

COMMENT CALCULER UN FILTRE PASSIF ?

Francis Brooke

<http://www.francisaudio.fr/>

Mai 2008

Sommaire

1. Introduction.....	2
2. Mesure des réponses en fréquences des haut-parleurs	2
3. Mesure des impédances complexes des haut-parleurs	3
4. Modélisation des impédances complexes des haut-parleurs	3
5. Calcul du filtre passif 12dB/12dB.....	5
6. Vérification de l'alignement temporel.....	8
7. Calcul du filtre passif 12dB/18dB.....	10
8. Historique.....	15

1. Introduction

Afin de calculer un filtre passif, il est nécessaire de connaître :

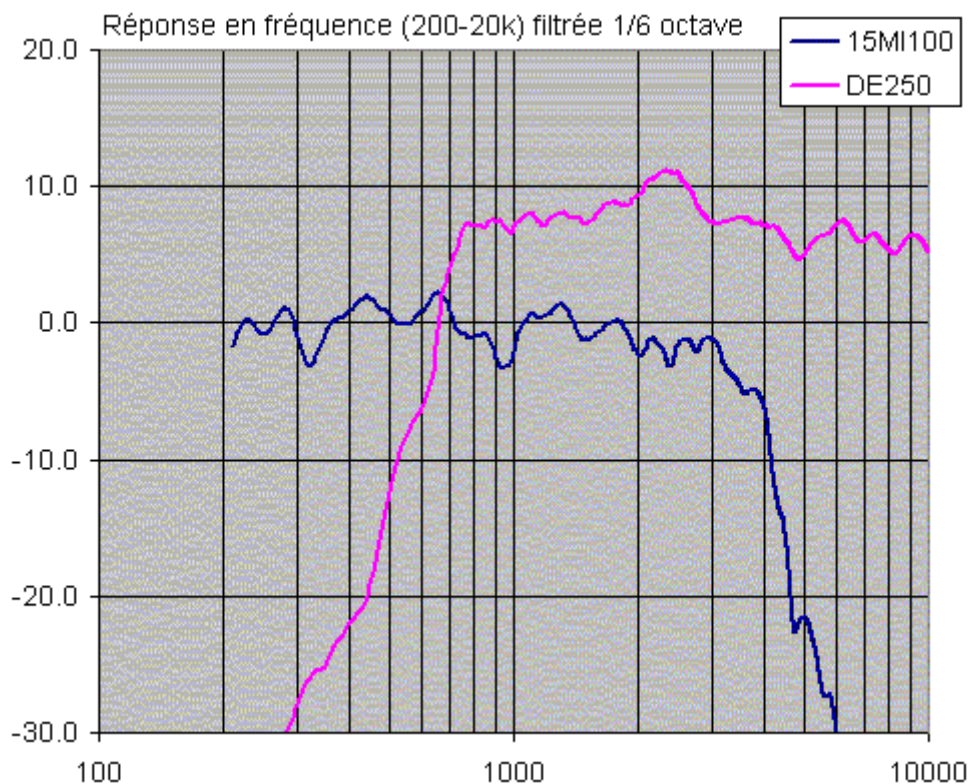
- les courbes de réponses en fréquence des haut-parleurs,
- les courbes d'impédance complexe des haut-parleurs,
- les courbes de réponses cibles.

A titre d'illustration de la méthode de calcul d'un filtre passif, il est ici détaillé le calcul du filtre d'une enceinte deux voies constituée du 38cm Beyma 15MI100 et de la compression 1" B&C DE250 associée au pavillon RCF H100.

2. Mesure des réponses en fréquences des haut-parleurs

La première étape consiste à mesurer les courbes de réponse en fréquence avec Adobe Audition associé au plug-in aurora (20s 200-20k). Ces réponses en fréquences sont ensuite lissées au 1/6 d'octave.

On notera une sensibilité plus élevée de 8dB de la compression.



3. Mesure des impédances complexes des haut-parleurs

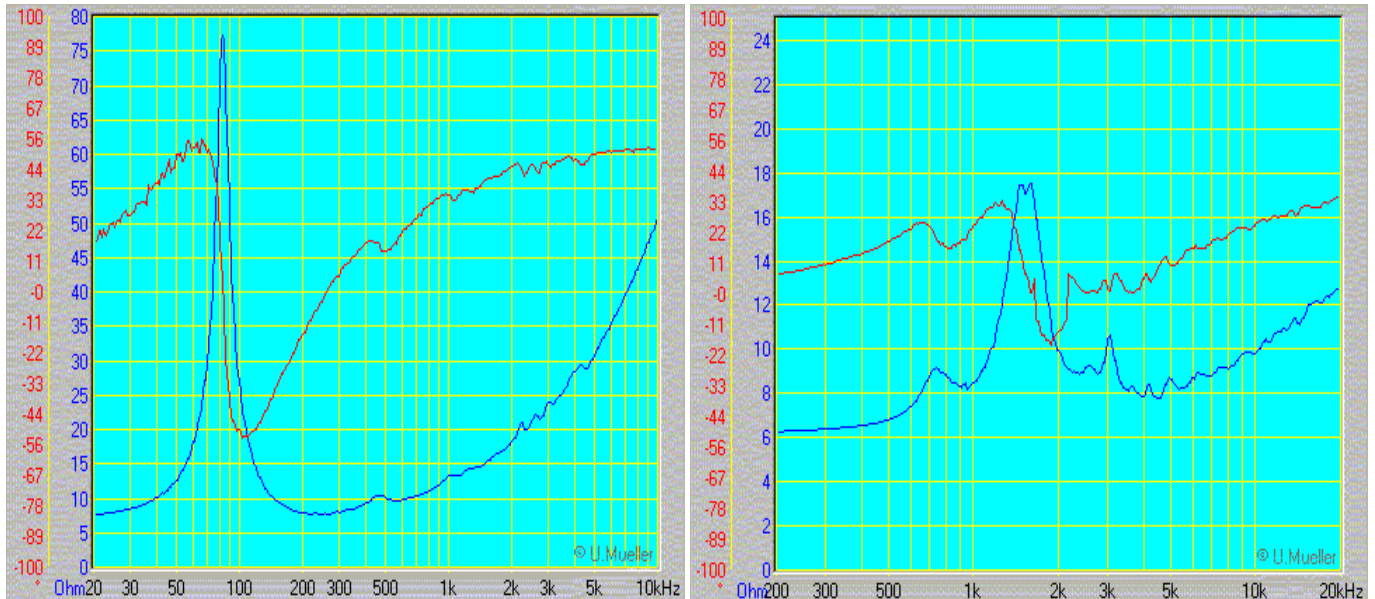
La connaissance de l'impédance des haut-parleurs est nécessaire au calcul du filtre passif. Toutefois le modèle $Z_{hp} = 80\Omega$ est beaucoup trop simplifié.

