un facteur  $1+0,00393*(250-25) = 1,88$ .

En supposant que la tension U aux bornes du haut-parleur est constante (par exemple 2,8 Veff, soit la tension donnant une dissipation de 1W dans une résistance de 8 Ω) et en utilisant la loi d'Ohm  $I = U / R$ , la force motrice  $F = B * L * I$  peut s'exprimer ainsi :

$$F = B * L * U/R$$

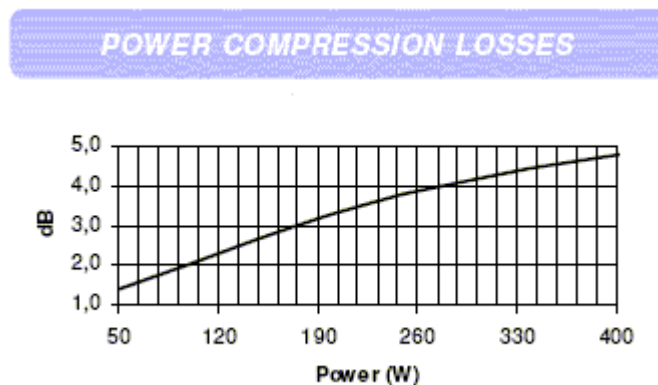
L'augmentation de température, en augmentant la résistance de la bobine mobile, réduit donc la force motrice.

Une température qui augmente de 25 à 250°C, se traduit par une diminution de la force motrice de 47 % !

Les constructeurs parlent de « Power compression losses ».

Un exemple avec le Beyma SM118 ayant une puissance nominale de 400 W.

<http://profesional.beyma.com/pdf/SM-118%20NE.pdf>



Concrètement, pour ce SM118 avec une puissance de 400 W, le niveau sonore attendu est de  $97+10*\log_{10}(400) = 123$  dB(SPL).

Sauf que, compte-tenu des pertes par compression thermique d'environ 5 dB, le niveau sonore sera en réalité de  $123-5 = 118$ dB(SPL).

Notons que ces pertes ne sont pas prises en compte dans des logiciels comme Unibox ou WinISD...

Cette perte de sensibilité est calculée en appliquant pendant 5 min un bruit rose filtré (25-1200 Hz).

Une autre conséquence de l'augmentation de Re avec la température est l'augmentation du Qes du haut-parleur puisque Qes est proportionnel à Re :

$$Q_{es} = R_e / B L^2 * \text{racine}(M_{ms}/C_{ms})$$

Cette augmentation du Qes, donc du Qts, va modifier le design de l'enceinte.

Autrement dit, une enceinte de sonorisation dédiée à l'obtention d'un niveau sonore élevé aura un dimensionnement différent de celui d'une enceinte hi-fi utilisant le même haut-parleur.

### 1.3 Troisième limite : la puissance admise par le haut-parleur

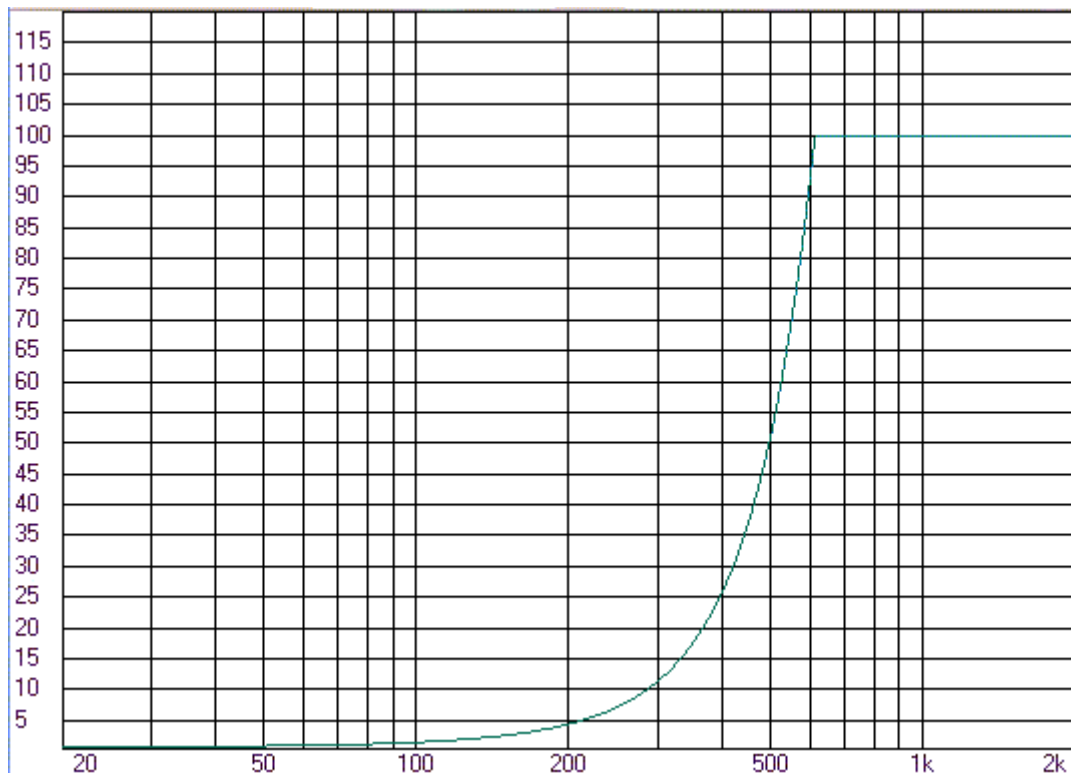
Pour faire de la musique, il faut apporter de l'énergie !

Le haut-parleur supporte une puissance électrique maximale, qui résulte de la prise en compte de deux limites :

- la limite de l'excursion maximale dans les basses fréquences,
- la limite de la température maximale dans les hautes fréquences.

Pour l'Audax PR170Z0, les limites sont un  $X_{max}$  de 0,5 mm et une puissance nominale de 100 W

Dans ces conditions, la puissance maximale admissible est la suivante :



*Puissance maximale admissible (W) en fonction de la fréquence (Hz)*

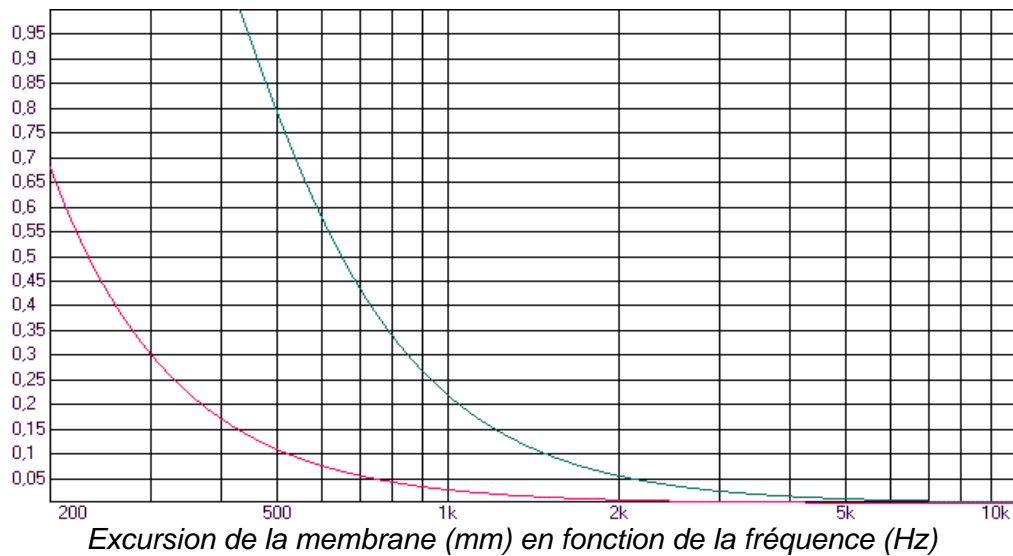
Au dessus de 600 Hz, la puissance maximale admissible est la puissance nominale (100 W).

En dessous de 600 Hz, la limite du  $X_{max}$  fait chuter drastiquement la puissance maximale admissible : seulement 1,4 W à 100 Hz !

Dans ce contexte, on comprend mieux l'intérêt d'un filtrage adapté pour les éliminer les basses fréquences d'un médium ou d'un tweeter...

## 1.4 Quatrième limite : la surface du haut-parleur

Comparons l'excursion de la membrane du 17 cm Audax PR170Z0 avec celle du 46 cm Beyma SM118 pour un même niveau sonore de 118 dB(SPL) (PR170Z0 avec 100W et SM118 avec 167W) :



On peut constater que, pour ce même niveau sonore de 118 dB(SPL), l'excursion du SM118 ( $S_d = 1150\text{cm}^2$ ) est environ 8 fois plus faible que celle du PR170Z0 ( $S_d = 140\text{cm}^2$ ).

Ce ratio d'environ 8 est celui des surfaces d'émission des haut-parleurs  $1150/140 = 8,2$ .

Le niveau sonore dépend directement du volume déplacé par le haut-parleur, c'est-à-dire du produit surface d'émission ( $S_d$ ) par excursion ( $x$ ). Ainsi, un haut-parleur de surface huit fois plus faible demandera une excursion huit fois plus grande pour obtenir le même niveau sonore.

**La surface d'émission  $S_d$  est donc un des facteurs limitant d'un haut-parleur de grave.**

## 1.5 Cinquième limite : la charge du haut-parleur

Vous venez d'acheter votre dernier haut-parleur de grave, par exemple un 25 cm « car-audio » comme le JBL W10GTi qui est censé descendre jusqu'à environ 20 Hz :

[http://www.jbl.com/resources/Brands/jbl/Products/ProductRelatedDocuments/en-US/BoxesandParameters/W10GTi\\_rev\\_f.pdf](http://www.jbl.com/resources/Brands/jbl/Products/ProductRelatedDocuments/en-US/BoxesandParameters/W10GTi_rev_f.pdf)

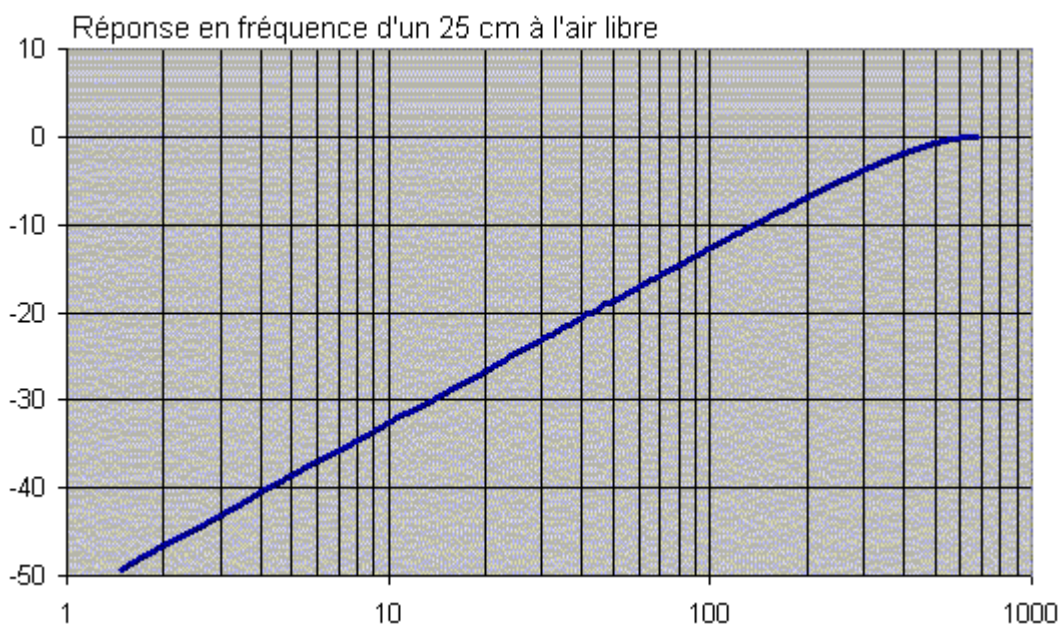
Vous le sortez du carton et vous le branchez directement sur l'ampli pour apprécier le dernier Gotan Project.

Et là, vous constaterez que, pour un sub, il manque clairement quelque chose...

Physiquement, dans cette configuration d'un haut-parleur à l'air libre (en « free-air » pour les anglais), lorsque la membrane se déplace vers l'avant, l'air poussé vers l'avant par la membrane est « aspiré » par l'arrière du haut-parleur.

Ceci crée un court-circuit acoustique qui rend inefficace le haut-parleur dans les basses fréquences.

Une rapide simulation montre que ce court-circuit réduit le niveau sonore à 20 Hz d'environ 27 dB(SPL) !

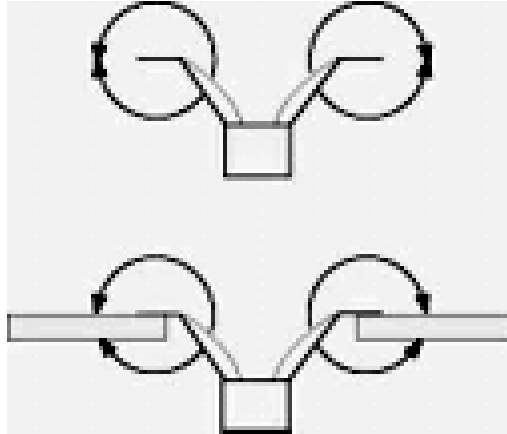


L'absence de grave d'un haut-parleur à l'air libre était donc prévisible...

## 2. Le baffle plan

### 2.1 Le baffle plan traditionnel

Le phénomène de court-circuit acoustique peut être évité en séparant l'onde émise à l'avant de l'onde émise à l'arrière par un baffle plan :

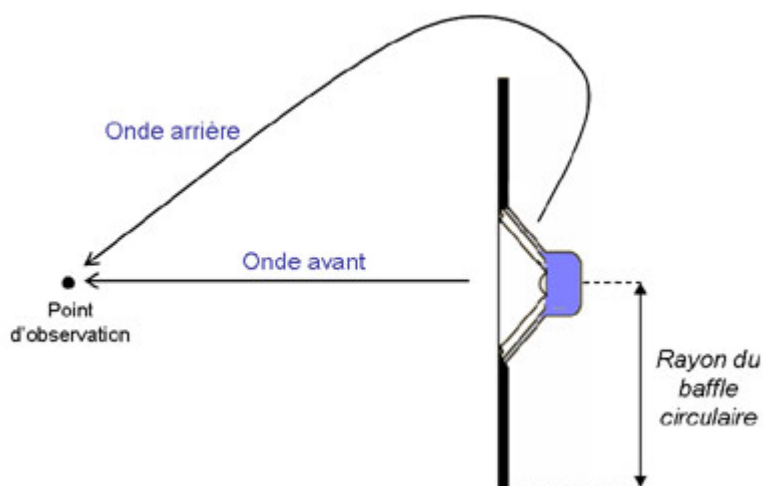


Toutefois ce baffle plan devra être de grande taille pour être efficace dans les basses fréquences.

En effet, le facteur important est le ratio diamètre  $D$  du baffle sur longueur d'onde  $\lambda$ . La longueur d'onde dépend de la vitesse du son  $c$  (on prend généralement  $c = 344$  m/s) et de la fréquence  $F$  par la relation  $\lambda$  (m) =  $c$  (m/s) /  $F$  (Hz).

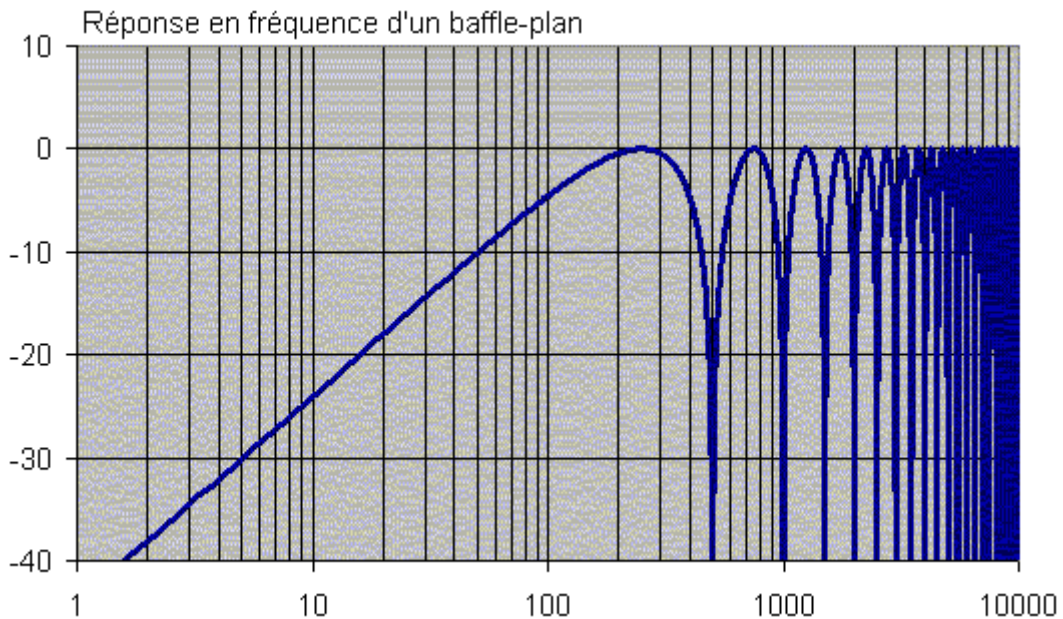
Plus la fréquence  $F$  est basse, plus la longueur d'onde  $\lambda$  est grande devant le diamètre  $D$  du baffle plan et plus le court-circuit acoustique sera important.