Même le modèle $Z_{hp} = R_e + j.\omega.L_e$ est loin de la réalité puisque la résistance R_e et l'inductance L_e dépendent tous deux de la fréquence.

Un exemple de modélisation de l'impédance d'un haut-parleur est donné ici :

http://perso.orange.fr/francis.audio2/Modelisation_impedance_HP.pdf

La deuxième étape consiste donc à mesurer, avec Audiotester, le module et la phase des impédances complexes du 15MI100 (à gauche) et de la DE250 (à droite).



4. Modélisation des impédances complexes des haut-parleurs

Les parties réelles et imaginaires des impédances des 15MI100 et DE250 sont ensuite modélisées avec Excel.

Le modèle empirique utilisé ici est de la forme : $Z_{hp} = Z_{reel} + j.Z_{img}$
avec $Z_{reel} = R_e + K_{rm}.\omega^{E_{rm}}$ et $Z_{img} = K_{xm}.\omega^{E_{xm}}$

Il est utilisé la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser l'écart entre l'impédance mesurée et l'impédance calculée :

http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_moindres_carr%C3%A9s

Nous obtenons alors les paramètres R_e , K_{rm} , E_{rm} , K_{xm} , E_{xm} .

La résonance vers 1,5 kHz de la DE250 est représentée par un circuit LCR série.

Soit, pour le 15MI100 en fonction de la fréquence f (Hz) :

$$Z_{1reel} = R_e + K_{rm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{rm}} \text{ avec } R_e = 6,56 \text{ } K_{rm} = 0,00410 \text{ } E_{rm} = 0,786$$

$$Z_{1img} = K_{xm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{xm}} \text{ avec } K_{xm} = 11,2 \text{ } E_{xm} = 0,743$$

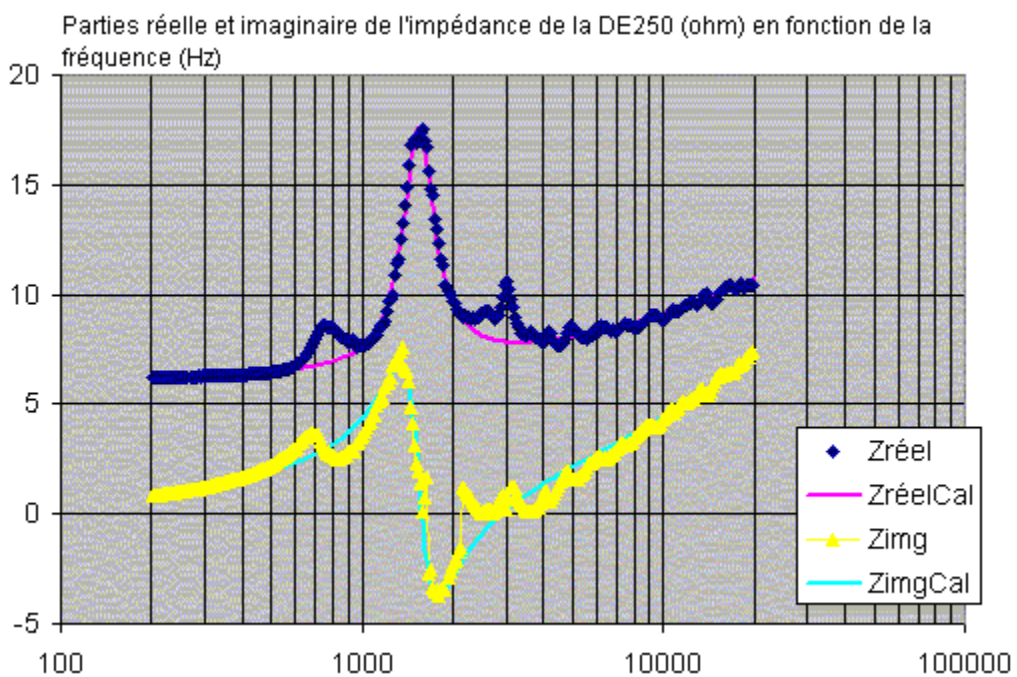
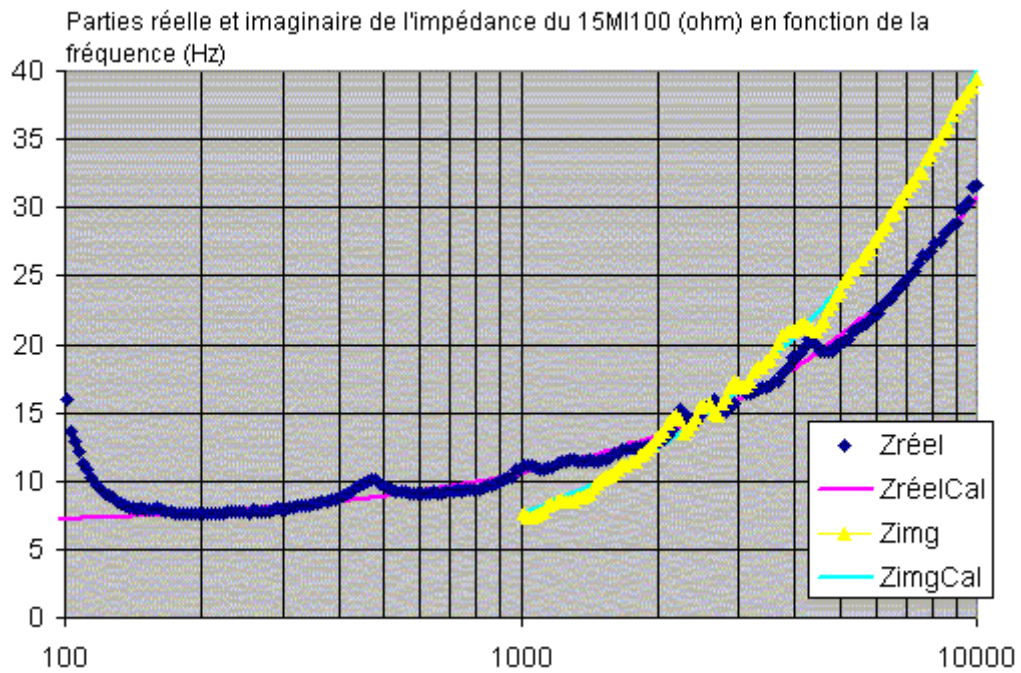
et pour la DE250 en fonction de la fréquence f (Hz) :

$$Z_{2reel} = R_e + K_{rm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{rm}} \text{ avec } R_e = 5,76 \text{ } K_{rm} = 0,00467 \text{ } E_{rm} = 0,794$$

$$Z_{2img} = K_{xm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{xm}} \text{ avec } K_{xm} = 0,00591 \text{ } E_{xm} = 0,608$$

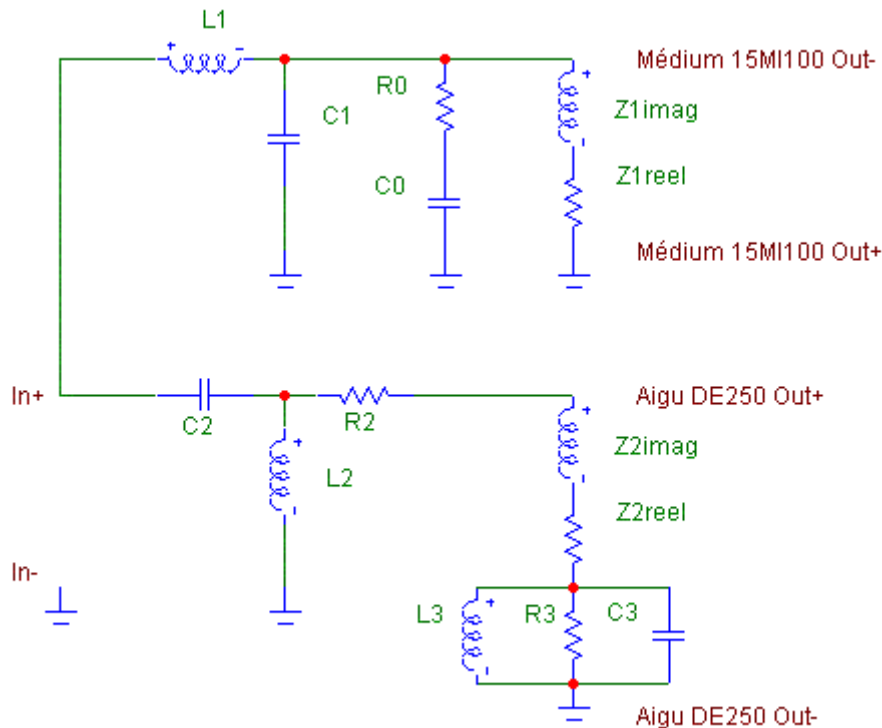
$$\text{Résonance } 1560 \text{ Hz} \quad L_3 = 0,324 \text{ m} \quad R_3 = 10,8 \quad C_3 = 32,3 \mu$$

On notera le bon accord entre mesures (Zréel et Zimg) et modèles (ZréelCal et ZimgCal) :



5. Calcul du filtre passif 12dB/12dB

Le schéma électrique équivalent des filtres du deuxième ordre (L1, C1, R0, C0 pour le passe-bas du 15MI100 et L2, C2, R2 pour le passe-haut de la DE250) et des haut-parleurs (Z1reel, Z1imag pour le 15MI100 et Z2reel, Z2imag pour la DE250) est le suivant :



Les fonctions de transfert du passe-bas et du passe-haut ont été calculées avec le logiciel Maple.

Nous obtenons pour le passe-bas du 15MI100 :

```
[> restart;
> Za:=1/(I*C1*omega+1/(R0+(1/(I*C0*omega)))+1/(Zlreel+I*Zlimag));
```

$$Z_a = \frac{1}{I C_1 \omega + \frac{1}{R_0 - \frac{I}{C_0 \omega}} + \frac{1}{Z_{lreel} + I Z_{limag}}}$$

```
> Us:=Za/(Za+I*L1*omega);
```

$$U_s = \frac{1}{\left(I C_1 \omega + \frac{1}{R_0 - \frac{I}{C_0 \omega}} + \frac{1}{Z_{lreel} + I Z_{limag}} \right) \left(\frac{1}{I C_1 \omega + \frac{1}{R_0 - \frac{I}{C_0 \omega}} + \frac{1}{Z_{lreel} + I Z_{limag}}} + I L_1 \omega \right)}$$

```
> simplify(Us);
```

$$- (R_0 C_0 \omega - I) (Z_{lreel} + I Z_{limag}) / (-R_0 C_0 \omega Z_{lreel} - I R_0 C_0 \omega Z_{limag} + I Z_{lreel} - Z_{limag} + L_1 \omega^3 C_1 R_0 C_0 Z_{lreel} + I L_1 \omega^3 C_1 R_0 C_0 Z_{limag} - I L_1 \omega^2 C_1 Z_{lreel} + L_1 \omega^2 C_1 Z_{limag} - I L_1 \omega^2 C_0 Z_{lreel} + L_1 \omega^2 C_0 Z_{limag} - I L_1 \omega^2 R_0 C_0 - L_1 \omega)$$

et pour le passe-haut de la DE250 :

```
[> restart;
> Zout:=Z2reel+I*Z2img+1/(1/(I*L3*omega)+1/R3+I*C3*omega);
```

$$Z_{out} = Z_{2reel} + I Z_{2img} + \frac{1}{-\frac{I}{L_3 \omega} + \frac{1}{R_3} + I C_3 \omega}$$

```
> Za:=1/(1/(I*L2*omega)+1/(R2+Zout));
```

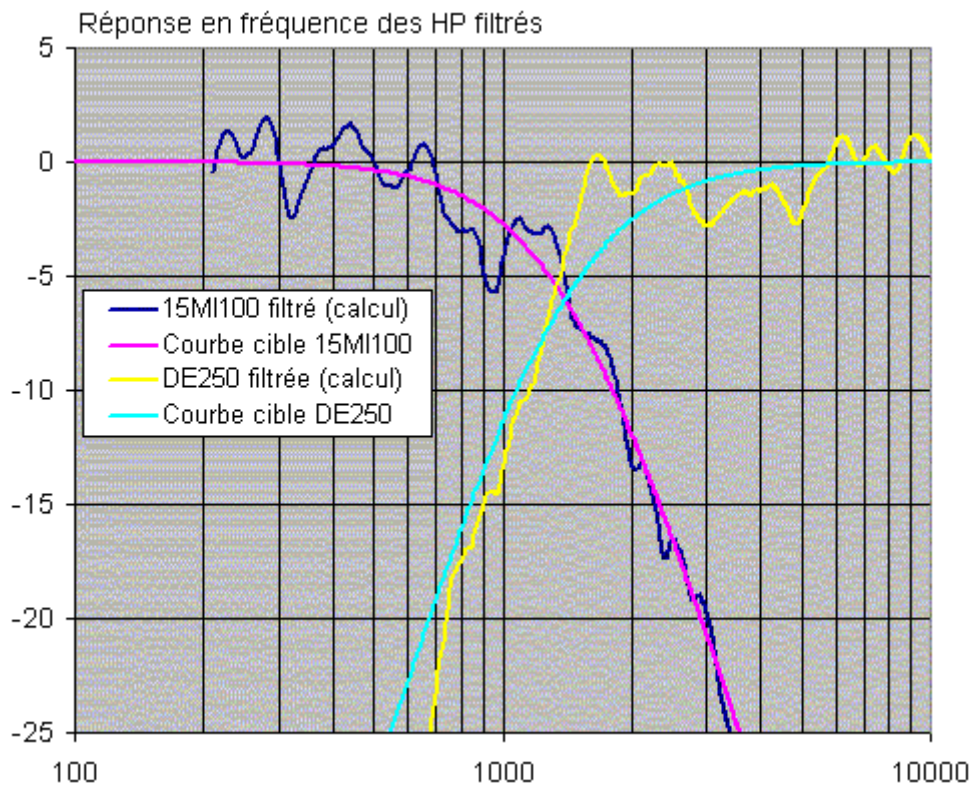
$$Z_a = \frac{1}{-\frac{I}{L_2 \omega} + \frac{1}{R_2 + Z_{2reel} + I Z_{2img} + \frac{1}{-\frac{I}{L_3 \omega} + \frac{1}{R_3} + I C_3 \omega}}}$$

```
> Us:=Za/(Za+1/(I*C2*omega))*Zout/(Zout+R2);
```