Par ailleurs, non seulement l'onde arrière est de polarité inversée, mais elle met plus de temps que l'onde avant pour arriver au point d'écoute :



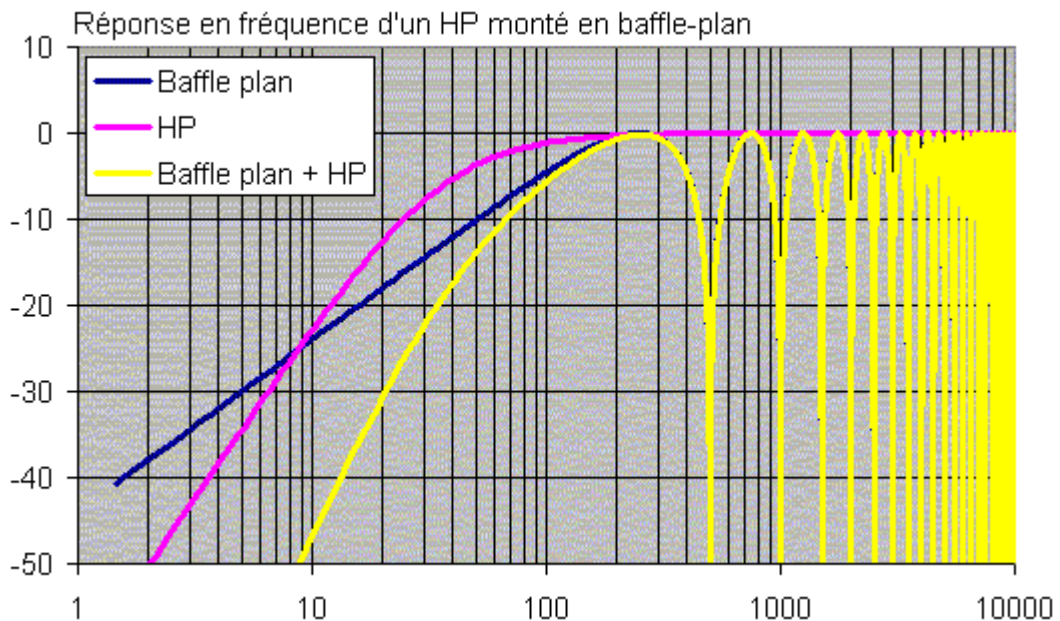
[http://www.sonomag.com/Archives/Article\\_Go\\_comprendre\\_enceintes-acoustiques\\_Id\\_2067.html](http://www.sonomag.com/Archives/Article_Go_comprendre_enceintes-acoustiques_Id_2067.html)

. Cette interaction entre l'onde avant et l'onde arrière (retardée par rapport à l'onde avant) va se traduire non seulement par une atténuation des basses fréquences, mais également par une réponse en fréquence « en peigne » avec des creux et des bosses dans les hautes fréquences :



Dans cet exemple, le diamètre du baffle plan circulaire est de  $D = 69 \text{ cm}$ . On constate des annulations à 500 Hz, 1 kHz, 1,5 kHz... Toutes ces fréquences pour lesquelles l'onde arrière annule l'onde avant sont multiples de  $c/D = 344/0,69 = 500 \text{ Hz}$  avec  $c$  vitesse du son = 344 m/s. En dessous de 250 Hz, soit  $c/(2*D)$ , la réponse décroît avec une pente de 6 dB/octave.

A cette réponse du baffle plan, s'ajoute la réponse propre du haut-parleur. On obtient alors la réponse globale de l'ensemble baffle plan + haut-parleur :



**En résumé, le baffle plan est parfaitement inadapté pour faire du grave !**

## 2.2 Le « baffle plan » amélioré

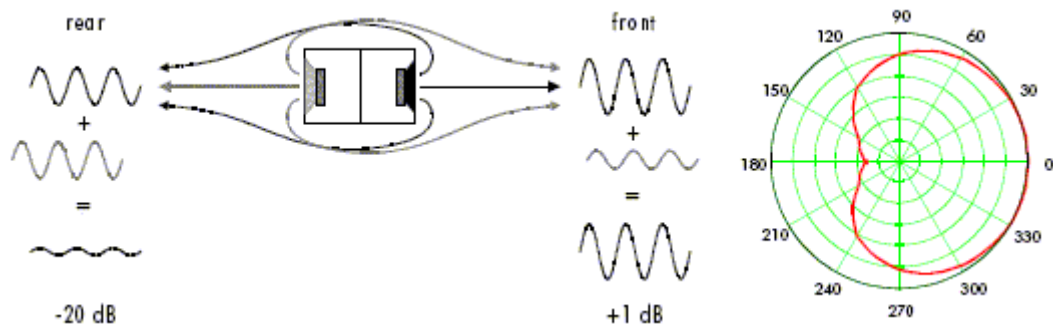
Comment obtenir l'avantage du baffle plan (un fonctionnement en dipôle, c'est-à-dire un grave directif !) sans son inconvénient majeure (son incapacité à faire du grave).

Impossible ?

Si ! Non seulement c'est possible, mais ça existe dans le domaine de la sonorisation sous le vocable « Caisson de grave cardioïde ».

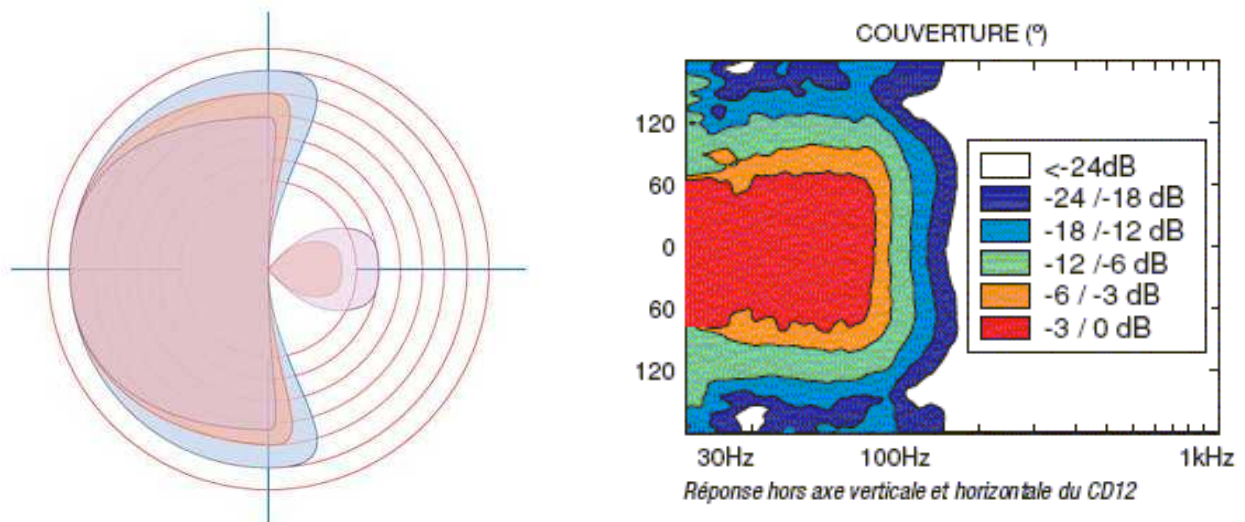
Il est généralement constitué de deux (ou trois) haut-parleurs.

Pour faire simple, le haut-parleur arrière est en opposition de phase avec un retard ajouté (correspondant à la distance entre les haut-parleurs avant et arrière) afin d'annuler l'onde arrière et, ainsi, de créer la directivité recherchée :



[http://www.dbaudio.com/pub/files/TI330\\_1.2FR.PDF](http://www.dbaudio.com/pub/files/TI330_1.2FR.PDF)

Il est ainsi possible d'obtenir un dipôle asymétrique avec un niveau sonore réduit d'environ 15 dB à l'arrière de l'enceinte et donnant vers l'avant une dispersion horizontale et verticale de 120° x 120° :



[http://nexo-sa.com/images/category\\_sub\\_bass\\_technology\\_1.jpg](http://nexo-sa.com/images/category_sub_bass_technology_1.jpg)

[http://nexo-sa.com/attachments/products/8/nexo\\_cd12\\_datasheet\\_french.pdf](http://nexo-sa.com/attachments/products/8/nexo_cd12_datasheet_french.pdf)

Quelques représentants de cette nouvelle famille de caisson de grave :

[http://nexo-sa.com/attachments/products/9/nexo\\_cd18\\_datasheet.pdf](http://nexo-sa.com/attachments/products/9/nexo_cd18_datasheet.pdf)

[http://nexo-sa.com/attachments/products/15/nexo\\_geo-sub\\_datasheet\\_2.pdf](http://nexo-sa.com/attachments/products/15/nexo_geo-sub_datasheet_2.pdf)

<http://www.dbaudio.com/fr/systems/black/j-series/j-sub/>

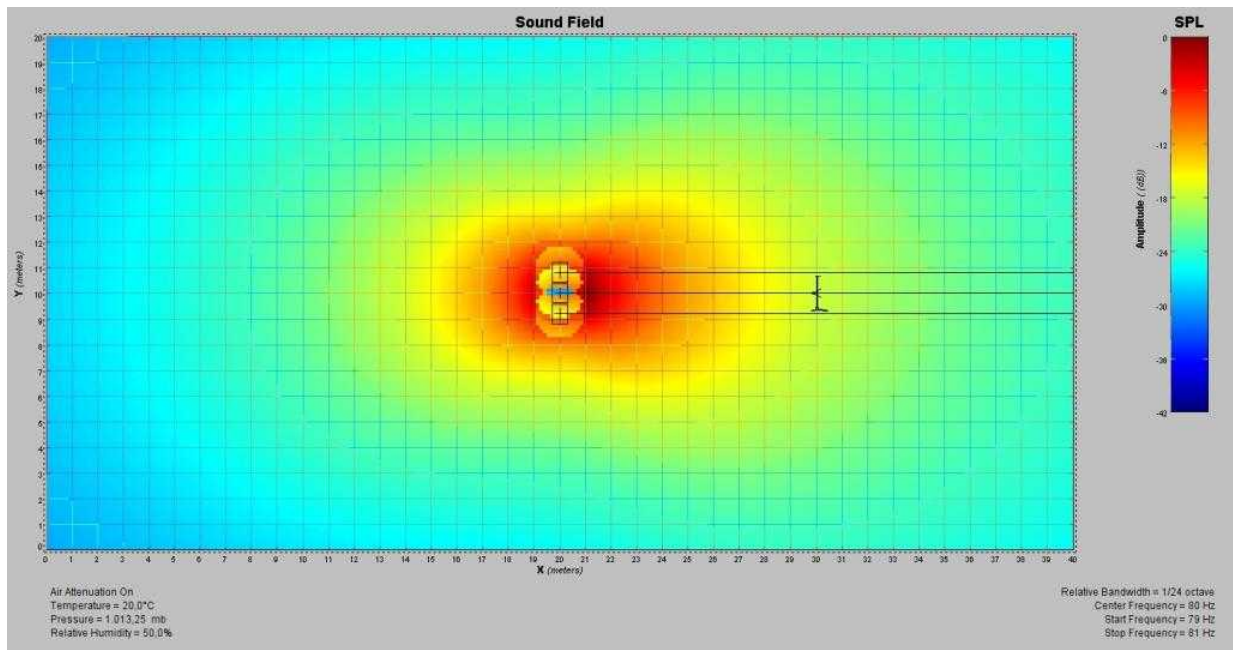
<http://www.meversound.com/products/mseries/m3d-sub/>

<http://www.l-acoustics.com/products-sb28-subwoofer-44.html>

<http://www.adamsonsystems.com/pdf/specs/Adamson%20SpekTrix%20Sub.pdf>

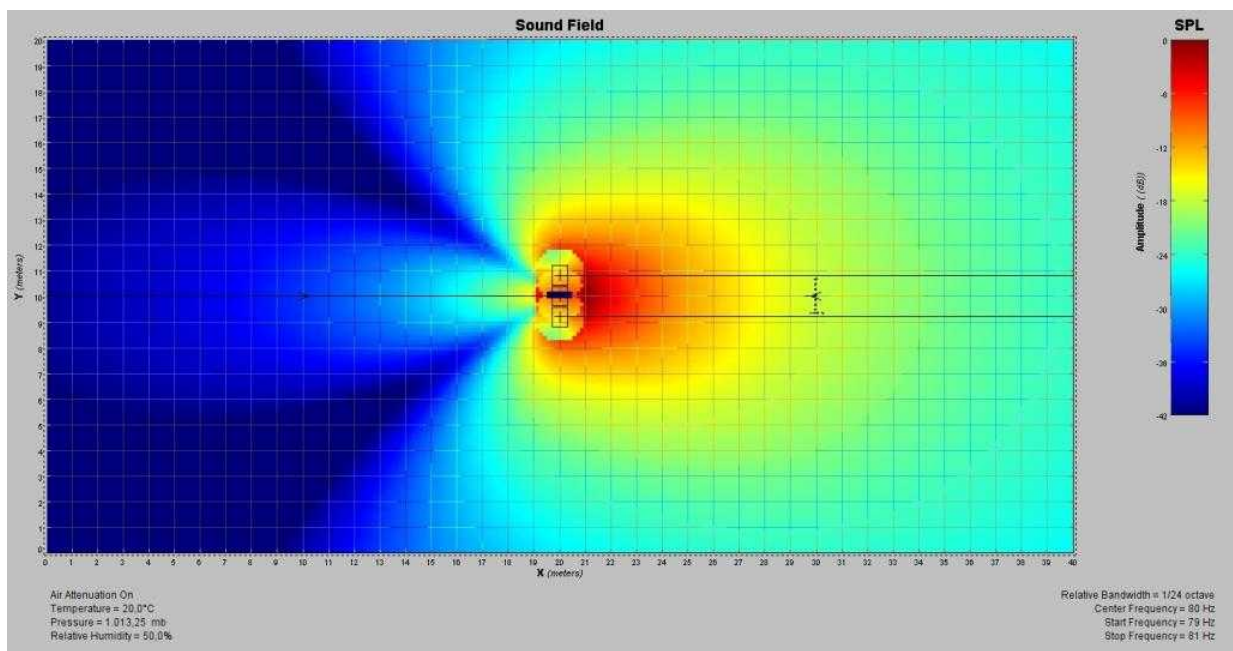
Quelques très belles simulations afin d'illustrer le fonctionnement d'un caisson de grave cardioïde.

Avec 3 caissons de grave cote à cote :



<http://www.techniquesduson.com/images/cardio2bis.jpg>

Puis avec le caisson de grave central en opposition de phase et retardé :



<http://www.techniquesduson.com/images/cardio1bis.jpg>

Avec la même puissance électrique consommée, il apparaît que le gain en directivité se traduit par une diminution du niveau sonore : 103,8 dB(A) -> 101,1 dB(A) à 10m.

C'est donc bien une directivité maîtrisée dans le grave, et non un gain en niveau sonore, qui est recherchée pour un caisson de grave cardioïde.

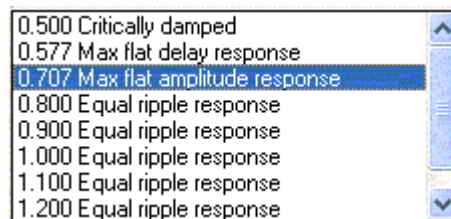
### 3. L'enceinte close

Le moyen radical d'éviter le court-circuit acoustique entre avant et arrière du haut-parleur est de séparer complètement l'onde émise à l'avant de l'onde émise à l'arrière en installant le haut-parleur dans une enceinte close.

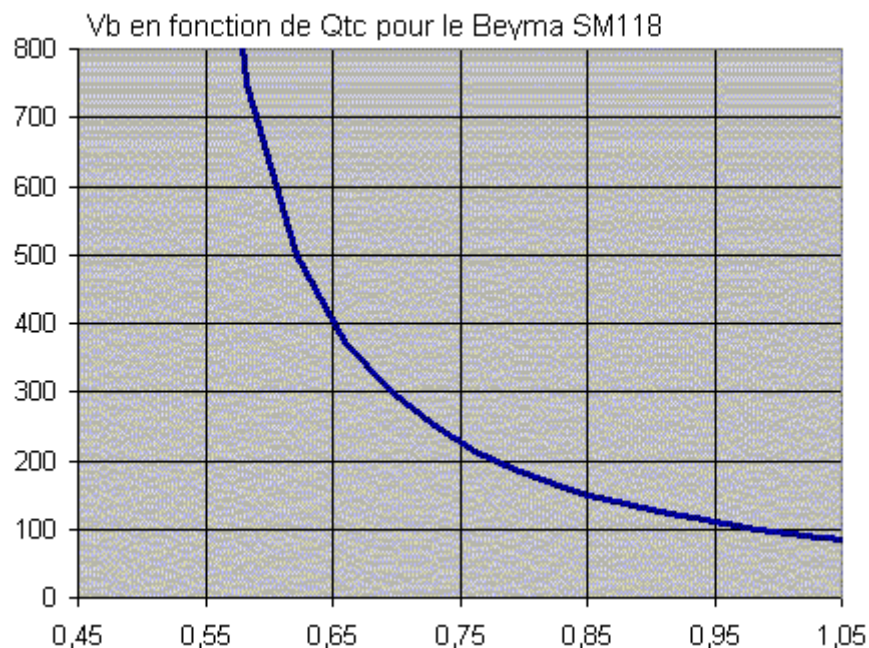
L'air contenu dans le volume de l'enceinte se comporte comme un ressort ayant une raideur/souplesse qui « s'ajoute » à celle de la suspension de la membrane.

L'ensemble haut-parleur + enceinte est caractérisé par son facteur de qualité  $Q_{tc}$ .

Ainsi, WinISD propose différentes courbes de réponse cible :



Chacune de ces courbes de réponse cible imposera un volume d'enceinte :

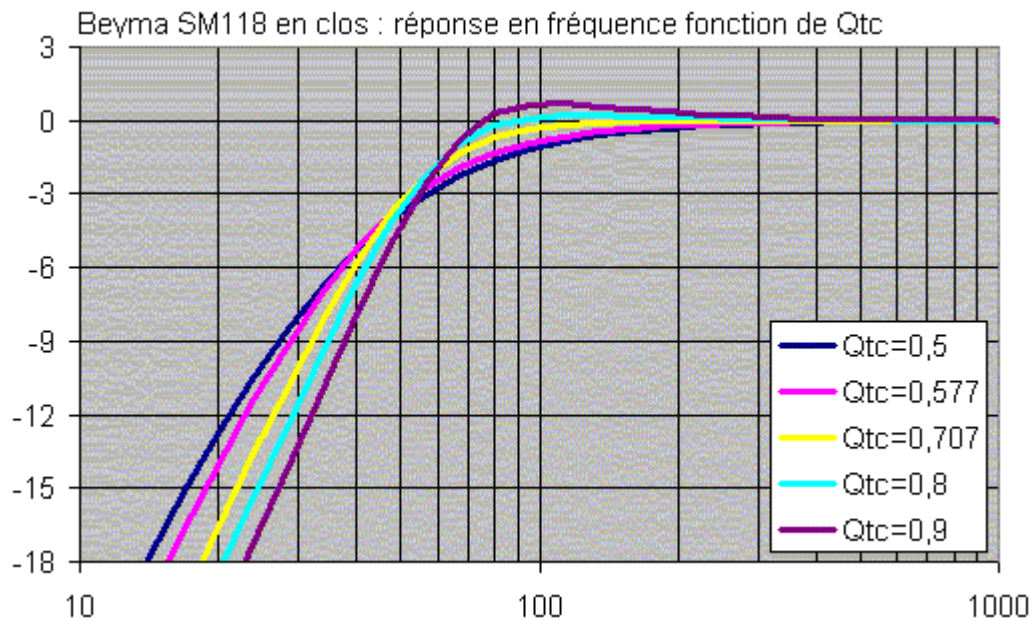


Deux remarques :

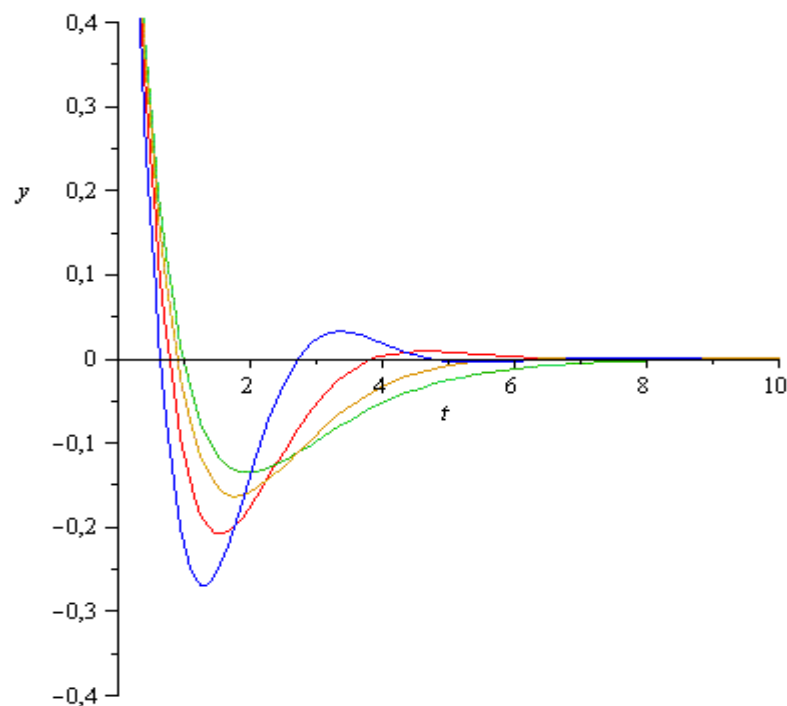
- le  $Q_{tc}$  est supérieur au  $Q_{ts}$ .  
Il est donc illusoire, en absence de correction électronique, de viser un Bessel ayant un  $Q_{tc}$  de 0,577 avec un haut-parleur ayant un  $Q_{ts}$  de 0,6,
- plus le volume  $V_b$  de l'enceinte est grand, plus le  $Q_{tc}$  diminue pour tendre vers le  $Q_{ts}$ .

$$\text{On a } Q_{tc}/Q_{ts} = F_b/F_s = \text{racine}( 1 + V_{as}/V_b )$$

Les courbes de réponses cibles, en fonction de  $F_b$  et  $Q_{tc}$ , se présentent ainsi :



Le choix du volume de l'enceinte close a un effet sur la courbe de réponse en fréquence mais également, en conséquence, sur la réponse impulsionnelle :



On constatera sans surprise qu'un  $Q_{tc}$  faible s'accompagne d'une réponse en fréquence plus régulière et d'une meilleure réponse impulsionnelle (courbe en vert :  $Q_{tc}=0,5$  – courbe en jaune  $Q_{tc}=0,577$  – courbe en rouge  $Q_{tc}=0,707$  – courbe en bleu  $Q_{tc}=0,9$ ).

**Une bonne réponse transitoire est obtenue avec un  $Q_{tc}$  de 0,577 et donc d'un volume d'enceinte relativement important.**

**Mais il est également possible de viser un volume plus faible avec un  $Q_{tc}$  de 0,8, au détriment d'une réponse impulsionnelle un peu moins « idéale ».**

La fréquence de coupure basse du Beyma SM118 en enceinte close est ici de l'ordre de 52 à 54 Hz. On est encore loin de l'objectif d'un caisson de grave...

Pour aller plus loin, la mise en place d'une correction acoustique est nécessaire.

WinISD propose plusieurs types de filtres applicables dans ce contexte :

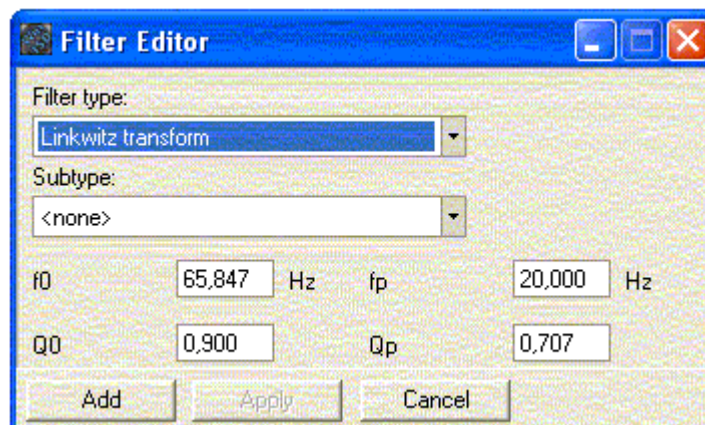
- passe-haut type Butterworth d'ordre 1 à 10,
- passe-haut d'ordre 2, en précisant Q et Fc,
- transformée Linkwitz,
- égaliseur paramétrique

Dans cette panoplie, un filtre intéressant est la transformée de Linkwitz avec deux objectifs :

- réduire le volume de l'enceinte close,
- pouvoir reproduire les plus basses fréquences.

<http://www.linkwitzlab.com/filters.htm#9>

Les paramètres de cette transformée de Linkwitz sont  $f_0$ ,  $Q_0$ ,  $f_p$  et  $Q_p$  :

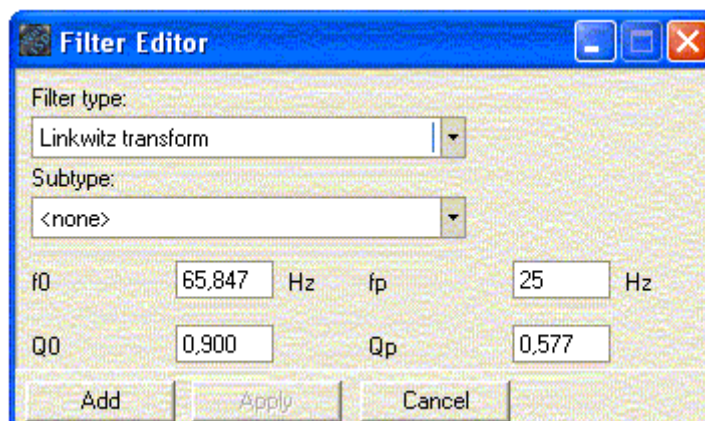


Avec :  $F_0$  et  $Q_0$  = paramètres d'origine de l'enceinte close  
 $F_p$  et  $Q_p$  = paramètres visés après correction

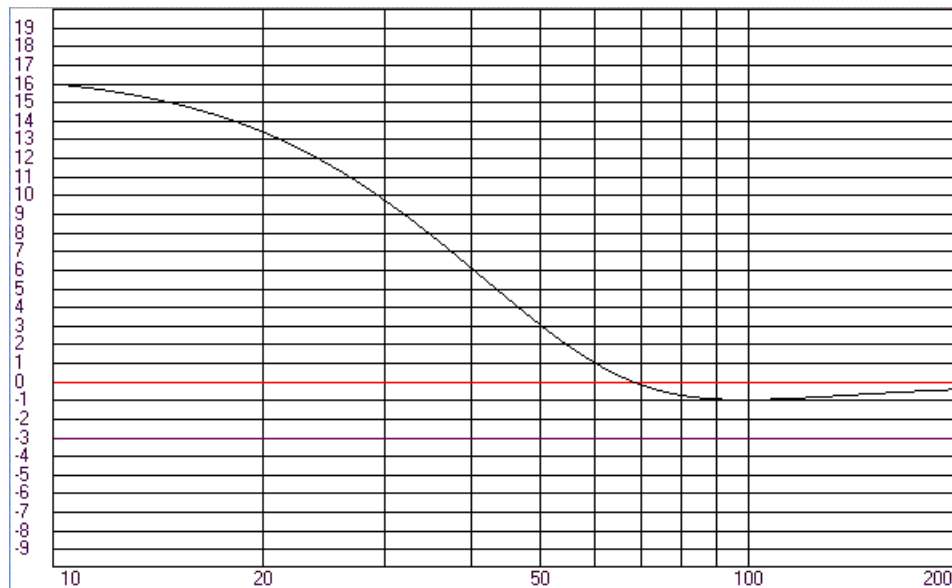
Dans une enceinte close avec un accord de Bessel ( $Q_{tc}=0,577$ ), le Beyma SM118 demande un volume d'environ 800 l donnant une fréquence d'accord de 42,25 Hz et une fréquence de coupure basse F-3dB de 53,8 Hz.

Plaçons ce Beyma dans un volume plus petit, par exemple  $V_b=127,9$  l donnant un  $Q_{tc}$  de 0,9 (=  $Q_0$  du filtre) et une fréquence d'accord  $F_b$  de 65,85 Hz (=  $f_0$  du filtre).

Visons une nouvelle fréquence d'accord de 25 Hz (=  $f_p$  du filtre) et un nouveau coefficient de qualité type Bessel de 0,577 (=  $Q_p$  du filtre) :



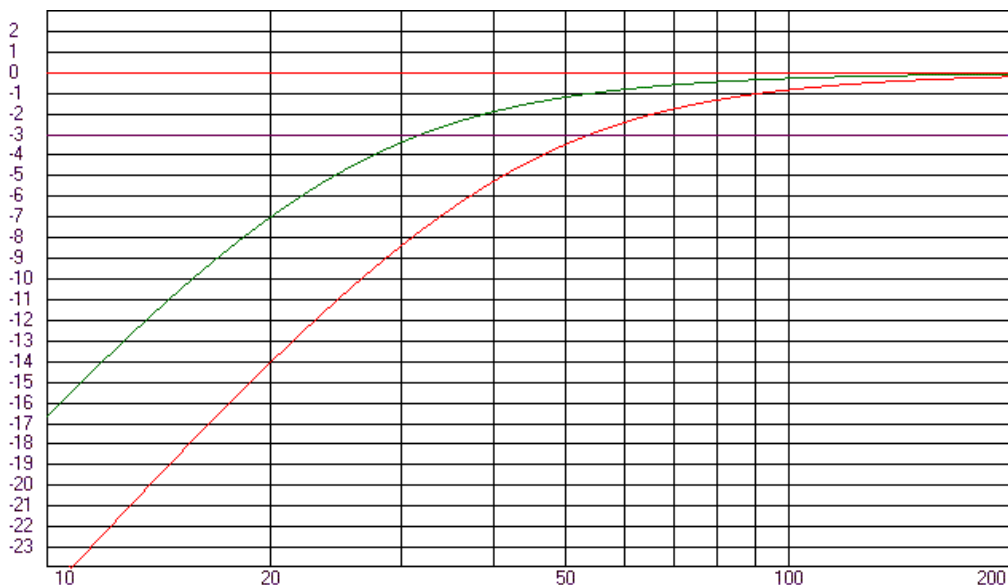
La correction en fréquence apportée par le filtre est la suivante :



Réponse en fréquence de la correction (dB) en fonction de la fréquence (Hz)

Rappelons que +12dB demande une puissance multipliée par 15,8 !  
 Cette correction est donc exigeante vis-à-vis de la tenue en puissance de l'amplificateur et du haut-parleur.

Les réponses en fréquence avec correction (en vert) et sans correction en clos type Bessel (en rouge) sont les suivantes :



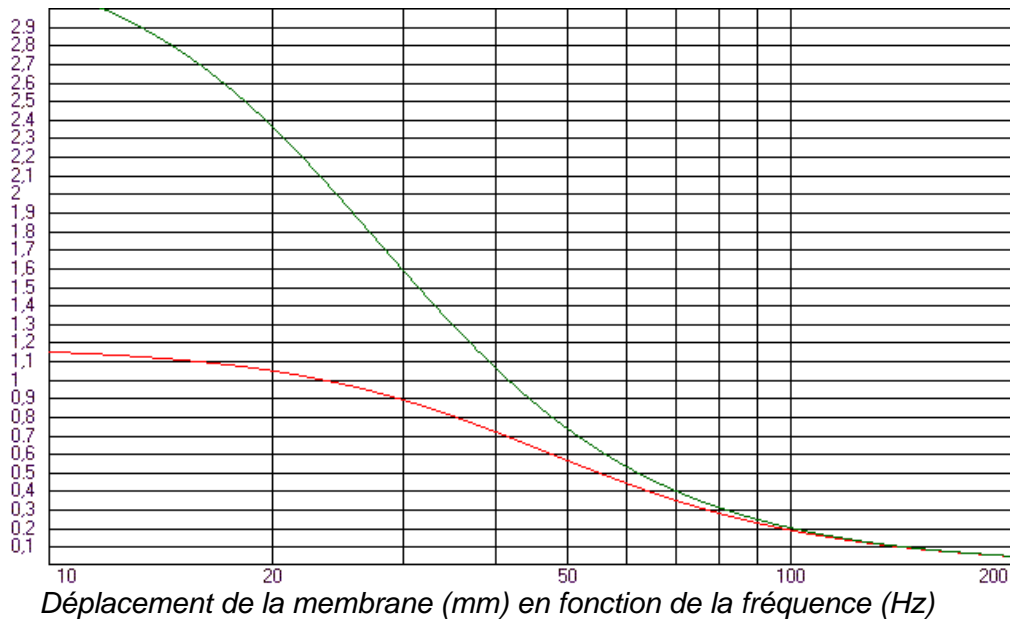
Réponse en fréquence (dB(SPL)) en fonction de la fréquence (Hz) sans et avec correction

Les avantages de la transformée de Linkwitz apparaissent clairement :

- maintien d'une bonne réponse impulsionnelle (accord type Bessel),
- réduction du volume de l'enceinte ( $V_b$  : 796 -> 128 l),
- réponse en fréquence étendue dans les basses fréquences ( $F_{-3dB}$  : 53,8 -> 31,9 Hz).

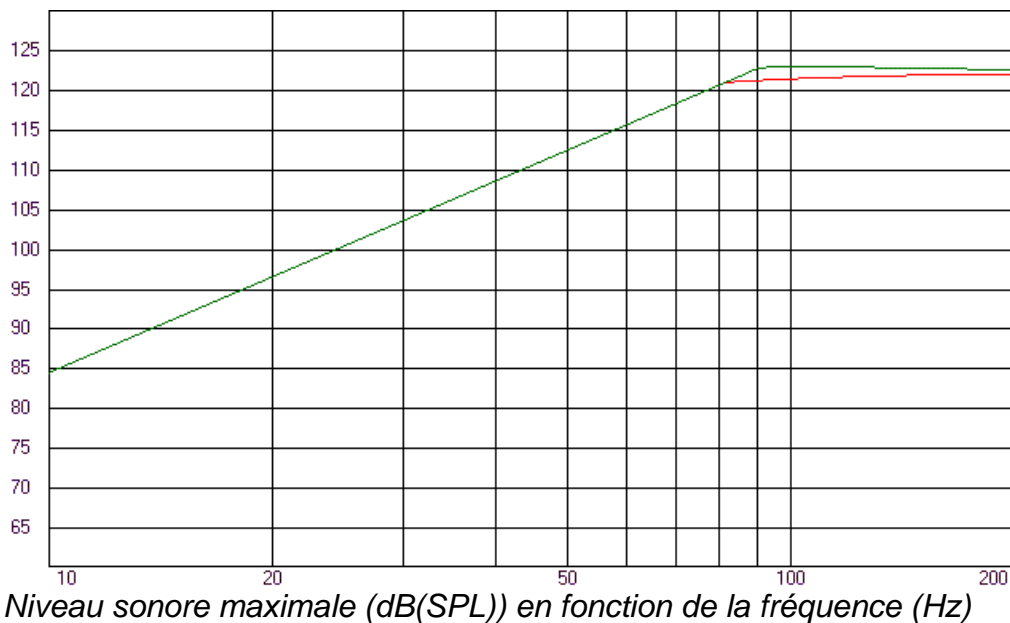
Toutefois, toute médaille a son revers...

La transformée de Linkwitz apporte une correction importante dans les basses fréquences, ce qui se traduit par un déplacement plus important de la membrane :



Sans surprise, on constatera que, pour avoir 6 dB de plus à 25 Hz, le déplacement de la membrane doit être deux fois plus important.

Une courbe intéressante est celle du niveau sonore maximale :



Au dessus d'environ 80 Hz, le niveau sonore est limité par la puissance admissible, en dessous, le niveau sonore est limité par l'excursion maximale de la membrane.

**En conséquence, le niveau sonore maximal est indépendant de la correction acoustique ajoutée.**

Ainsi, le niveau sonore maximal reste de 100 dB(SPL) à 25 Hz (avec ou sans correction).

## 4. L'enceinte bass-reflex

L'enceinte bass-reflex utilise le principe du résonateur de Helmholtz :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance\\_de\\_Helmholtz](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_de_Helmholtz)

Mise à part l'exemple « du son créé lorsque l'on souffle dans le haut d'une bouteille plus ou moins vide », voici une autre bonne illustration du résonateur de Helmholtz :

<http://www.youtube.com/watch?v=kDpta43lmVw>

A l'image d'un haut-parleur, le résonateur de Helmholtz se comporte comme un système masse-ressort.

La fréquence de résonance d'un haut-parleur est définie par la relation

$$2\pi F_s = 1 / \sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}$$

$M_{ms}$  étant la masse mobile

$C_{ms} = V_{as} / (\rho \cdot c^2 \cdot S_d^2)$ , compliance de la suspension, représentant le ressort

On retrouve exactement la même relation pour le résonateur de Helmholtz avec une fréquence de résonance  $F_b$  définie par :

$$2\pi F_b = 1 / \sqrt{M_{me} \cdot C_{mb}}$$

$M_{me} = \rho \cdot L_e \cdot S_e$  étant la masse d'air de l'évent de longueur  $L_e$  et de surface  $S_e$

$C_{mb} = V_b / (\rho \cdot c^2 \cdot S_e^2)$  étant la compliance du volume  $V_b$  de l'enceinte représentant le ressort.

Après simplification, on retrouve la formule classique :

$$2\pi F_b = c \cdot \sqrt{S_e / (V_b \cdot L_e)}$$

On notera que ce modèle de l'enceinte bass-reflex ne fait pas intervenir la propagation des ondes (résonances internes de l'enceinte, résonance de l'évent), il est donc réservé aux basses fréquences.

Il y avait une seule variable dans le cadre de l'enceinte close ( $V_b$ , le volume de l'enceinte dont la compliance  $C_{mb}$  « s'ajoute » à celle du haut parleur  $C_{ms}$ ).

L'enceinte était alors caractérisée par son  $Q_{tc}$ .

Pour une enceinte bass-reflex il y a deux paramètres supplémentaires : la longueur  $L_e$  et la surface  $S_e$  de l'évent.

L'enceinte est alors caractérisée par le type de réponse en fréquence visée.

C'est le processus « d'alignement » qui consiste à viser une fonction de transfert spécifique.

Prenons un haut-parleur dédié au grave comme le Dayton RSS390 :

[http://www.daytonaudio.com/lspeakers/images/lspeakers-rss390hf-4\\_295-468.pdf](http://www.daytonaudio.com/lspeakers/images/lspeakers-rss390hf-4_295-468.pdf)

Les paramètres de ce haut-parleur rentrés dans WinISD sont les suivants :

Thiele/Small parameters			
Qes	0,488	Qms	3,099
Qts	0,422	Fs	17,84 Hz
Vas	276,29 l		

Electro-Mechanical parameters			
Mms	281,5 g	Cms	282,7 um/N
Bl	14,62954 Tm	Dd	32,51 cm
fLe	0,00 Hz	KLe	0,000000 H <sup>2</sup> /grt(Hz)
Rms	10,18196 N/m	Re	3,310 ohm
Le	0,00 nH	Sd	830,0 cm <sup>2</sup>

Large-Signal parameters			
Xmax	14,0 mm peak	Hc	0,0 mm
Xlim	0,0 mm	Pe	500,0 W
Hg	0,0 mm	Vd	1162 cm <sup>3</sup>

Miscellaneous parameters			
no	0,3126 %	Znom	4,000 ohm
Voicecoils	1	USPL	90,94 dB
Connection	Parallel	SPL	87,10 dB

On notera que le Vas est un peu différent de celui du constructeur. La raison est très simple. Tous les constructeurs n'utilise pas les mêmes valeurs de  $\rho_0$  (masse volumique de l'air) et  $c$  (vitesse du son). Ainsi, Beyma pour le SM118 prend  $\rho_0=1,18$  et  $c=345$  tandis que Dayton pour le RSS 390 prend  $\rho_0=1,2$  et  $c=345$ . De son coté, WinISD prend par défaut  $\rho_0=1,20095$  et  $c=343,68$ .