$$U_s = \left(Z_{2reel} + I Z_{2img} + \frac{1}{-\frac{I}{L_3 \omega} + \frac{1}{R_3} + I C_3 \omega} \right) / \left(\left(-\frac{I}{L_2 \omega} + \frac{1}{R_2 + Z_{2reel} + I Z_{2img} + \frac{1}{-\frac{I}{L_3 \omega} + \frac{1}{R_3} + I C_3 \omega}} \right) \left(\frac{1}{-\frac{I}{L_2 \omega} + \frac{1}{R_2 + Z_{2reel} + I Z_{2img} + \frac{1}{-\frac{I}{L_3 \omega} + \frac{1}{R_3} + I C_3 \omega}}} - \frac{I}{C_2 \omega} \right) \left(R_2 + Z_{2reel} + I Z_{2img} + \frac{1}{-\frac{I}{L_3 \omega} + \frac{1}{R_3} + I C_3 \omega} \right) \right)$$

La fonction de transfert cible est un Linkwitz-like d'ordre 3 à 1400Hz.

La figure ci-dessous compare les courbes de réponses cibles et les réponses calculées des haut-parleurs filtrés :



Ici aussi la méthode des moindres carrés a été appliquée en utilisant la fonction Solveur d'Excel.

L'écart entre réponse cible et réponse calculée est minimisé par action sur les valeurs des composants du filtre dans une plage 700-2800Hz (+/-1 octave autour de la fréquence de raccordement).

Il a été obtenu les valeurs suivantes pour le filtre du 15MI100 :

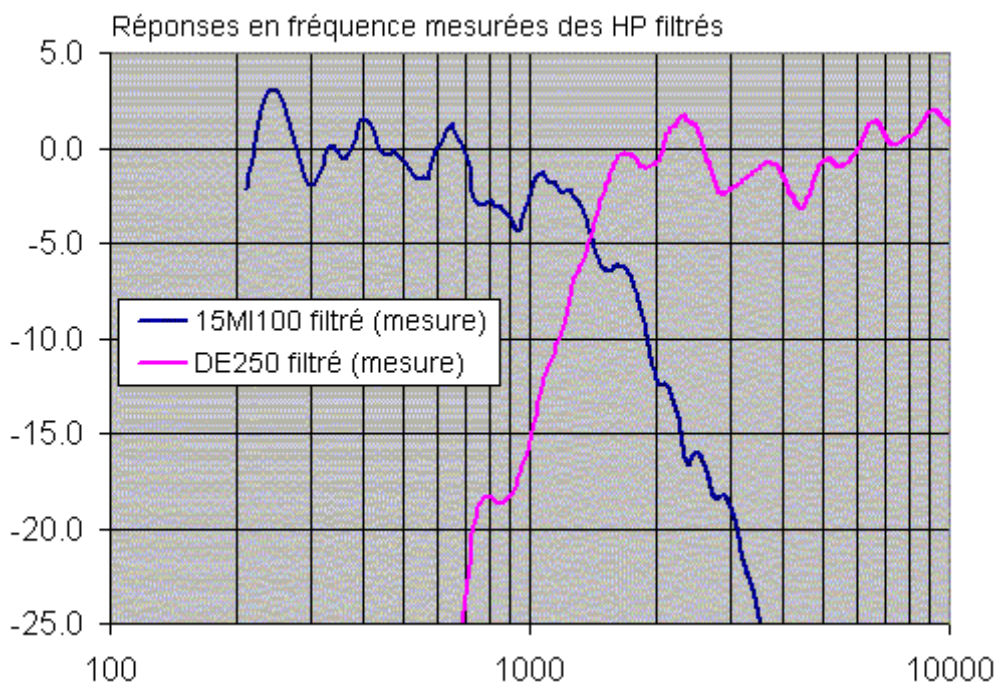
$$L1 = 1,9\text{mH} \quad C1 = 15\mu\text{F} \quad R0 = 22\text{ohm} \quad C0 = 42\mu\text{F}$$

et pour le filtre calculé de la DE250 :

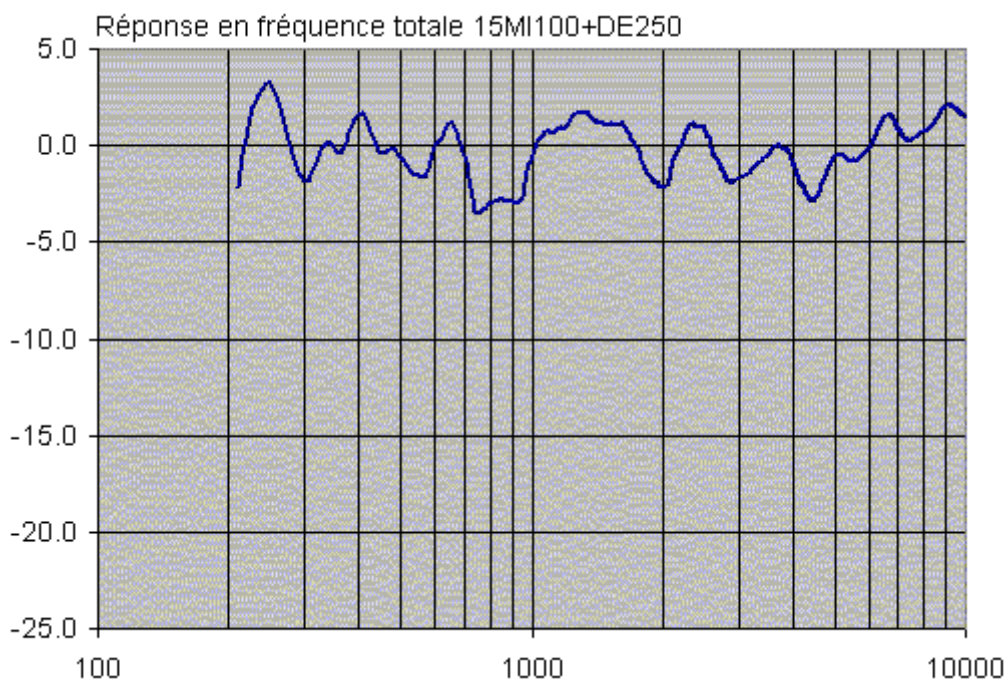
$$C2 = 2,3\mu\text{F} \quad L2 = 2,9\text{mH} \quad R2 = 9,6\text{ohm}$$