Le ratio Vas/Cms n'est donc pas le même...

**Dans WinISD il faut donc rentrer Fs et Mms et laisser calculer le Vas.**

La documentation de WinISD est claire sur ce sujet : "Please note that Vas may not match exactly what is specified by manufacturer, because exact value of Vas depends on environmental parameters."

D'autres personnes ont également signalés l'importance du choix des paramètres à entrer dans WinISD :

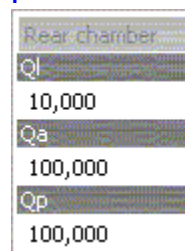
<http://httpwww.avsforum.com/avs-vb/showthread.php?t=1128207&page=2>

WinISD propose plusieurs alignements :



Au trois premiers alignements, nous avons ajouté le « Legendre » et le « Bessel » présentés en annexe 5.

Les accords proposés par WinISD utilisent ces paramètres par défaut pour les coefficients de pertes :



Malheureusement, WinISD ne recalcule pas  $V_b$  et  $F_b$  lorsque ces coefficients de pertes sont modifiés en visant le même type d'alignement.

Sans surprise, on constatera que les alignements classiques de WinISD (QB3, BB4/SBB4, C4/SC4) sont « encadrés » par l'alignement de Bessel (qui privilégie la réponse transitoire au détriment d'une fréquence de coupure  $F_{-3}$  plus élevée) et par l'alignement de Legendre (qui vise la  $F_{-3}$  la plus basse possible sans oscillation dans la réponse en fréquence) :

	$V_b$ (l)	$F_b$ (Hz)	$F_{-3}$ (Hz)
FB - Bessel	256,37	13,95	20,7
WinISD - BB4/SBB4	225,92	17,84	18,4
WinISD - QB3	338,49	16,62	15,6
WinISD - C4/SC4	341,89	16,74	15,6
FB - Legendre	395,25	16,12	14,9

Afin de comparer des choses comparables, les alignements Bessel et Legendre ont été calculés avec les coefficients de pertes par défaut de WinISD ( $Q_l=10$   $Q_a=100$  et  $Q_p=100$ ).

Pour la suite de cette étude nous allons comparer les alignements de Bessel et de Legendre.

La comparaison a été faite en utilisant des coefficients de pertes plus réalistes que ceux pris par défaut par winISD à savoir Ql infini (au lieu de 10), Qa=12 (au lieu de 100) et Qp=11 (au lieu de 100).

Soit, pour l'accord Bessel :

$$Vb=Vas*8,0707*Qts^2,5848=239,8 \text{ pour } Vas=276,29 \text{ et } Qts=0,422$$

$$Fb=Fs*0,3552/Qts^0,9649=14,57 \text{ pour } Fs=17,84 \text{ et } Qts=0,422$$

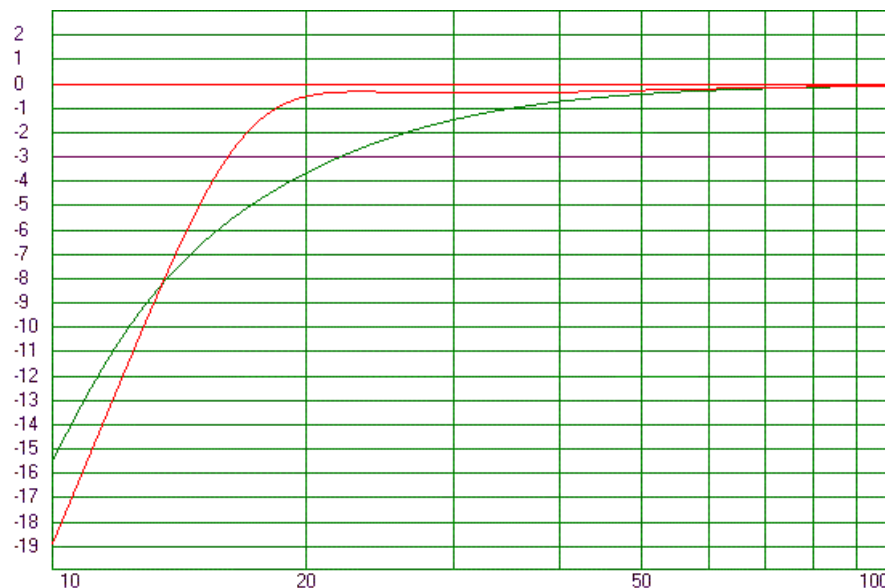
Et pour l'accord Legendre :

$$Vb=Vas*10,728*Qts^2,4186=367,8 \text{ pour } Vas=276,29 \text{ et } Qts=0,422$$

$$Fb=Fs*0,3802/Qts^1,0657=17,01 \text{ pour } Fs=17,84 \text{ et } Qts=0,422$$

#### 4.1 La réponse en fréquence « Tranfer function magnitude »

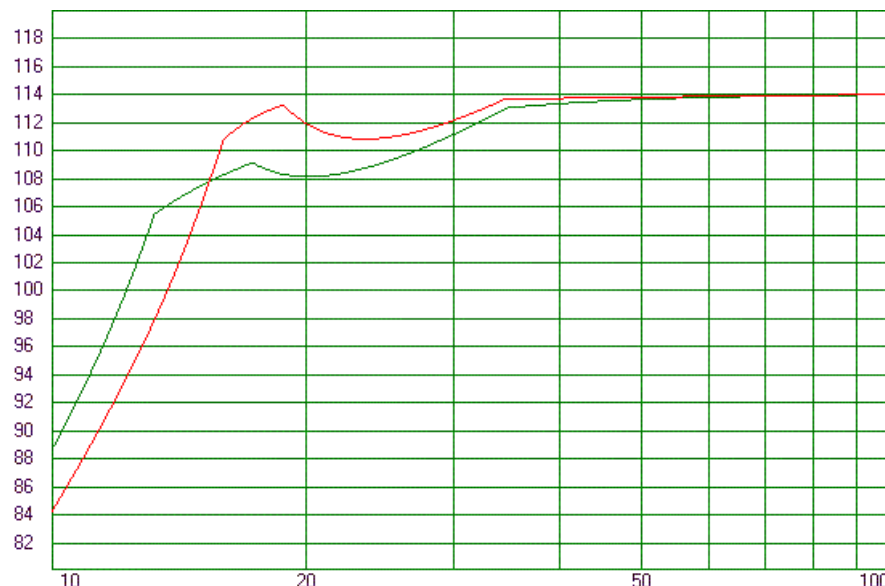
WinISD affiche la réponse en fréquence normalisée (dB) en fonction de la fréquence (Hz). En vert l'alignement de Bessel et en rouge l'alignement de Legendre :



On constatera une réponse en fréquence « adoucie » pour l'alignement de Bessel et un niveau sonore plus élevé au dessus de 14 Hz pour l'alignement de Legendre (+ 3dB à 20 Hz).

#### 4.2 Le niveau sonore maximal « Maximum SPL »

WinISD affiche le niveau sonore maximal en dB(SPL) en fonction de la fréquence (Hz). En vert l'alignement de Bessel et en rouge l'alignement de Legendre :

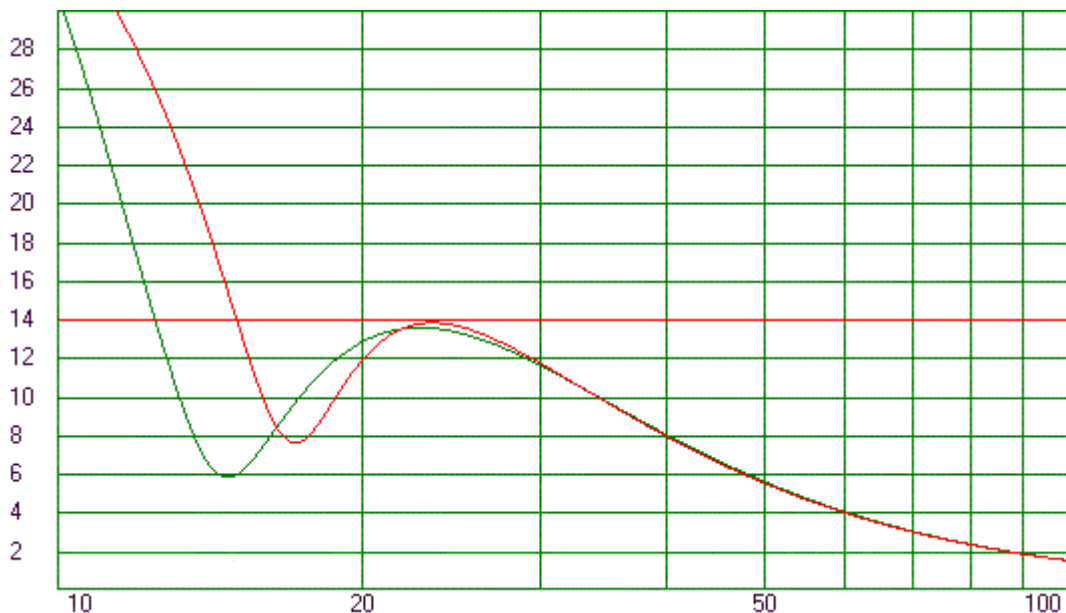


Le Dayton RSS390 acceptant une puissance de 500 W, le niveau sonore maximal est de 114 dB au dessus de 50 Hz. En dessous de cette fréquence, le niveau sonore maximal est limité par l'excursion maximale de la bobine mobile.

Ce niveau sonore maximal ne prend pas en compte la compression thermique qui réduit de plusieurs dB le niveau sonore à la puissance maximale.

### 4.3 L'excursion maximale de la bobine mobile « Cone excursion »

Avec une puissance de 250 W (la moitié de ce qu'accepte le haut-parleur), l'excursion de la bobine mobile (mm) en fonction de la fréquence (Hz) est la suivante :

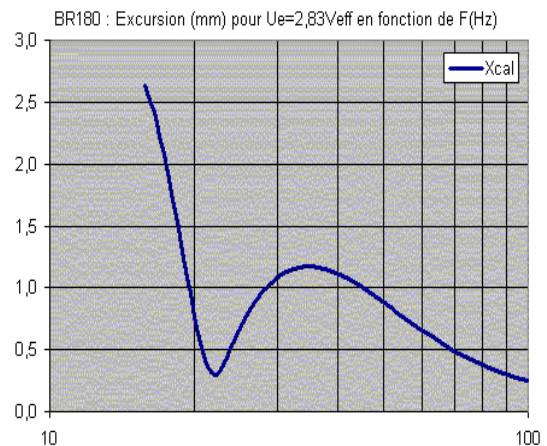
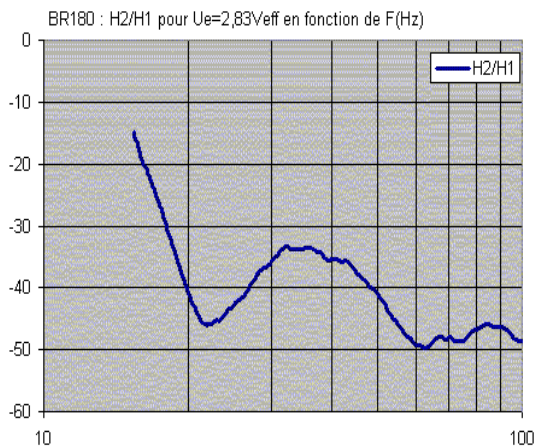


Plusieurs remarques :

- La courbe d'excursion passe par un minima à la fréquence d'accord du bass-reflex. En conséquence, et c'est un avantage du montage bass-reflex, ceci réduit la distorsion générée par le haut-parleur.

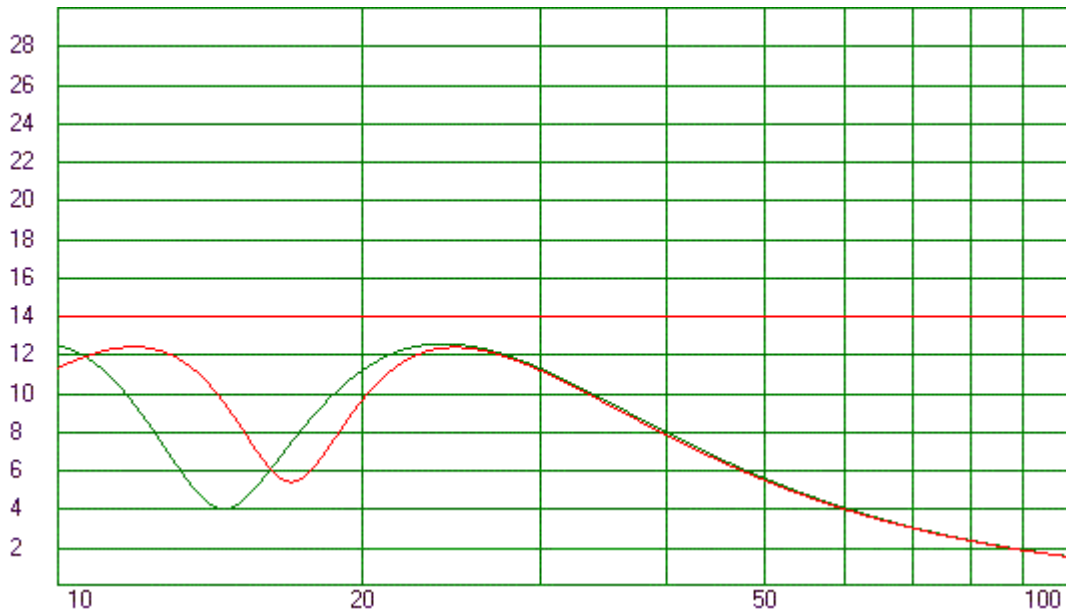
Voir une des mesures présentées par Daniel Roux pour son caisson de grave BR180 :

<http://polinfra.fr/caisson.html>



- En dessous de la fréquence d'accord, l'excursion augmente. Il est donc souhaitable (= il est indispensable pour une application de sonorisation) de rajouter un filtre passe-haut afin de garantir une excursion inférieure au  $X_{max}$  (ici 14 mm).

En ajoutant un filtre passe-haut de Butterworth d'ordre 2 réglé à une fréquence voisine de l'accord bass-reflex (15 Hz pour l'accord Bessel et 17 Hz pour l'accord Legendre), les courbes d'excursion (mm) deviennent en fonction de la fréquence (Hz) deviennent :



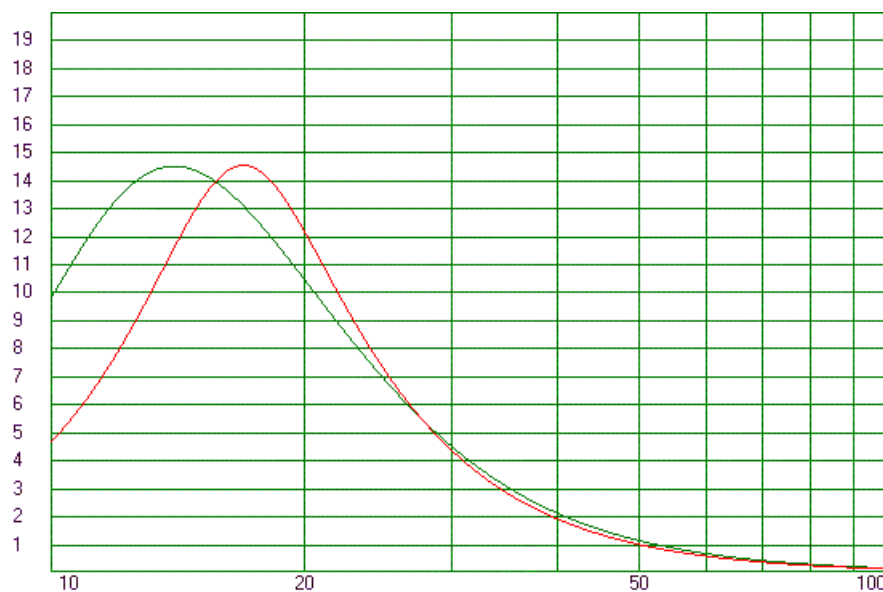
#### 4.4 La vitesse d'air dans l'évent « Rear port – Air velocity »

La vitesse d'air dans l'évent (m/s) a été calculée par WinISD en prenant une puissance de 250W afin de limiter l'excursion de la bobine à une valeur inférieure au Xmax.

Richard H. Small avait proposé comme critère une vitesse maximale de 4,5% de la vitesse du son soit 15 m/s. WinISD propose une vitesse maximale voisine avec 5% de la vitesse du son soit 17 m/s et UniBox prend 7,5% soit 25,9 m/s.

Le diamètre de l'évent doit donc être ajusté pour respecter cette vitesse maximale.

Ici avec un diamètre de 12,5 cm pour l'accord Bessel et de 15,6 cm pour l'accord Legendre on obtient ce graphe de la vitesse de l'air (m/s) en fonction de la fréquence :



Augmenter la surface de l'évent  $S_e$  afin de réduire les turbulences liées à une vitesse excessive demande une longueur d'évent  $L_e$  plus importante puisque la fréquence d'accord dépend de  $S_e/L_e$ .

Une enceinte à priori correcte du point de la surface d'évent est la JBL 4642A équipée de deux 2241 H.

<http://www.jblpro.com/pub/cinema/4642a.pdf>

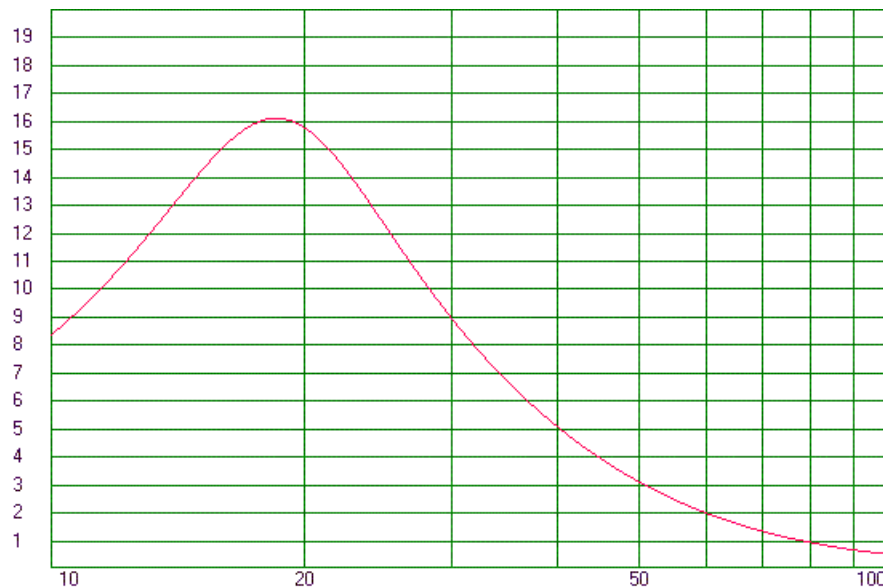
« with a very large port to minimize port compression and to reduce distortion due to turbulent air flow. »

Cette enceinte de volume interne 506 l est accordée à 25 Hz avec un évent de dimension  $18 \times 32,9 = 592,2 \text{ cm}^2$ .