On notera le décalage des fréquences de coupure : 950Hz pour le 15MI100 et 1,9kHz pour la DE250.

La mesure des courbes de réponse en fréquence des haut-parleurs ainsi filtrés est en bon accord avec les courbes attendues :

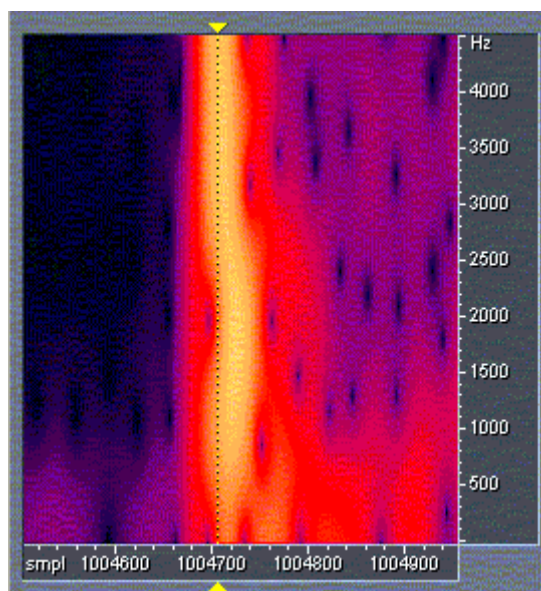


La réponse en fréquence de l'ensemble 15MI100+DE250+H100+filtres montre une bonne régularité.



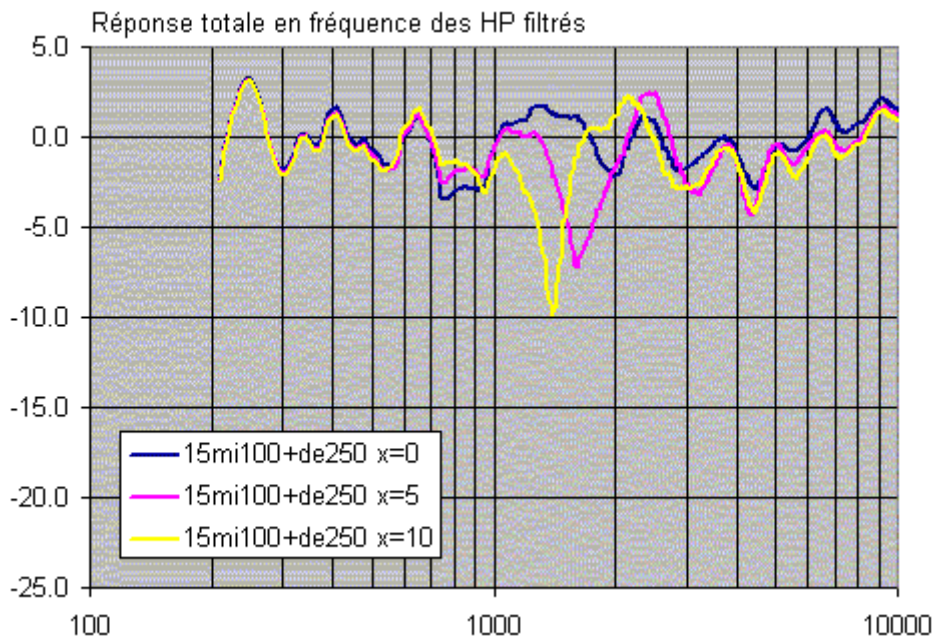
6. Vérification de l'alignement temporel

La vue spectrale de l'impulsion globale montre un bon raccord entre les deux haut-parleurs. Le retard amené par le filtre passe-bas du 15MI100 est ici partiellement compensé par le recul apporté par le pavillon H100.



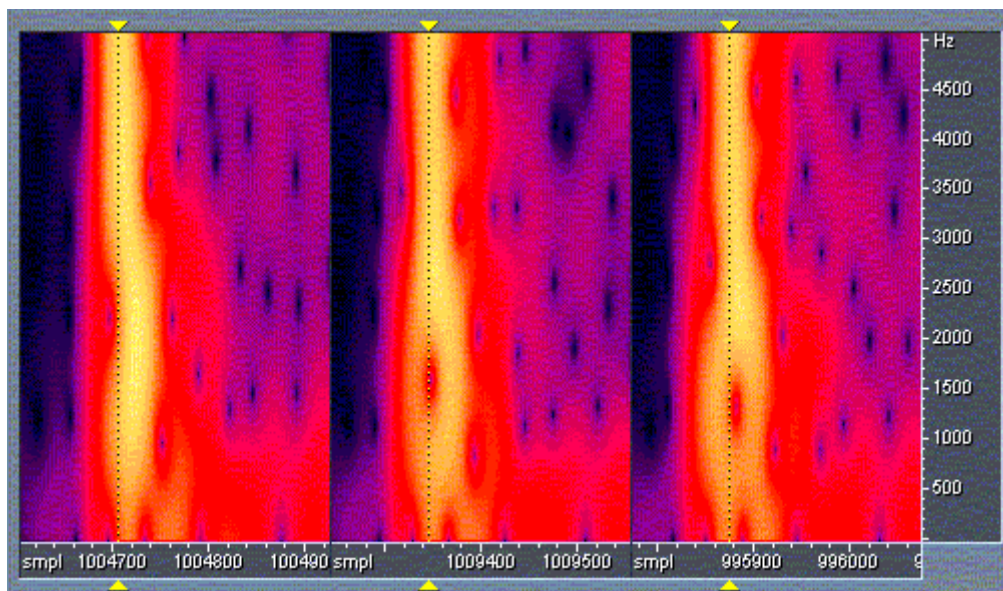
Afin d'affiner l'alignement temporel, il a été étudié l'effet d'un décalage supplémentaire du H100 par rapport au 15MI100.

La figure ci-dessous montre les courbes de réponse en fréquence pour différents décalages du H100.



L'ajout d'un décalage de 5 puis de 10 cm se traduit par un trou dans la courbe de réponse globale.

Les vues spectrales des réponses impulsionnelles pour différents décalage du H100 ($x=0\text{cm}$, $x=5\text{cm}$ et $x=10\text{cm}$) montrent également une réponse impulsionnelle moins bonne si un décalage de 5 ou 10 cm est ajouté :



7. Calcul du filtre passif 12dB/18dB

Le filtre précédent a été testé par Samuel Corde, que je remercie chaleureusement, en octobre 2006 en comparaison avec le filtre de l'enceinte CG7-382Pk composée également du 15MI100 et de la DE250 associée au H100 :

<http://www.bcorde.com/index.php?page=83&lg=1>

Du point de vue subjectif, le filtre de Samuel Corde est avantagé sur le critère d'adaptation à l'écoute à forte puissance, en particulier sur de la musique live, tandis mon filtre est avantagé sur les critères de précision et d'articulation du grave dans un contexte de puissance limitée ou de musique enregistrée.

Il a donc été étudié un filtre qui augmente la tenue en puissance de la DE250 tout en conservant le côté « hi-fi » du premier filtre.

Deux moyens sont utilisables pour favoriser la tenue en puissance d'une compression : augmenter la fréquence de raccordement du filtre ou augmenter la pente du filtre.

Toutefois une augmentation de la fréquence de raccordement entre 15MI100 et DE250 se traduit par un comportement plus directif du 15MI100 dans la zone de raccordement.

Habituellement on vise $k*a < 5$ avec $k=2*\text{Pi}*fréquence/c$, $c=$ vitesse du son=344 m/s :

<http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/BaffledPiston/BaffledPiston.html>

Pour le 15MI100 ($S_d=0,088$ m² soit $a=$ rayon du haut-parleur=0,167 m) :

<http://profesional.beyma.com/ENGLISH/pdf/descarga.php?pdf=15MI100.pdf>

la fréquence maximale de coupure est donc de $5*344/0,167/2/\text{Pi} = 1,6$ kHz.

Par ailleurs la fréquence de coupure conseillée pour la DE250 est également de 1,6 kHz :

<http://www.bcspeakers.com/download/prodotti/PDF/DE250.pdf>

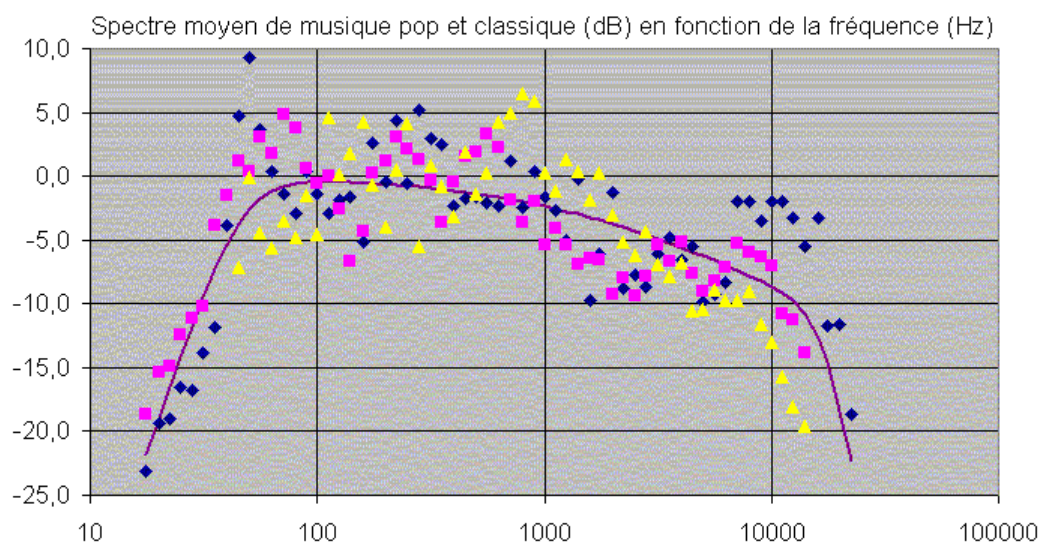
Enfin le pavillon H100 ayant une « Cut-Off Frequency » de 800 Hz :

<http://www.rcf.it/download.phtml?id=1457>

et sachant qu'il est usuel de raccorder un pavillon un octave au dessus de la fréquence de coupure acoustique, on trouve aussi une fréquence de coupure de 1,6 kHz.

Pour toutes ces raisons, nous retenons une fréquence de raccordement de 1,6 kHz un peu supérieure au 1,4 kHz du premier filtre.

Concernant la pente du filtre, une donnée de base est le spectre moyen en régime musical :

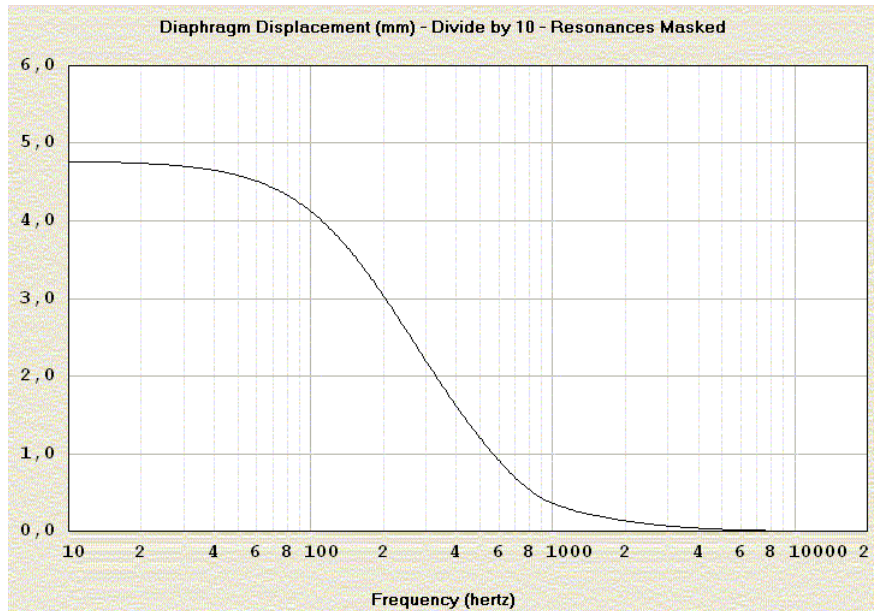


L'autre donnée de base est l'excursion de la membrane de la compression en fonction de la fréquence.