Il était intéressant de savoir comment ce « very large port » se traduit en termes de vitesse d'air...

La puissance utilisée a été limitée à 480 W afin de conserver le pic du déplacement (vers 41 Hz) en dessous du  $X_{\max}$  annoncé de 7,6 mm.

La simulation de WinISD donne une vitesse d'air maximale de 16 m/s à environ 19 Hz :



Vitesse d'air dans l'évent (m/s) en fonction de la fréquence (Hz)

Cette vitesse maximale d'air est donc cohérente par rapport aux critères de Richard H. Small et WinISD.

On notera qu'avec une puissance de 1200 W (ce qu'accepte la paire de 2241H), la vitesse maximale d'air dans l'évent passe à 25,5 m/s. Ce qui reste acceptable compte-tenu du niveau sonore délivré dans ces conditions (131 dB(SPL)@1m@2Pi).

Par analogie avec la notion de rapport signal / bruit, le rapport important est le ratio niveau sonore maximal / niveau de bruit créé par les turbulences de l'air dans l'évent.

Il est ainsi possible d'accepter une vitesse d'air « élevée », par exemple 35 m/s (limite proposée par BassBox 6.0) sous réserve que le niveau sonore visé soit lui aussi élevé, par exemple > 120 dB(SPL) :

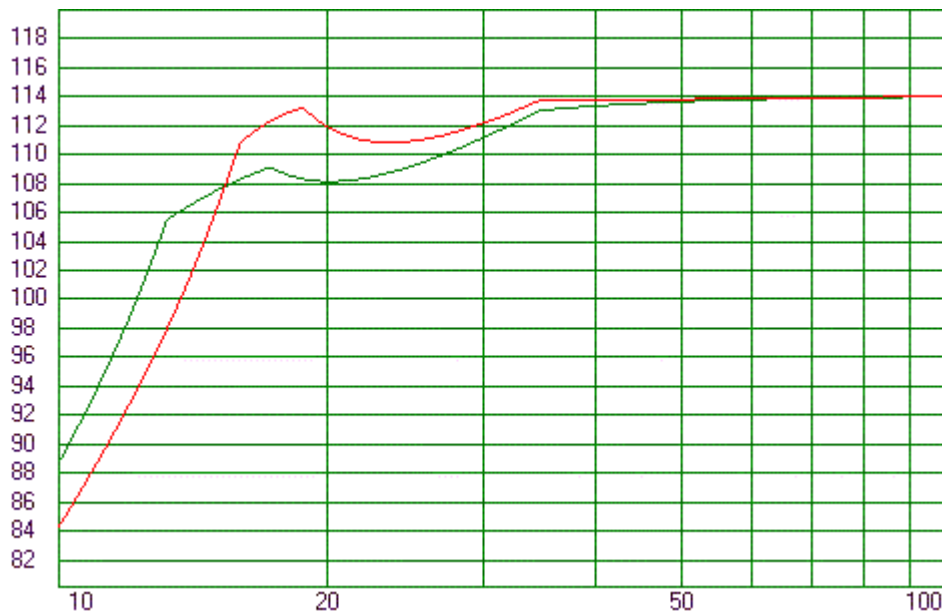
[http://forums.delphiforums.com/HAUTE\\_FIDELITE/messages?msg=31357.1](http://forums.delphiforums.com/HAUTE_FIDELITE/messages?msg=31357.1)

On peut donc considérer que l'évent de cette réalisation commerciale est effectivement correctement dimensionné.

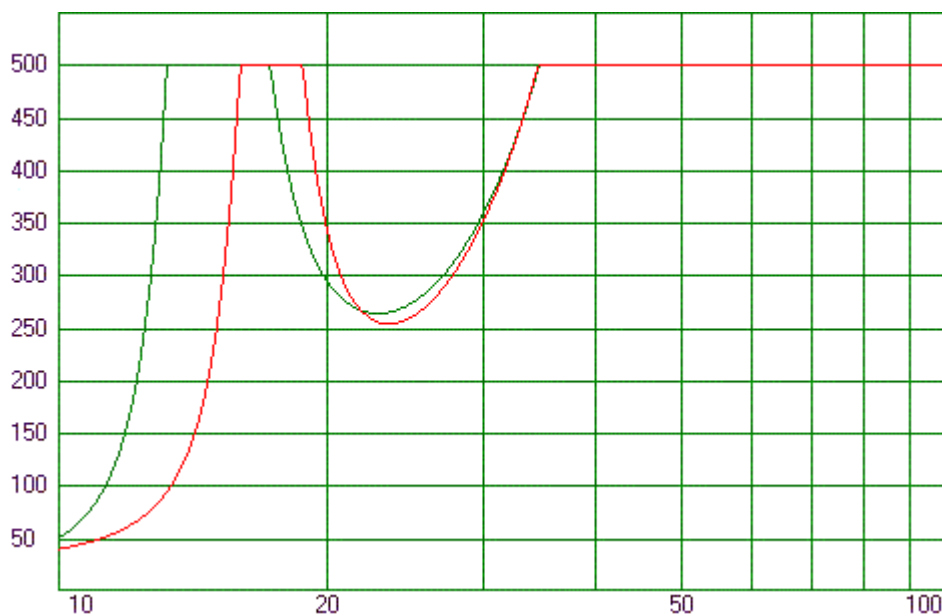
#### 4.5 La puissance maximale admissible « Maximum Power »

Nous avons vu que le niveau sonore en dB(SPL) en fonction de la fréquence (Hz) était limité par deux contraintes :

- la contrainte thermique avec une puissance nominale de 500 W,
- la contrainte mécanique avec un déplacement limité par le  $X_{max}$ .

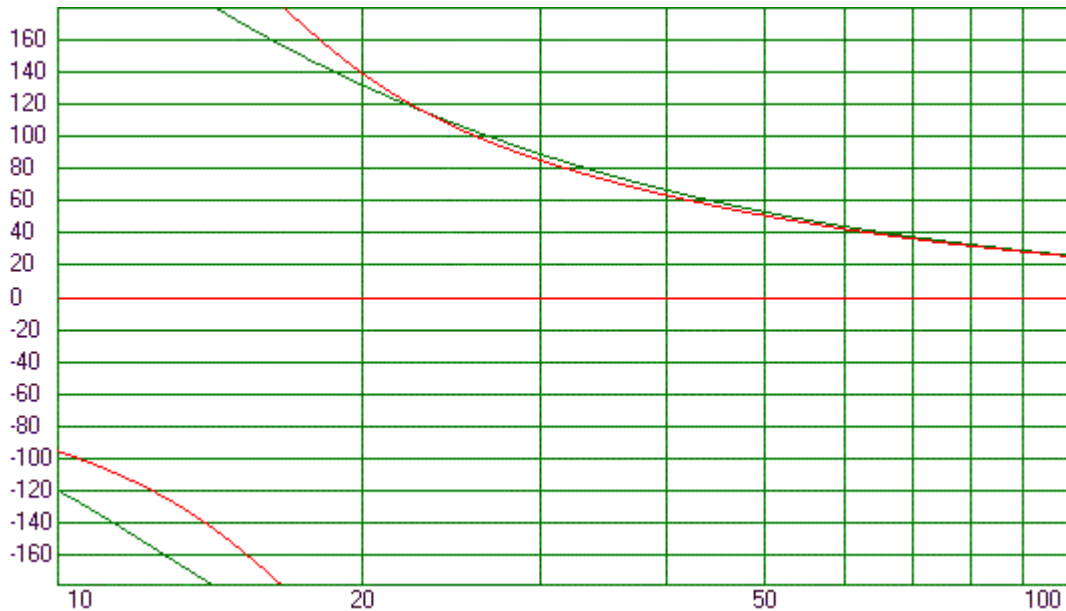


Nous retrouvons exactement les mêmes contraintes dans la courbe « Maximum Power » qui donne la puissance maximale admissible (W) en fonction de la fréquence (Hz):



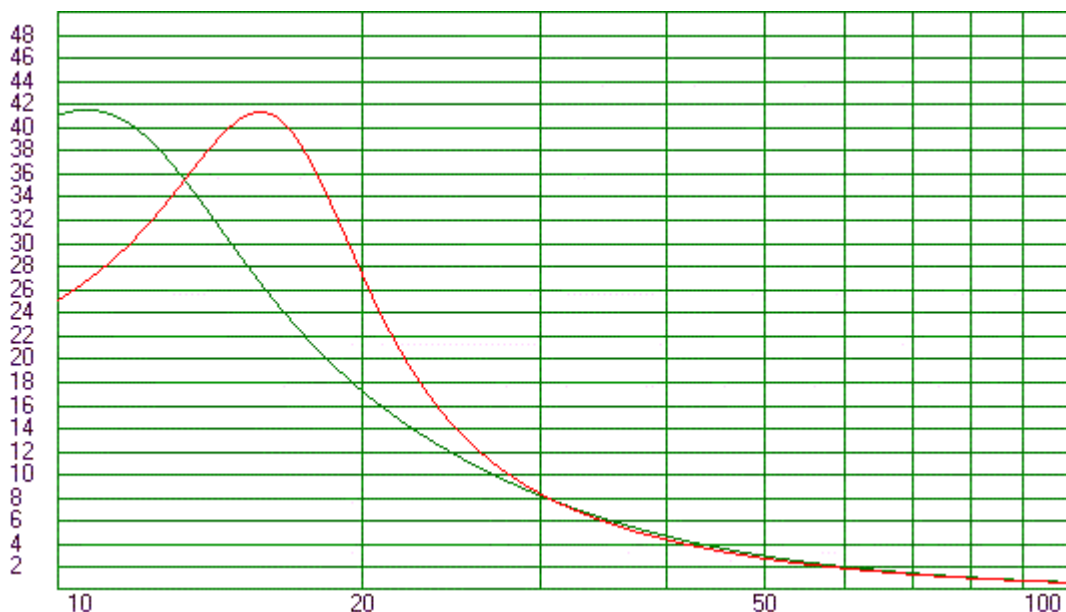
#### 4.6 Les courbes de phase « Transfer function phase » et de retard de groupe « Group delay »

L'évolution de la phase (°) en fonction de la fréquence (Hz) a été calculée pour l'accord Legendre (en rouge) et Bessel (en vert) :



On constatera que, un peu au dessus des fréquences d'accord, l'évolution de la phase avec la fréquence est voisine pour ces deux accords bass-reflex.

Un autre moyen de visualiser l'évolution de la phase est de s'intéresser au retard de groupe qui représente la pente de cette courbe de phase :



Du point de vue mathématique, le retard de groupe est la dérivée de la phase par rapport à la pulsation  $\omega = 2.Pi.Fréquence$ .

Si la phase varie de façon linéaire avec la fréquence, le retard de groupe est alors constant.

Le retard de groupe montre le retard de certaines fréquences par rapport à d'autres.

Habituellement on vise une courbe présentant une évolution régulière sans pic et avec une faible valeur dans la plage utile, c'est-à-dire entre 40 et 100 Hz.  
Ici on obtient moins de 8 ms de retard au dessus de 30 Hz, ce qui est remarquable.

Si la courbe de retard de groupe présente une bosse, elle devra être située en dessous de la plage utile, c'est-à-dire en dessous de 40 Hz.

On voit clairement l'intérêt d'un haut-parleur de grave comme le RSS-390 puisqu'il autorise une fréquence d'accord très basse.

Il est ainsi possible d'avoir un retard de groupe faible et sans bosse gênante.

## 5. Conclusions

### 5.1 Enceinte close ou bass-reflex pour le grave ?

Plusieurs critères peuvent être choisis pour choisir le type de montage.

Nous avons vu que tout haut-parleur, quelque soit son Qts, peut généralement être monté en clos ou en bass-reflex.

On trouve parfois dans la littérature le critère Efficiency-Bandwidth-Product (EBP) =  $F_s/Q_{es}$  pour choisir le type de charge :

EBP	Usage
50 or less	Best in sealed enclosure
50 - 90	Good all-rounder
over 90	Best in ported enclosure

<http://www.subwoofer-builder.com/driver-conversions.htm>

<http://diyaudiocorner.tripod.com/formula.htm>

Même conseil par WinISD :

<http://www.pure-hifi.info/informatique-et-hifi/204-charge-et-winisd-ebp>

De mon point de vue cette recommandation est une légende urbaine qui résulte d'une mauvaise interprétation du preprint 1251 de R.H. Small présenté en mai 1977 sous le titre "Suitability of low-frequency drivers for horn-loaded loudspeaker systems".

<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10256>

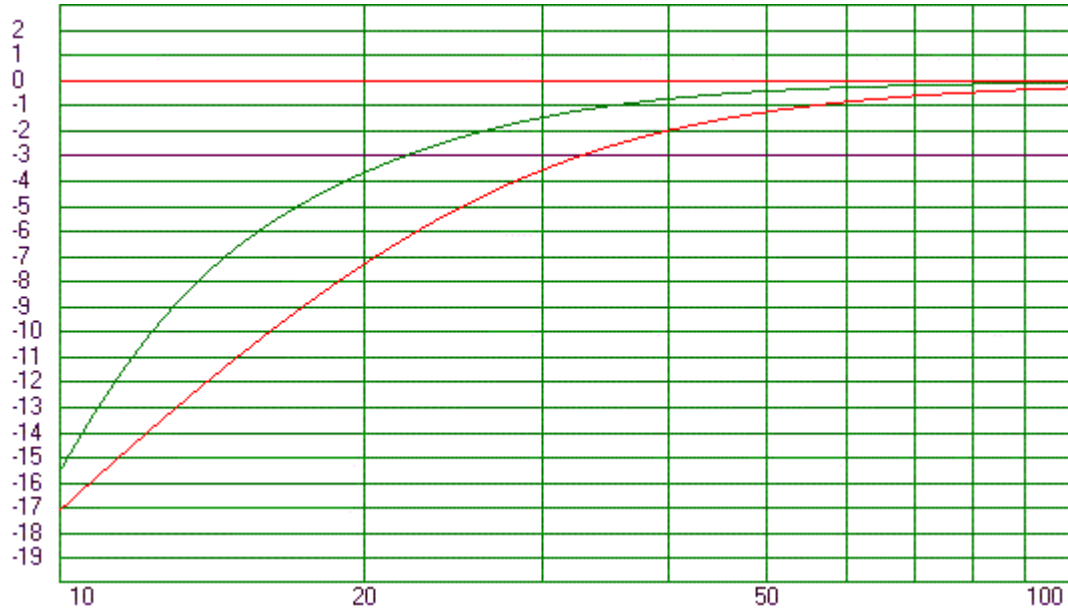
L'auteur montre que, pour un haut-parleur chargé par un pavillon, le produit rendement x fréquence de coupure haute dépend du rapport EBP. La conclusion de R.H. Small est qu'il faut un EBP faible pour descendre dans les basses fréquences avec un HP monté en rayonnement direct (clos ou bass-reflex) et qu'il est souhaitable d'avoir un EBP élevé pour un HP monté en pavillon.

Si on veut  $F_{-3dB} = 40$  Hz, il faut donc prendre pour un montage clos un HP avec un EBP de 50 et pour un montage bass-reflex un HP avec un EBP de 100. Autrement dit, un montage bass-reflex permet de diminuer la  $F_{-3dB}$  par rapport à un montage clos.

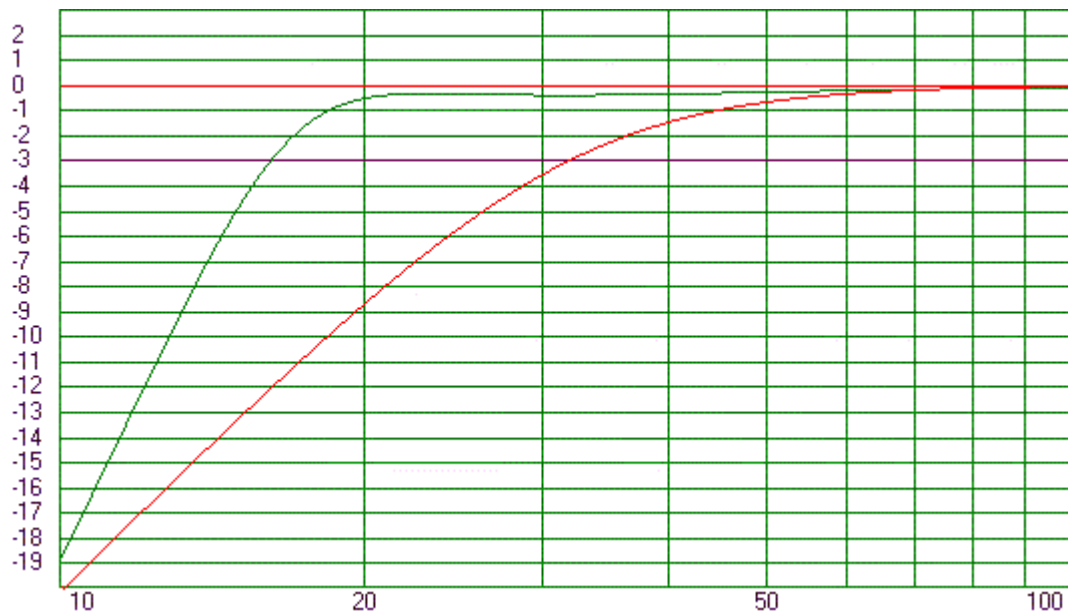
En clair, l'EBP est un bon indicateur de la capacité d'un haut-parleur à descendre dans le grave mais n'est en aucun cas un indicateur pour choisir entre une charge close ou une charge bass-reflex.