Pour une compression chargée par un pavillon, cette excursion est de la forme $A/(1+(F/F_s)^2)$
Voir, à titre d'illustration, les résultats du logiciel Hornresp de David J McBean :

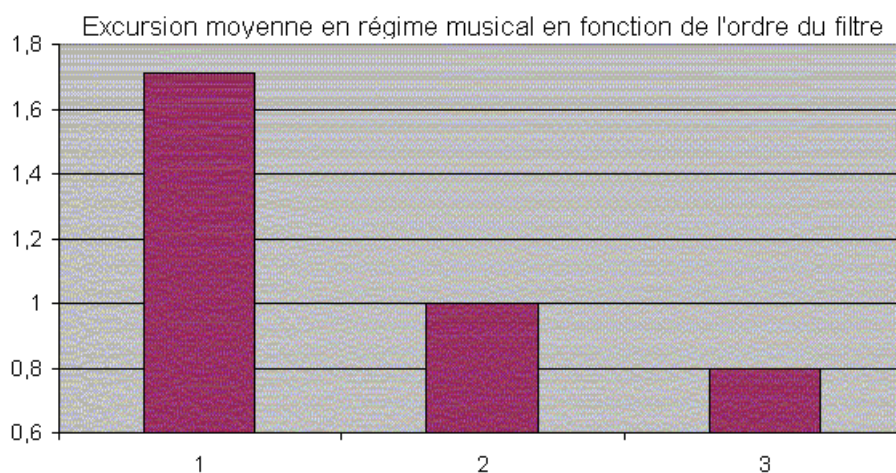
<http://mywebsite.bigpond.com/dmcbean/>

en particulier une Tad TD2001, dont les paramètres ($F_s \sim 315$ Hz) ont été donnés par Jean-Michel Le Cléac'h <http://fr.groups.yahoo.com/group/son-qc/message/27456> donne ceci ($E_g=2,83V$):



Avec une fréquence de résonance F_s d'environ 1600 Hz pour la DE250, il est alors possible de déterminer l'excursion de la membrane en régime musical en fonction de la pente du filtre.

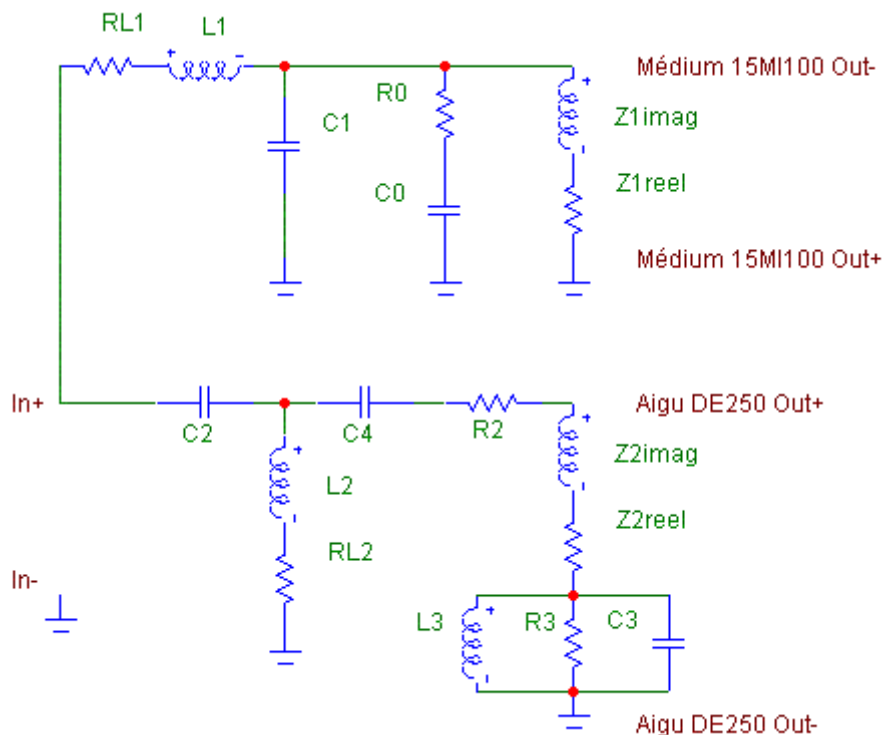
En prenant comme référence le filtre d'ordre 2, on obtient ceci :



Nous constatons que, à même fréquence de coupure ($F_c=1600$ Hz), un filtre d'ordre 3 permet de réduire de 20% l'excursion moyenne par rapport à un filtre d'ordre 2, ce qui se traduit par une réduction de la distorsion à même niveau sonore et par une augmentation de la puissance admissible.

On notera que le filtre d'ordre 1 (+70% d'excursion par rapport à un filtre d'ordre 2 !) est à éviter dans ce contexte faible distorsion ou puissance admissible importante.

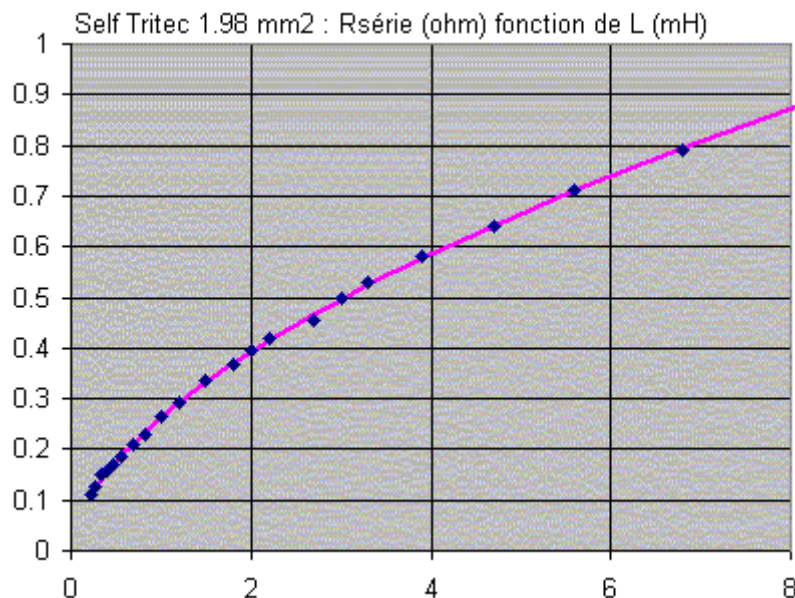
Le schéma équivalent du filtre 12dB/18dB est alors le suivant :



En plus de la présence de C4 (passage du passe-haut de la DE250 de l'ordre 2 à l'ordre 3), il a été ajouté RL1 et RL2 afin de prendre en compte la résistance des selfs L1 et L2.