Les principaux critères de choix restent donc :

- **La réponse en fréquence.** La comparaison de la réponse en fréquence (dB) du Dayton RSS390 en fonction de la fréquence (Hz) en visant l'accord Bessel (qui privilégie la réponse transitoires) dans le montage clos (en rouge) et le montage bass-reflex (en vert) donne ceci :



En visant un accord Legendre (qui privilégie l'extension dans les basses fréquences), on obtient ceci :



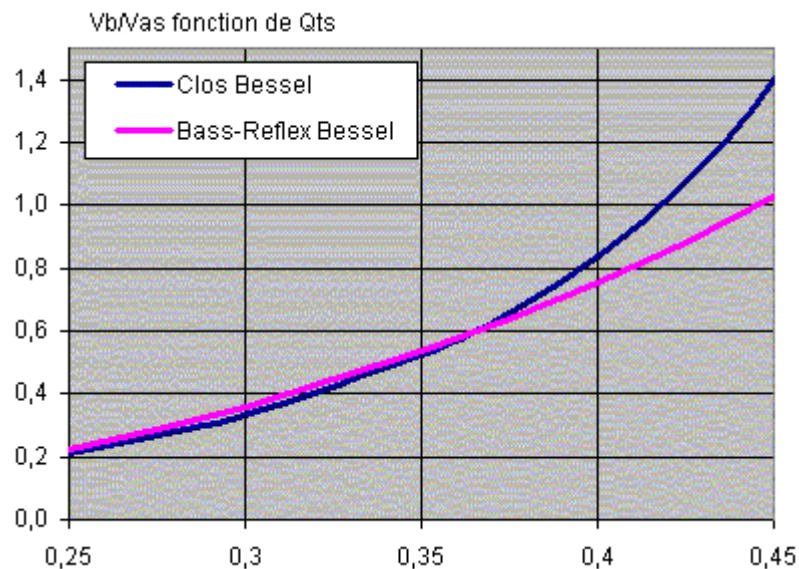
**Dans les deux cas, on constatera l'intérêt du montage bass-reflex pour étendre la courbe de réponse vers les basses fréquences**

- Afin de minimiser les distorsions, il est souhaitable de **limiter l'excursion** de la bobine mobile. La comparaison de l'excursion du Dayton RSS390 (mm) pour une puissance de 250 W en fonction de la fréquence (Hz) dans les deux montages donne ceci :



Cette comparaison entre le clos Bessel (en rouge) et le bass-reflex Bessel (en vert) montre l'intérêt du montage bass-reflex avec une excursion plus faible dans la zone 12 – 30 Hz et

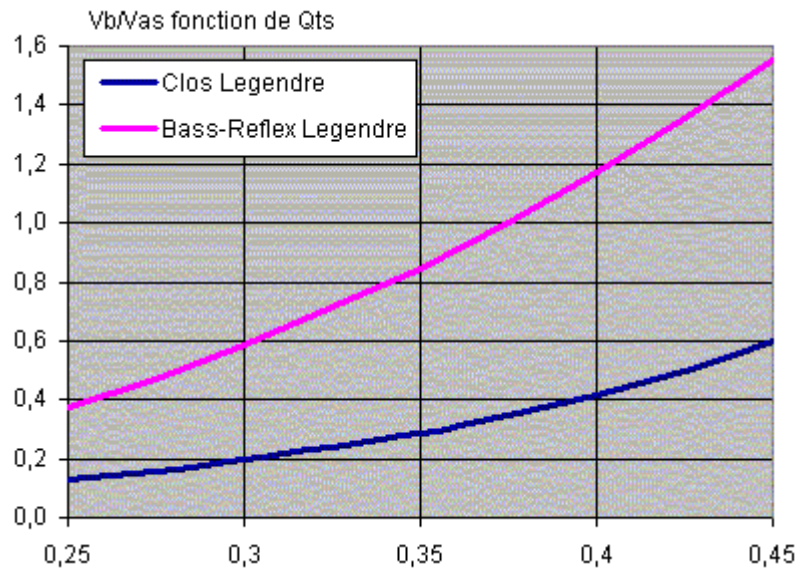
- Le **volume de l'enceinte** peut également être un critère de choix. La comparaison entre le clos Bessel et le bass-reflex Bessel donne ceci :



Avec un  $Q_{ts} < 0,37$  les montages clos et bass-reflex demande à peu près le même volume d'enceinte pour un accord Bessel.

Avec un  $Q_{ts} > 0,37$  le montage clos demandera un volume plus important.

La comparaison entre le clos Legendre et le bass-reflex Legendre donne ceci :



Pour cet accord, le volume en bass-reflex est environ 2 à 3 fois plus élevé que celui en clos.

C'est le prix à payer pour gagner un octave dans les basses fréquences !

Pour une enceinte close avec pertes, la fonction de transfert est celle d'un passe-haut d'ordre 3.

Si on ne prend pas en compte les pertes par fuite ( $Ql$  infini), la fonction de transfert d'une enceinte close est celle d'un passe-haut d'ordre 2 :

$$FT = p^2 / (1 + 1/Qtc * p + p^2)$$

Selon Unibox :

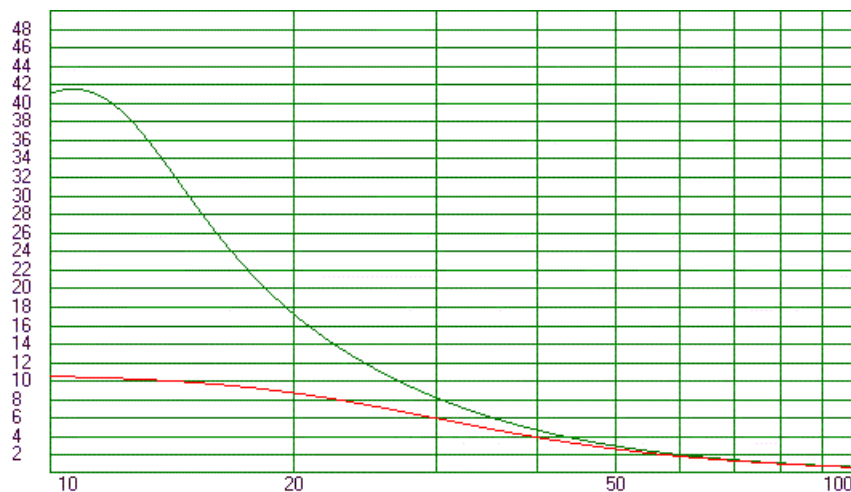
$$Qtc = 1 / (1/Qts / \text{RACINE}(1+\alpha) + \alpha/Qa / (1+\alpha)) \text{ avec } \alpha = Vas/Vb$$

Selon WinISD ou BassBox :

$$Qtc = 1 / (1/Qts / \text{RACINE}(1 + \alpha) + 1/Qa)$$

Nous avons supposé ici que la formule juste est celle d'Unibox.

- Enfin la courbe de **retard de groupe** peut également être un critère de choix. La comparaison entre le clos Bessel et le bass-reflex Bessel donne ceci :



Même si la différence est minime au dessus de 40 Hz, le retard de groupe de l'enceinte close est plus faible que celui de l'enceinte bass-reflex. Ce constat n'est pas une surprise. En effet, plus la pente de la réponse en fréquence est élevée, plus la phase varie et plus le retard de groupe est important.

## 5.2 Quel haut-parleur de grave ?

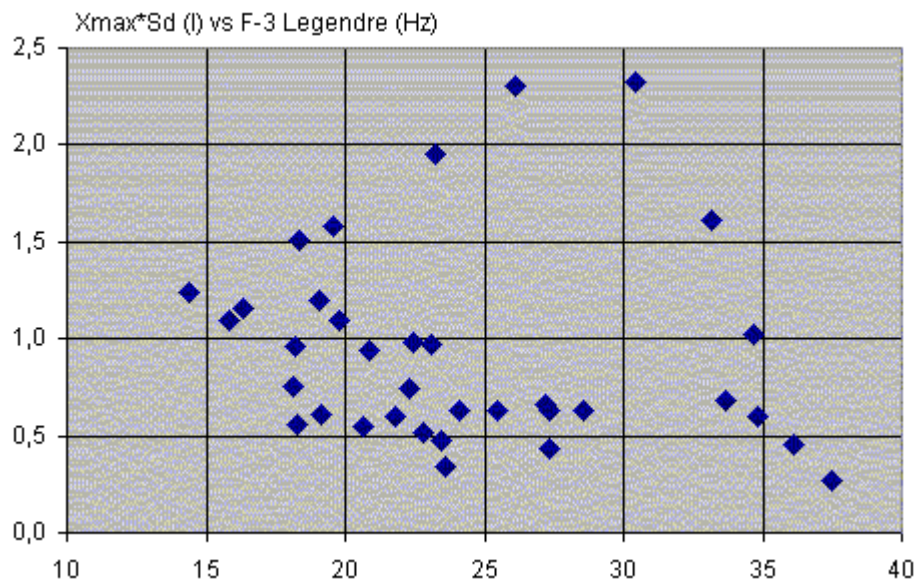
Deux critères peuvent aider à choisir un HP de grave :

- le produit  $Sd \cdot X_{max}$  qui doit être maximal (pour avoir un niveau sonore élevé dans les basses fréquences où celui-ci est limité par le  $X_{max}$ ),
- le ratio  $F_3/Q_{ts}$  qui doit être minimal (pour avoir une F-3 la plus faible possible)

Voici les caractéristiques de quelques HP de grave :

[http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/HP\\_subs.xls](http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/HP_subs.xls)

En plaçant ces haut-parleurs dans un graphe  $Sd \cdot X_{max}$  en fonction  $f_r$  F-3 bass-reflex Legendre, on obtient ceci :



Avec les critères  $Sd \cdot X_{max} > 1,1$  l et F-3 en bass-reflex Legendre  $< 30$  Hz et  $Q_{ts} < 0,65$  Il reste 6 haut-parleurs situés en haut à gauche sur ce graphe.

Par ordre de F-3 croissante :

- le Dayton RSS390 (F-3 = 16,3 Hz  $Sd \cdot X_{max} = 1,2$  l)
- le Dayton TIT400C (F-3 = 18,4 Hz  $Sd \cdot X_{max} = 1,5$  l)
- le JBL GTO1514 (F-3 = 19,1 Hz  $Sd \cdot X_{max} = 1,2$  l)
- le JBL W15GTI MKII (F-3 = 19,6 Hz  $Sd \cdot X_{max} = 1,6$  l)
- le McCauley 6174 (F-3 = 23,2 Hz  $Sd \cdot X_{max} = 1,9$  l)
- le BMS 18N860 (F-3 = 26,2 Hz  $Sd \cdot X_{max} = 2,3$  l)

Ces deux critères ( $Sd \cdot X_{max}$  maximal et F-3 minimal) peuvent être rassemblés en un seul critère : le niveau sonore maximal dans les basses fréquences, par exemple à 30 Hz. La comparaison des ces haut-parleurs (avec  $Q_l$  infini  $Q_a = 12$  et  $Q_p = 11$ ) donne :

- le Dayton RSS390 N = 112,3 dB
- le Dayton TIT400C N = 115,9 dB
- le JBL GTO1514 N = 113,0 dB
- le JBL W15GTI MKII N = 116,8 dB
- le McCauley 6174 N = 118,4 dB
- le BMS 18N860 N = 123,6 dB

En résumé, en dehors des RE Audio XXX 15 et 18, exceptionnel sur le papier avec un  $X_{max}$  de 54mm ! <http://www.reaudio.com/woofers.php>

On peut retenir les JBL W15GTI MKII, McCauley 6174 et l'excellent BMS 18N860.

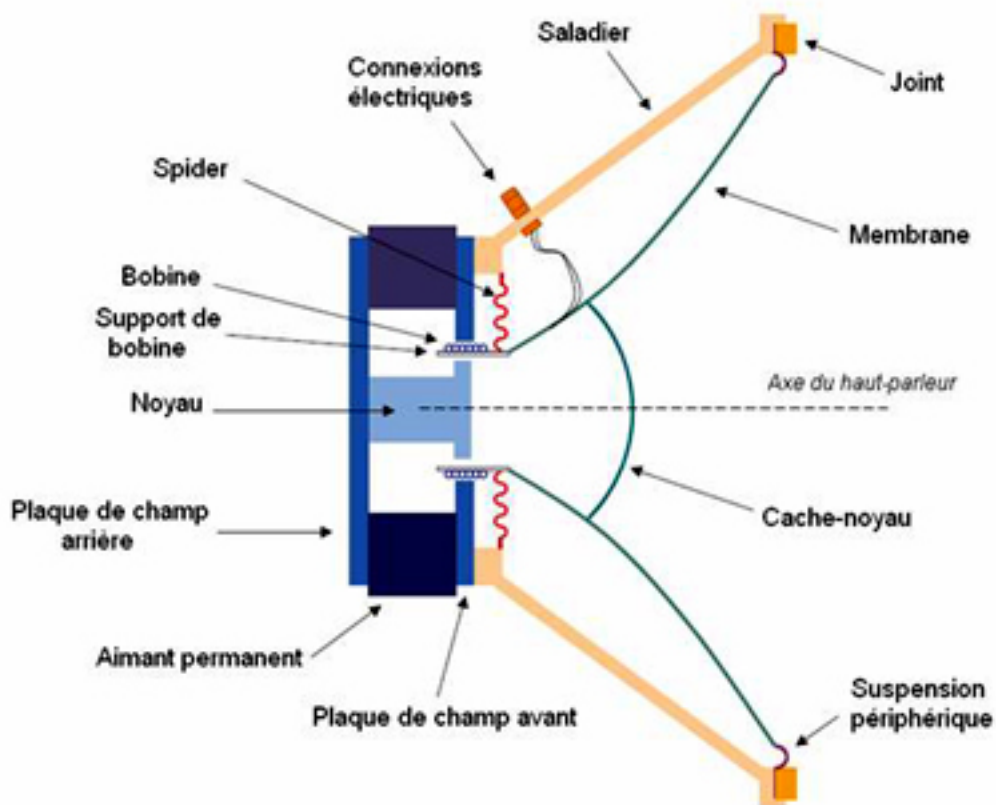
## Annexe 1 : Coupe schématique d'un haut-parleur

La figure ci-dessous représente une coupe schématique d'un haut-parleur électrodynamique typique, constitué d'une partie fixe et d'une partie mobile.

- La partie fixe regroupe l'aimant permanent constitué la plupart du temps en ferrite mais de plus en plus fréquemment d'un alliage au Néodyme, les pièces dites polaires (noyau, plaques de champ avant et arrière) en acier doux, perméables au champ magnétique, et le saladier (ou châssis).
- La partie mobile comprend la bobine, son support cylindrique (en kapton, fibre de verre, voire aluminium), la membrane et le cache-noyau qui empêche la pénétration de poussières magnétiques.

L'ensemble de l'équipage mobile est maintenu et guidé par la suspension périphérique et la suspension de centrage (spider), toutes deux fixées (collées) sur le saladier.

Le rôle des suspensions est d'exercer une force de rappel contraire au mouvement de la membrane et de maintenir dans le même temps la bobine parfaitement centrée entre la plaque de champ avant et le noyau.



<http://www.sonomag.com/Archives/Article,Go.comprendre,le-haut-parleur-a-membrane-conique,Id,1978.html>

## Annexe 2 : Rendement et sensibilité

La sensibilité, nombre sans dimension exprimé en dB(SPL), est le rapport en la pression sonore et le seuil minimal d'audition à 1 kHz qui est de  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa :

$$dB_{SPL} = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

<http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9cibel>

Le rendement, exprimé en %, est le rapport entre l'énergie acoustique fournie et l'énergie électrique absorbée.

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs :

- **la distance** entre la mesure de la pression acoustique et le haut-parleur, généralement il est pris 1 m,
- **l'angle de rayonnement**  
Richard H. Small prend un angle de rayonnement de  $2\pi$  (demi-espace qui suppose un haut-parleur monté sur un baffle infini) dans cette publication : <http://diyaudio.com/Technical/Papers/Direct-Radiator-Loudspeaker-System-Analysis.pdf>  
A. N. Thiele prend un angle de rayonnement de  $4\pi$  (espace complet) : <http://diyaudio.com/Technical/Papers/Loudspeakers-in-Vented-Boxes-Part-II.pdf>  
En conséquence, l'expression du rendement de Richard H. Small donne une valeur deux fois plus importante que celle de A. N. Thiele.  
De mon point de vue, dans le cadre domestique, un rayonnement sur  $\pi$  (quart d'espace) est plus réaliste.
- **la fréquence**, le rendement est généralement mesuré dans la bande passante utile du haut-parleur,
- **l'énergie apportée** au haut-parleur.  
Exprimer une sensibilité en dB(SPL)@1W@1m est un grand classique dans les documents des constructeurs, malheureusement ceci n'a pas de sens.  
En effet, l'impédance d'un haut-parleur est très variable.  
C'est donc la tension aux bornes du haut-parleur qui est importante, généralement il est pris 2,83 Veff (soit la tension dissipant 1 W dans une résistance de 8 ohm).

Ceci posé, on trouve dans la littérature plusieurs expressions du rendement  $\eta_0$  d'un haut-parleur.

Une première expression fait appel aux paramètres du haut-parleur :

$$\eta_0 = \left( \frac{\rho \cdot Bl^2 \cdot S_d^2}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot M_{ms}^2 \cdot R_e} \right) \times 100 \%$$

On soulignera que cette formule fait intervenir deux paramètres physiques :

- sa motorisation, caractérisée par le ratio  $Bl^2/R_e$ ,
- son inertie mécanique, caractérisée par la masse surfacique  $M_{ms}/S_d$ .

Une deuxième expression, strictement équivalente à la précédente, fait appel aux paramètres de Thiele-Small :

$$\eta_0 = \left( \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot F_s^3 \cdot V_{as}}{c^3 \cdot Q_{es}} \right) \times 100 \%$$

<http://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small>

Ces deux définitions suivent la définition de Richard H. Small avec un rayonnement sur  $2 \cdot \pi$ .

Pour un rendement sonore de 100%, la sensibilité est de 112,1 dB(SPL).

En prenant en compte le rendement  $\eta_0$  défini ci-dessus, la sensibilité devient :  
sensibilité (dB(SPL)@2,83Veff@1m@2Pi) = 112,1 + 10\*log10( $\eta_0$ ) + 10\*log10(8/Re)

La deuxième expression pourrait faire penser que le rendement dépend de la souplesse de la suspension (représentée par le volume équivalent  $V_{as}$ ).

En réalité, il n'en est rien puisque l'on peut écrire également :

$$\eta_0 = 4 \cdot \pi^2 / c^3 \cdot (F_s / Q_{es})^3 \cdot V_{as} \cdot Q_{es}^2$$

Or les deux paramètres  $F_s / Q_{es}$  et  $V_{as} \cdot Q_{es}^2$  sont indépendants de  $C_{ms}$  ou  $V_{as}$  :

$$F_s / Q_{es} = 1 / (2 \cdot \pi) \cdot (BL^2 / Re) \cdot 1 / M_{ms}$$

$$V_{as} \cdot Q_{es}^2 = \rho \cdot c^2 \cdot (Re / BL^2)^2 \cdot M_{ms} \cdot S_d^2$$

Cette formulation amène deux remarques importantes :

- $F_s / Q_{es}$ , voisin de  $F_s / Q_{ts}$ , est directement corrélé à la fréquence coupure basse (F-3dB = 0,42 \*  $F_s / Q_{ts}$  pour un accord standard)
- $V_{as} \cdot Q_{es}^2$ , voisin de  $V_{as} \cdot Q_{ts}^2$ , est directement relié au volume d'une enceinte bass-reflex ( $V_b = 5,7 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^2$  pour un accord standard)

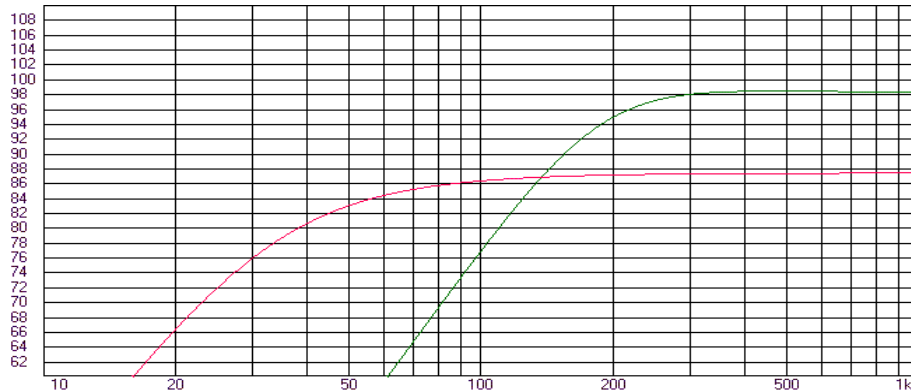
**Les trois paramètres rendement / fréquence de coupure basse  $F_c$  / volume d'enceinte  $V_b$  sont donc interdépendants suivant la relation :**

$$\text{Rendement} = \text{constante} \cdot F_c^3 \cdot V_b$$

## Une illustration sur l'interdépendance sensibilité / coupure basse.

Nous avons vu que l'Audax PR170Z0 a une sensibilité élevée (98dB(SPL)@2,83 Veff@1m) mais est inutilisable en dessous de 600Hz.

En restant parmi les 17 cm d'Audax, on peut trouver des haut-parleurs utilisables à plus basse fréquence. Par exemple le MHD17B37t2cp12 (en rose), dont la réponse en fréquence comparée avec celle du PR170Z0 (en vert) donne ceci :

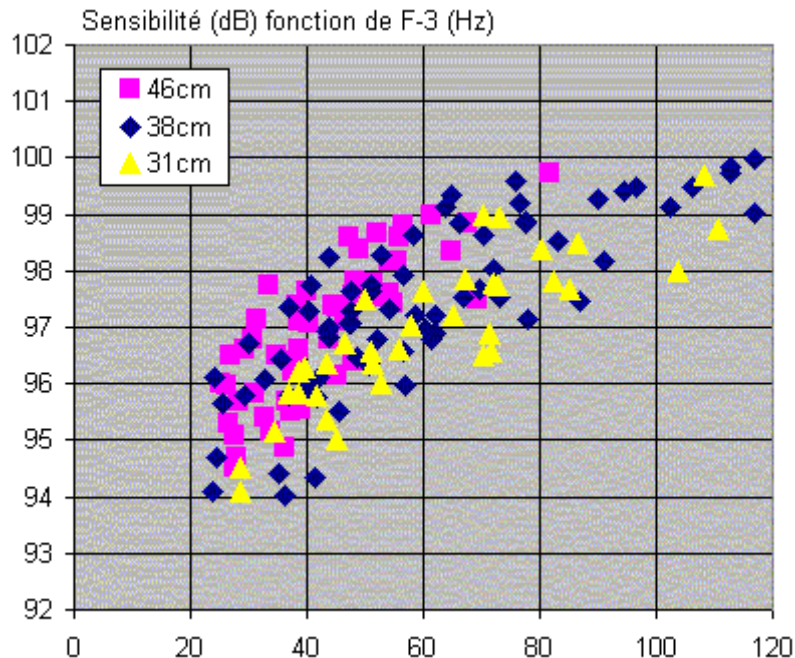


Sensibilité (dB(SPL) @2,83Veff@1m) en fonction de la fréquence

La sensibilité du MHD17B37 est plus basse avec 87 dB(SPL), par contre, la bande passante dans le grave (F-3dB) passe de 205 à 60 Hz !

Ce constat peut être généralisé.

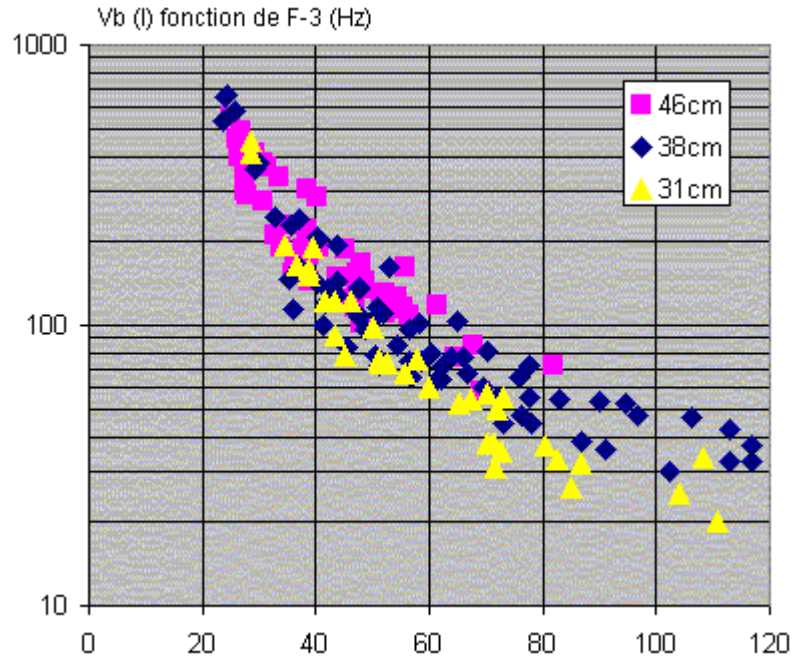
Ainsi, voici le graphe sensibilité en fonction de la coupure basse pour des dizaines de haut-parleurs de sonorisation :



**Il faut donc choisir entre sensibilité élevée et extension dans les basses fréquences...**

**Une illustration sur l'interdépendance des paramètres volume d'enceinte / coupure basse.**

De même, voici le graphe volume d'enceinte bass-reflex en fonction de la coupure basse pour des dizaines de haut-parleurs de sonorisation :



**Il faut donc choisir entre faible volume d'enceinte et extension dans les basses fréquences...**

## Annexe 3 : Vérification de la cohérence des paramètres TS

Afin de vérifier la cohérence des paramètres TS donnés par Beyma pour le SM118, une feuille de calcul a été utilisée.

La méthode de validation utilisée est basée sur une approche de type réconciliation de données :

[http://www.mesures.com/archives/030\\_034\\_Sol.pdf](http://www.mesures.com/archives/030_034_Sol.pdf)

Elle consiste à rechercher des paramètres qui sont à la fois cohérents et le plus proche possible des paramètres d'entrée avec l'aide de l'outil Solveur d'Excel.

Elle part du principe que **toutes** les valeurs données par le constructeurs sont arrondies, voire même, éventuellement fausses.

Le résultat obtenu avec le Beyma SM118 est le suivant :

Beyma SM118			
<a href="http://profesional.beyma.com/pdf/SM-118%20NE.pdf">http://profesional.beyma.com/pdf/SM-118%20NE.pdf</a>			
Données d'entrée			
Calcul			
	Données constructeur	Valeurs retenues	
Pn (Waes)	400		
Sensibilité (2,83Veff@1m@2Pi)	97	97,04	=112,1+10*LOG10(Rdt)+10*LOG10(B/Re)
BL ( TM )	18,3	18,29	=RACINE(Fs/Qes*2*PI()*Re*Mms)
Mms (kg)	0,123	0,1228	=1/2/PI()/RACINE(Mms*Cms)
Fs	36	35,82	
Re	6,4	6,40	
Qms	6,83	6,786	
Qes	0,53	0,529	
Qts	0,49	0,490	=1/(1/Qes+1/Qms)
Vas (m3)	0,3	0,2985	=Cms*ro*c_^2*Sd^2
Cms (m/N)	1,61E-04	1,607E-04	
Rms (kg/s)	4,1	4,07	=1/Qms*RACINE(Mms/Cms)
Rendement (%)	2,5%	2,50%	=4*PI()^2/c_^3*Fs^3*Vas/Qes
Sd (m2)	0,1150	0,1150	
Xmax (mm)	5,5	5,5	=(Hc-Hg)/2
ro (kg/m3)	1,18	1,18	à priori Ok
c (m/s)	345	345	à priori Ok

On notera la très bonne cohérence des paramètres publiés par Beyma (aux arrondis près).

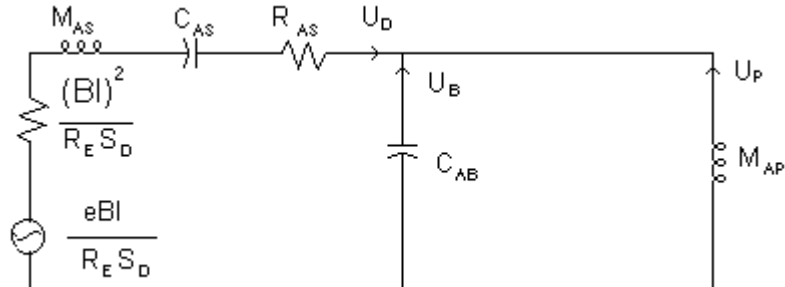
Le fichier Excel utilisé pour cette vérification de cohérence des paramètres TS du Beyma SM118 est disponible ici :

[http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/Verification\\_coherece\\_ts\\_SM118.xls](http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/Verification_coherece_ts_SM118.xls)

## Annexe 4 : Modélisation de l'enceinte bass-reflex

### A4.1 Modèle simplifié sans pertes.

Le schéma équivalent est celui-ci :



Avec :  $M_{AS}$  = masse acoustique du haut-parleur  
 $C_{AS}$  = compliance acoustique de la suspension du haut-parleur  
 $R_{AS}$  = résistance acoustique de la suspension du haut-parleur  
 $U_d$  = vitesse volumique du haut-parleur  
 $C_{AB}$  = compliance acoustique de l'enceinte  
 $U_b$  = vitesse volumique de l'enceinte  
 $M_{AP}$  = Masse acoustique de l'évent  
 $U_p$  = vitesse volumique de l'évent

La réponse en fréquence est donnée par la fonction de transfert :

$$FT = s^4 / ( a_0 + a_1*s + a_2*s^2 + a_3*s^3 + s^4 )$$

avec  $s = j*F/F_s$   $j^2 = -1$   
 $a_0 = h^2$   $a_1 = h^2/Q_{ts}$   $a_2 = h^2 + 1 + \alpha$   $a_3 = 1/Q_{ts}$   
 $h = F_b/F_s$  et  $\alpha = V_{as}/V_b$

C'est la fonction de transfert d'un filtre passe-haut d'ordre 4.

Après normalisation, c'est-à-dire en visant  $a_0=1$ , on obtient :

$$FT = s^4 / ( a_0 + a_1*s + a_2*s^2 + a_3*s^3 + s^4 )$$

avec  $s = j*F/\text{racine}(F_s*F_b)$   
 $a_0 = 1$   $a_1 = \text{racine}(h)/Q_{ts}$   $a_2 = h + (\alpha+1)/h$   $a_3 = 1/\text{racine}(h)/Q_{ts}$

Le processus « d'alignement » consiste alors à viser une fonction de transfert caractéristique. Par exemple, un passe-haut d'ordre 4 de Butterworth.

Ce passe-haut est caractérisé par les coefficients :

$$a_0 = 1 \quad a_1 = 2,6131 \quad a_2 = 3,4142 \quad \text{et} \quad a_3 = 2,6131$$

L'identification des coefficients  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  de la fonction de transfert du bass-reflex avec ceux du polynôme de Butterworth permet d'écrire :

$$a_1 = \text{racine}(h)/Q_{ts} = \text{racine}(4+2*\text{racine}(2)) \sim 2,6131$$

$$a_2 = h + (\alpha+1)/h = 2+\text{racine}(2) \sim 3,4142$$

$$a_3 = 1/Q_{ts}/\text{racine}(h) = \text{racine}(4+2*\text{racine}(2)) \sim 2,6131$$

On en déduit alors :

$$Q_{ts} = 1/\text{racine}(a_1*a_3) = 1/\text{racine}(4+2*\text{racine}(2)) \sim 0,3827$$

$$h = (a_1*Q_{ts})^2 = 1 \quad (\text{soit } F_b=F_s)$$

$$\alpha = -1 + h*(a_2 - h) = \text{racine}(2) \sim 1,414 \quad (\text{soit } V_b=0,707*V_{as})$$

A part le **Butterworth** « Maximally Flat Amplitude Response » qui privilégie l'étendue dans les basses fréquences et l'absence d'ondulation dans la réponse en fréquence : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre\\_de\\_Butterworth](http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Butterworth)

D'autres fonctions de transfert peuvent être visées :

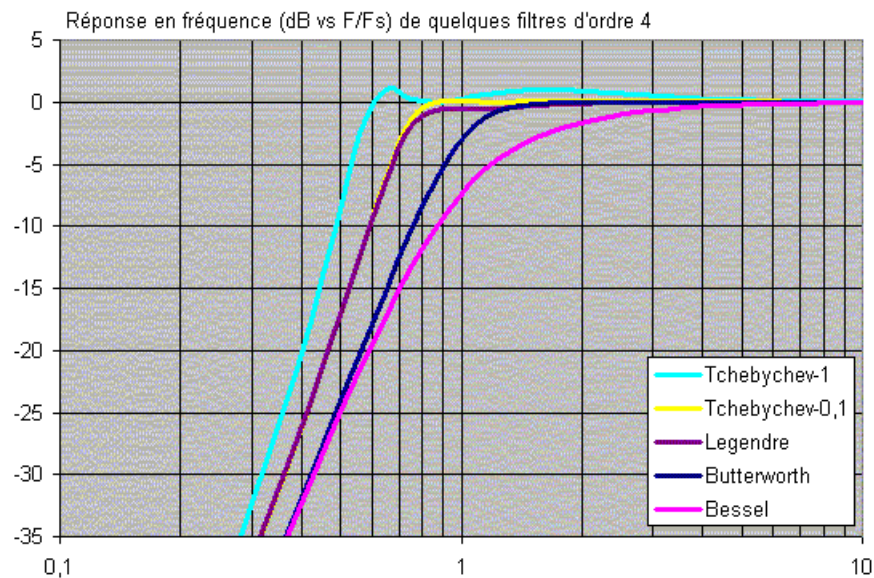
- les filtres de **Tchebychev** de type 1 étendent la réponse dans les basses fréquences et augmente la pente au prix d'une ondulation dans la bande passante : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre\\_de\\_Tchebychev](http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Tchebychev)

Pour ces filtres, il faut préciser l'ondulation maximale acceptable. Nous avons pris 1 et 0,1 dB.

- le filtre de **Legendre** est intermédiaire entre le Butterworth (pas d'ondulation) et les Tchebychev (extension maximale vers les basses fréquences): [http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre\\_de\\_Legendre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Legendre)

- enfin le **Bessel** « Maximally Flat Delay Response » qui privilégie la réponse transitoire au prix d'une atténuation plus douce : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre\\_de\\_Bessel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Bessel)  
<http://www.rane.com/note147.html>

Les réponses en fréquences de ces filtres sont les suivantes :



Comme pour le filtre de Butterworth, nous pouvons par identification trouver les paramètres  $Q_{ts}$ ,  $F_b/F_s$  et  $V_b/V_{as}$  pour la réponse souhaitée :

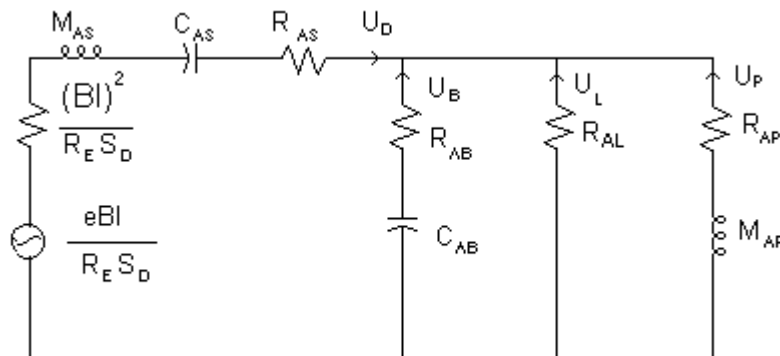
	Tchebychev-1	Tchebychev-0,1	Legendre	Butterworth	Bessel
a0	1	1	1	1	1
a1	1,3150	1,8907	1,9552	2,6131	3,1239
a2	2,7694	2,8860	2,9554	3,4142	4,3916
a3	1,9536	2,3324	2,4309	2,6131	3,2011
a4	1	1	1	1	1
$Q_{ts}$	0,624	0,476	0,459	0,383	0,316
$h=F_b/F_s$	0,673	0,811	0,804	1	0,976
$\alpha$	0,411	0,682	0,730	1,414	2,333
$V_b/V_{as}=1/\alpha$	2,433	1,466	1,370	0,707	0,429

On notera que chaque type de filtre ne peut être réalisé que pour un haut-parleur avec un  $Q_{ts}$  bien précis (par exemple  $Q_{ts}=0,316$  pour avoir un Bessel) dans une enceinte bien précise ( $V_b/V_{as}=0,429$  pour avoir un Bessel) et un accord bien précis ( $F_b/F_s=0,976$  pour avoir un Bessel).

Sans surprise, on notera également que la diminution de la fréquence de coupure ( $F_{-3dB}$  passe de  $1,5*F_s$  pour le Bessel à  $0,55*F_s$  pour le Tchebychev-1) s'accompagne d'une augmentation sensible du volume de l'enceinte (environ 5,7 fois plus important).

#### A4.2 Modèle avec pertes.

Le schéma acoustique équivalent est celui-ci :



[http://www.readresearch.co.uk/thiele-small\\_papers/smalls\\_vented\\_box\\_article\\_1.pdf](http://www.readresearch.co.uk/thiele-small_papers/smalls_vented_box_article_1.pdf)

Par rapport au schéma sans pertes, il a été ajouté :

$R_{ab}$  qui représente les pertes par absorption dans l'enceinte ( $Q_a$ )

$R_{al}$  qui représente les pertes par fuites ( $Q_l$ )

$R_{ap}$  qui représente les pertes par frottement dans l'évent ( $Q_p$ ).

Robert M. Bullock décrit dans cette publication un modèle unifié pour les enceintes closes, bass-reflex et à radiateur passif :

<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5853>

Ce modèle unifié est détaillé dans ce document :

<http://users.hal-pc.org/~bwhitejr/btsmodel.zip>

Il est utilisé par Kristian Ougaard dans sa feuille de calcul Excel Unibox :

<http://audio.claub.net/software/kougaard/ubmodel.html>

La réponse en fréquence est donnée par une fonction de transfert « un peu » plus compliquée qu'avec le modèle sans pertes :

$$FT = (b_3 s^3 + s^4) / (a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + s^4)$$

$$\text{avec } s = jF/F_s \quad j^2 = -1$$

$$b_3 = h/Q_p$$

$$a_0 = h^2 * (1 + 1/Q_l/Q_p)$$

$$a_1 = h^2 \alpha / Q_p + h^2 / Q_{ts} * (1 + 1/Q_l/Q_p) + h * (1/Q_a + 1/Q_l + 1/Q_p + 1/Q_a/Q_l/Q_p)$$

$$a_2 = \alpha + 1 + 1/Q_a/Q_l + h/Q_l/Q_{ts} + h^2 * (1 + 1/Q_l/Q_p) + \alpha/Q_a/Q_p +$$

$$h/Q_{ts} * (1/Q_a + 1/Q_p + 1/Q_a/Q_l/Q_p)$$

$$a_3 = \alpha/h/Q_a + (1 + 1/Q_a/Q_l)/Q_{ts} + h * (1/Q_a + 1/Q_l + 1/Q_p + 1/Q_a/Q_l/Q_p)$$

En général, il est considéré dans la littérature que le facteur de pertes le plus important est Ql : « Ql is usually the most significant » selon Richard H. Thiele qui propose comme valeurs typiques : Ql = 5-20 Qa > 100 et Qp = 50-100

Selon WinISD « Q l is the most dominant loss type in vented boxes » :

There are three types of losses:

- **Ql**, leakage losses. These are produced by leaks in enclosure or in driver itself. Generally, this is most dominant loss type in vented boxes. Typical value is 5-20. This is quite impossible to predict before building the actual box. For reasonable quality box, WinISD pro uses Ql of 10 by default.
- **Qa**, absorption losses. These are produced by losses in enclosure. Any stuffing will increase the absorption loss. With no stuffing inside the box, 100 is typical. Heavily stuffed enclosure has this about 3-5.
- **Qp**, port losses. These are produced by port. Port has some resistance (air doesn't actually flow through the port without some friction). Actually, by setting this into very small value, you can turn vented box into closed one!