Cette résistance série augmente avec la valeur de la self.

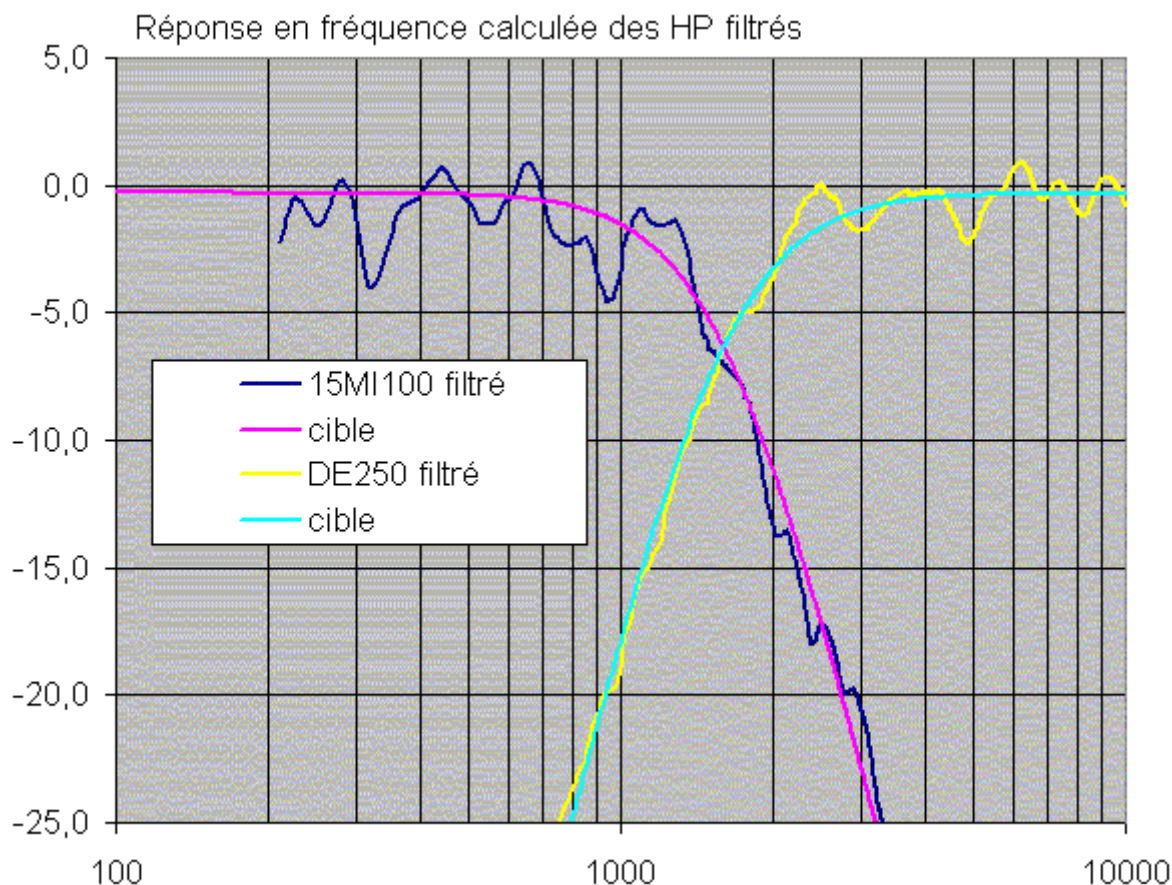
A titre d'illustration, la résistance des selfs Tritec 1,98 mm² en fonction de l'inductance est la suivante http://www.riviera-acoustics.com/catalog/default.php?cPath=46_24_70_73 :



Pour cette gamme de self, nous avons $R_{série}(ohm) = 0,264 * Inductance(mH)^{0,575}$

La fonction de transfert cible est un Linkwitz d'ordre 4 à 1600Hz.

La figure ci-dessous compare les courbes de réponses cibles et les réponses calculées des haut-parleurs filtrés :



Ici aussi la méthode des moindres carrés a été appliquée en utilisant la fonction Solveur d'Excel.

L'écart entre réponse cible et réponse calculée est minimisé par action sur les valeurs des composants du filtre dans une plage 800-3200Hz (+/-1 octave autour de la fréquence de raccordement).

La feuille de calcul Excel correspondante est disponible ici :

http://perso.orange.fr/francis.audio2/Calcul_filtre_passif_15mi100_de250.zip

Il a été obtenu les valeurs suivantes pour le filtre du 15MI100 :

$L1 = 2,03 \text{ mH}$ $C1 = 15,5 \text{ } \mu\text{F}$ $R0 = 36,7 \text{ ohm}$ $C0 = 22 \text{ } \mu\text{F}$

et pour le filtre calculé de la DE250 :

$C2 = 2,37 \text{ } \mu\text{F}$ $L2 = 1,05 \text{ mH}$ $C4 = 22 \text{ } \mu\text{F}$ $R2 = 11,5 \text{ ohm}$

On notera le décalage des fréquences de coupure e vue électrique : 900 Hz pour le 15MI100 et 3,2 kHz pour la DE250.

Ce décalage avec le calcul théorique simplifié ($F_c=1600 \text{ Hz}$) est la conséquence de la prise en compte des paramètres réels des haut parleurs (courbe de réponse en fréquence et impédance complexe).

Quelques exemples pour le choix des composants de ce filtre :

L1 = 2 mH série AD 15/10 ou Tritec 1,98 mm²

C1 = 15 μ F SCR PB ou Audyn Cap MKP-Q4

R0 = 36 ohm par la mise en série de deux résistances 18 ohm

C0 et C4 = 22 μ F est une valeur standard MKP Q4 ou SCR PB

C2 = 2,4 μ F par la mise en parallèle de deux condensateurs 1,2 μ F Audyn Cap KP-SN ou SCR SY

L2 = 1mH LA 12/10 ou Tritec 1,37 mm²

R2 = 12 ohm céramique 10W ou MOX 10W

Des fournisseurs :

<http://www.lamaisonduhautparleur.com/tarifs-composants.php>

<http://www.riviera-acoustics.com/catalog/default.php?cPath=46>

8. Historique

Rev.3 le 30/05/2008 : ajout valeurs normalisés du filtre 12/18dB

Rev.2 le 30/04/2008 : ajout « Filtre 12dB/18dB »

Rev.1 le 27/05/2006 : ajout « Vérification de l'alignement temporel »

Rev.0 Edition initiale le 24/05/2006 par Francis Brooke www.francisaudio.fr