Unibox propose de son côté :

Ql compris entre 10 (faible fuite) et 20 (pas de fuite)

Qa compris entre 5 (enceinte complètement remplie) et 120 (enceinte vide),

Qp compris entre 70 et 140

En supposant que Ql est prépondérant, la fonction de transfert du bass-reflex devient :

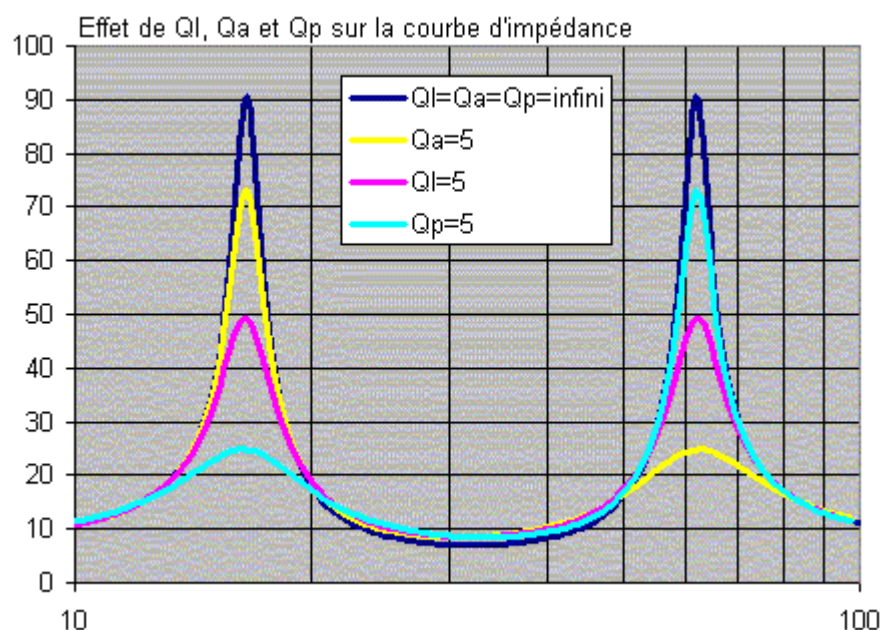
$$f_0 := \sqrt{f_s \cdot f_b} \quad h := \frac{f_b}{f_s} \quad \alpha := \frac{C_{ms}}{C_{mb}}$$

$$a_1 := \frac{\sqrt{h}}{Q_{ts}} + \frac{1}{Q_l \cdot \sqrt{h}} \quad a_2 := \frac{\alpha + 1}{h} + h + \frac{1}{Q_l \cdot Q_{ts}} \quad a_3 := \frac{1}{Q_{ts} \cdot \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_l}$$

$$T_x := \frac{\left(\frac{j \cdot f_x}{f_0}\right)^4}{1 + a_1 \cdot \left(\frac{j \cdot f_x}{f_0}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{j \cdot f_x}{f_0}\right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{j \cdot f_x}{f_0}\right)^3 + \left(\frac{j \cdot f_x}{f_0}\right)^4}$$

<http://jm.plantefevre.pagesperso-orange.fr/simul-hp.html>

Ces trois coefficients de pertes Ql, Qa et Qp ont des effets différents sur la courbe d'impédance de l'enceinte bass-reflex :



Qa se traduit par une diminution sensible du deuxième pic de la courbe d'impédance de l'enceinte bass-reflex et par une modification du volume apparent de l'enceinte :

<http://francis.audio2.pagesperso-orange.fr/acewp.pdf>

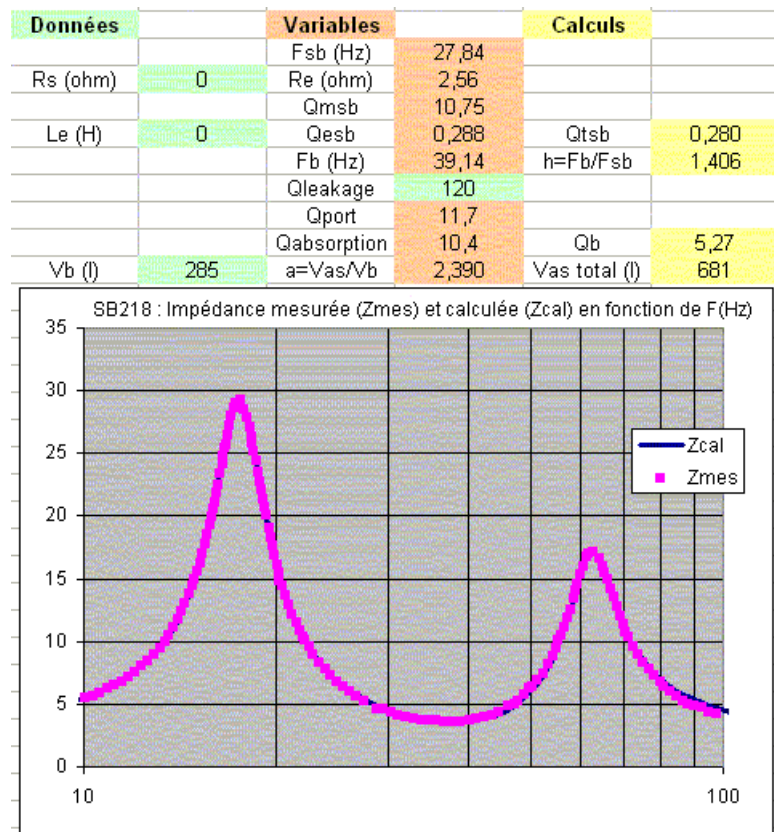
Qp se traduit par une diminution sensible du premier pic de la courbe d'impédance,

Ql se traduit par une diminution des deux pics de la courbe d'impédance.

Un bon moyen d'estimer les pertes réelles est donc de mesurer la courbe d'impédance et d'en déduire les coefficients Qa, Qp et Ql.

Un exemple d'illustration concerne la courbe d'impédance de l'enceinte SB218 :

<http://membres.multimania.fr/ratditcal/plans.pdf>



De façon générale, la modélisation de courbes d'impédance de nombreuses enceintes montre que :

- les pertes par fuite, représentées par Ql, sont négligeables (Ql infini),
- les pertes par absorption donnent en moyenne Qa=10 à 14,
- les pertes par frottement dans l'évent donnent en moyenne Qp=10 à 12.

## Annexe 5 : Les accords bass-reflex Legendre et Bessel

Nous avons vu en annexe 4 que, parmi les différents types de filtres existants, deux se font remarquer par des caractéristiques particulières :

- le filtre de Legendre qui donne la coupure basse à la valeur la plus faible et ce sans oscillation,
- le filtre de Bessel qui privilégie la réponse transitoire.

Ces deux types de filtre étant, assez curieusement, peu détaillés dans la littérature pour l'application bass-reflex, cette annexe détaille les alignements correspondants.

Nous avons également vu en annexe 4 que les pertes par fuite peuvent être négligées (Ql infini).

Dans ces conditions, la fonction de transfert du bass-reflex devient :

$$FT = (b_3 s^3 + s^4) / (a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + s^4)$$

$$\text{avec } s = jF/F_s \quad j^2 = -1$$

$$b_3 = h/Q_p$$

$$a_0 = h^2$$

$$a_1 = h\alpha/Q_p + h^2/Q_{ts} + h(1/Q_a + 1/Q_p)$$

$$a_2 = \alpha + 1 + h^2 + \alpha/Q_a/Q_p + h/Q_{ts}(1/Q_a + 1/Q_p)$$

$$a_3 = \alpha/h/Q_a + 1/Q_{ts} + h(1/Q_a + 1/Q_p)$$

Une difficulté apparaît immédiatement : du fait du terme  $b_3 s^3$ , ceci n'est pas la fonction de transfert d'un passe-haut d'ordre 4.

Autrement dit, l'identification avec les filtres de Legendre et Bessel n'est pas directe.

La méthode utilisée consiste à viser **au mieux** les réponses des filtres de Legendre et Bessel dans la plage de réponse en fréquence comprise entre -15dB et 0dB.

L'outil Solveur d'Excel a été utilisé afin de trouver, pour plusieurs valeurs de  $Q_{ts}$ , les paramètres  $h$  et  $\alpha$  qui minimisent l'écart entre la courbe de réponse cible (celle du filtre de Legendre ou Bessel) et la réponse en fréquence du bass-reflex.

Pour la suite de cette annexe, nous supposerons que les autres pertes sont « dans la moyenne » par rapport aux mesures réalisées.

Nous prendrons donc  $Q_a = 12$  et  $Q_p = 11$ .

### A5.1 L'accord bass-reflex type Legendre

La fonction de transfert d'un passe-haut de Legendre d'ordre 4 est représentée par l'équation normalisée :

$$FT = s^4 / ( 1 + a1*s + a2*s^2 + a3*s^3 + s^4 )$$

avec  $s = j*F/Fs$   $j^2 = -1$

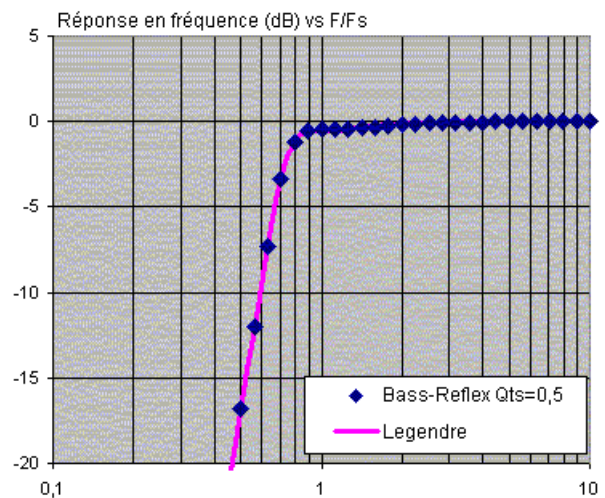
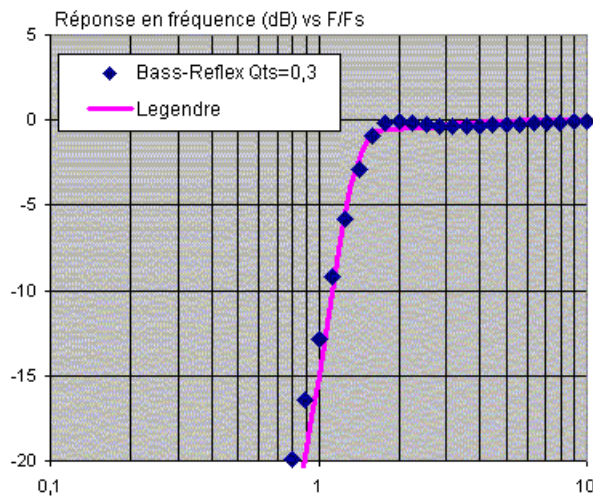
$a1 = 1,9552$

$a2 = 2,9554$

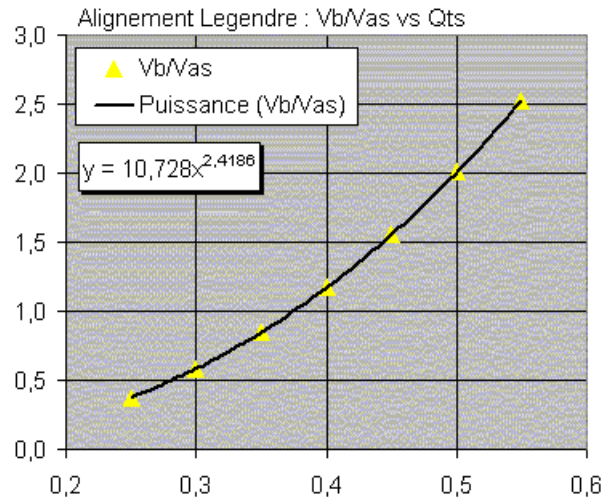
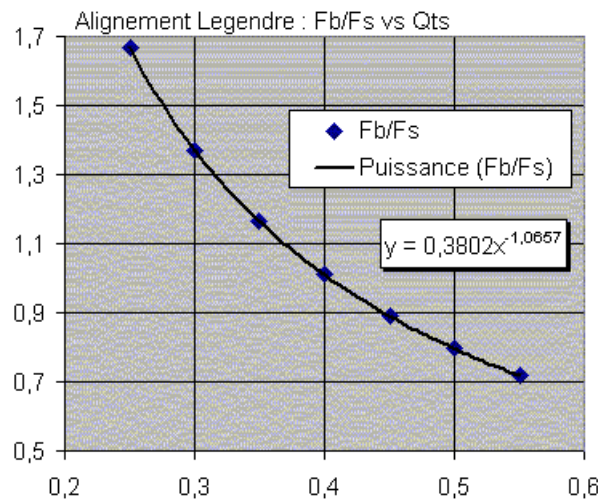
$a3 = 2,4309$

Il est possible de viser cet alignement avec un Qts compris entre 0,25 à 0,55.

Deux exemples de résultats :



Afin de généraliser ces résultats à d'autres valeurs de Qts, nous avons tracé les valeurs de  $h=Fb/Fs$  et  $\alpha = Vas/Vb$  en fonction du Qts :



Concernant le rapport de F-3 (fréquence de coupure basse à -3dB) sur Fs en fonction de Qts, nous obtenons :

$$F-3 = 0,3317 * Fs / Qts^{1,1612}$$

## A5.2 L'accord bass-reflex type Bessel

La fonction de transfert d'un passe-haut de Bessel d'ordre 4 est représentée par l'équation normalisée :

$$FT = s^4 / ( 1 + a1*s + a2*s^2 + a3*s^3 + s^4 )$$

$$\text{avec } s = j*F/Fs \quad j^2 = -1$$

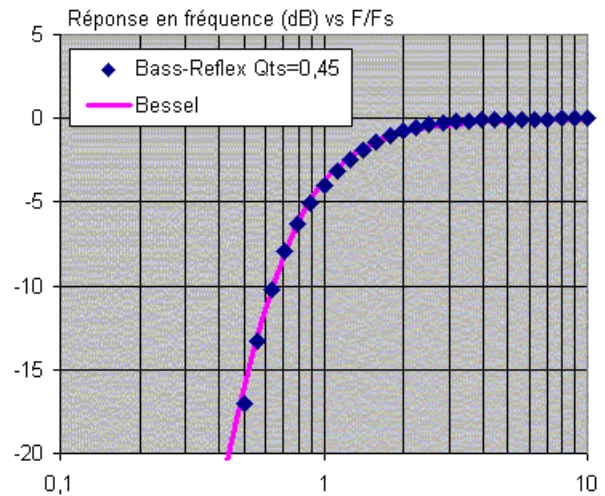
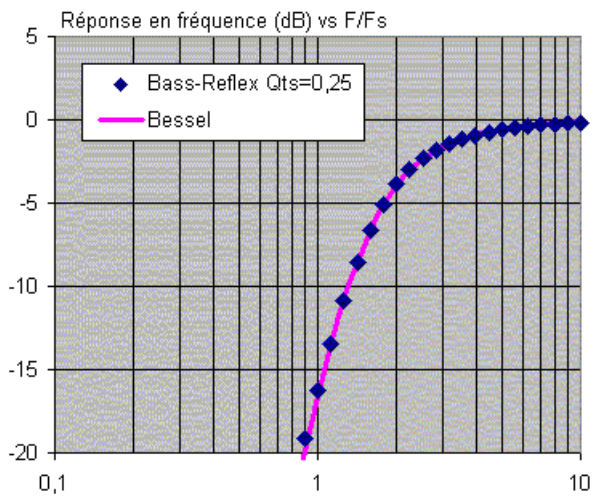
$$a1 = 10/105^{(1/4)} \sim 3,1239$$

$$a2 = 45/105^{(2/4)} \sim 4,3916$$

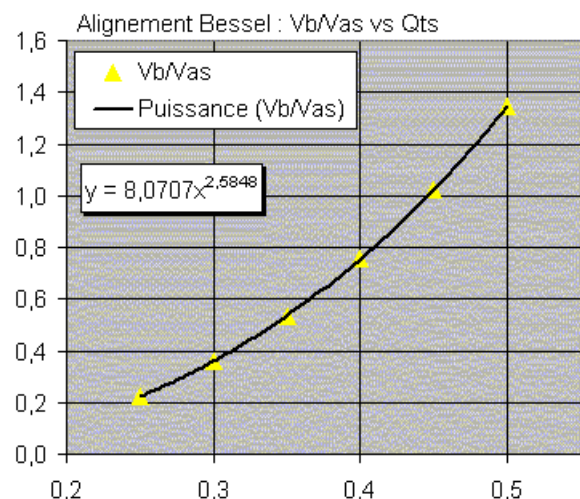
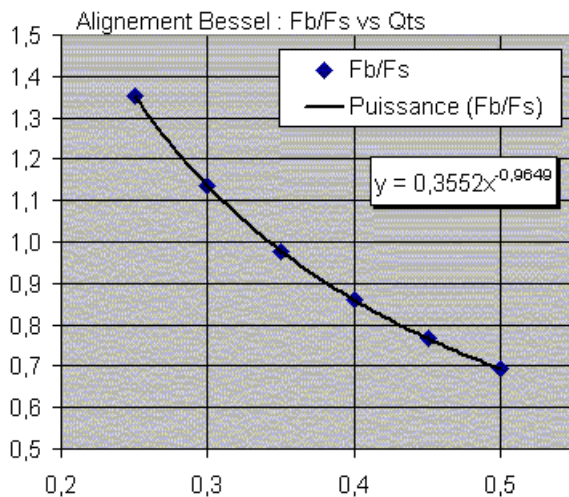
$$a3 = 105/105^{(3/4)} \sim 3,2011$$

Il est possible de viser cet alignement avec un Qts compris entre 0,25 à 0,5.

Deux exemples de résultats :



Afin de généraliser ces résultats à d'autres valeurs de Qts, nous avons tracé les valeurs de  $h=Fb/Fs$  et  $\alpha = Vb/Vas$  en fonction du Qts :



On constatera, par rapport à l'accord Legendre, une fréquence d'accord  $Fb/Fs$  plus basse (-15%) et un volume d'enceinte  $Vb/Vas$  sensiblement plus faible (-35%).

Du fait d'une réponse en fréquence « adoucie », la fréquence de coupure F-3dB de l'alignement Bessel est nettement plus élevée (+35%).

$$F-3 = 0,479 * Fs / Qts^{1,1029}$$