

COMMENT CALCULER UN FILTRE PASSIF ?

Francis Brooke

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

Mai 2006

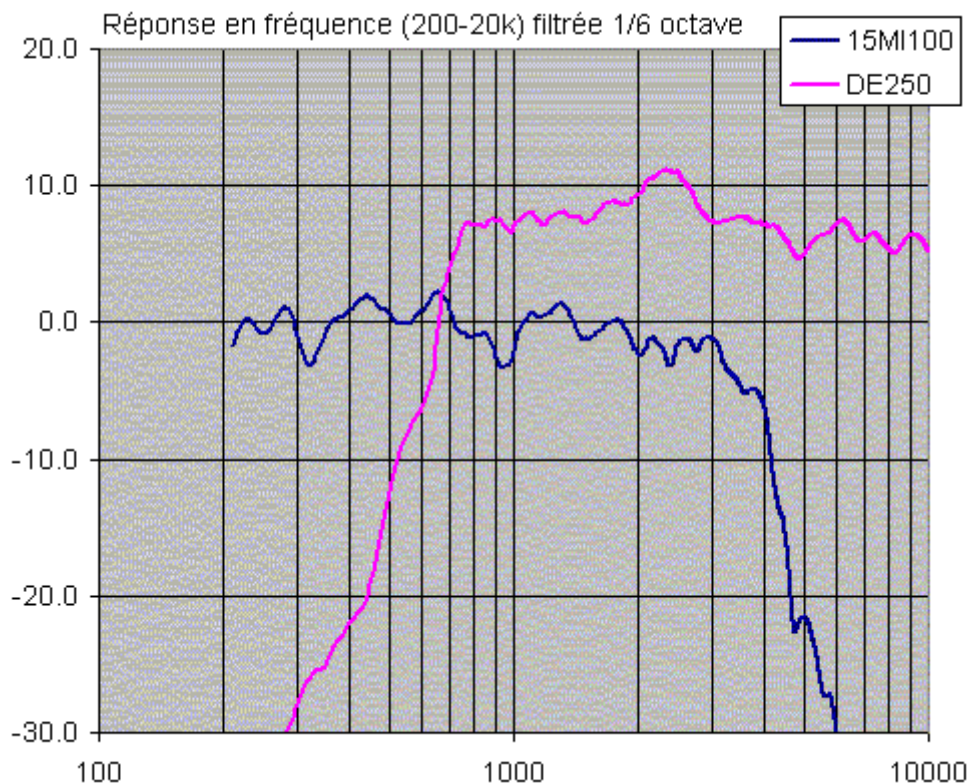
Les données d'entrée du dimensionnement d'un filtre passif sont :

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

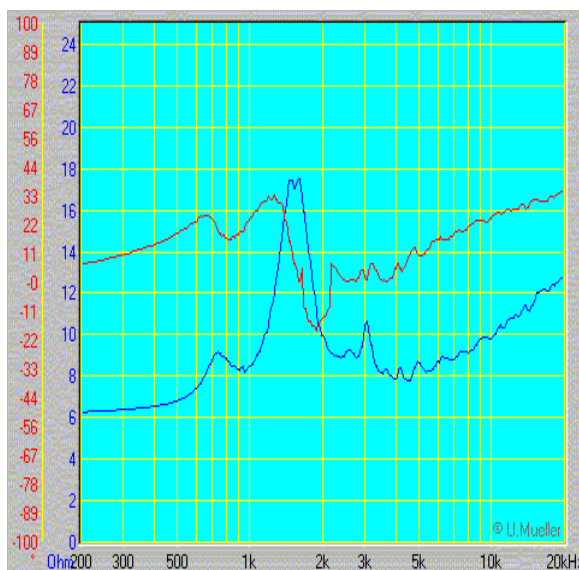
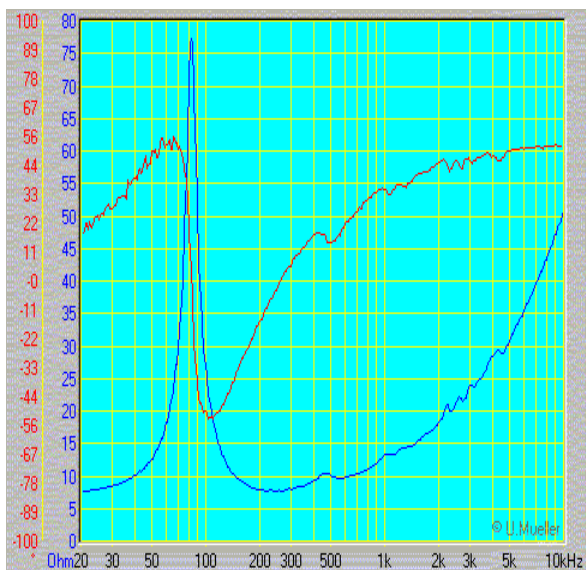
A titre d'exemple, il est ici détaillé le calcul du filtre passif d'une enceinte deux voies constituée du 38cm Beyma 15MI100 et de la compression 1" B&C DE250 associée au pavillon RCF H100.

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 (Figure 1).

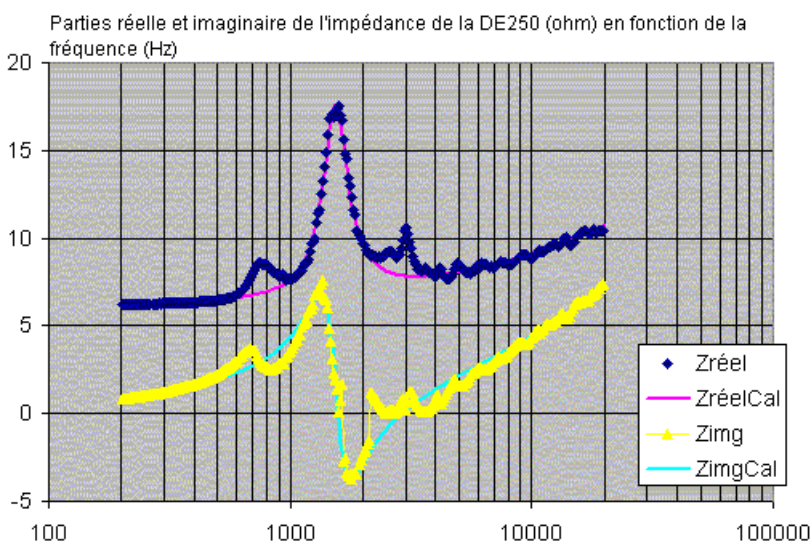
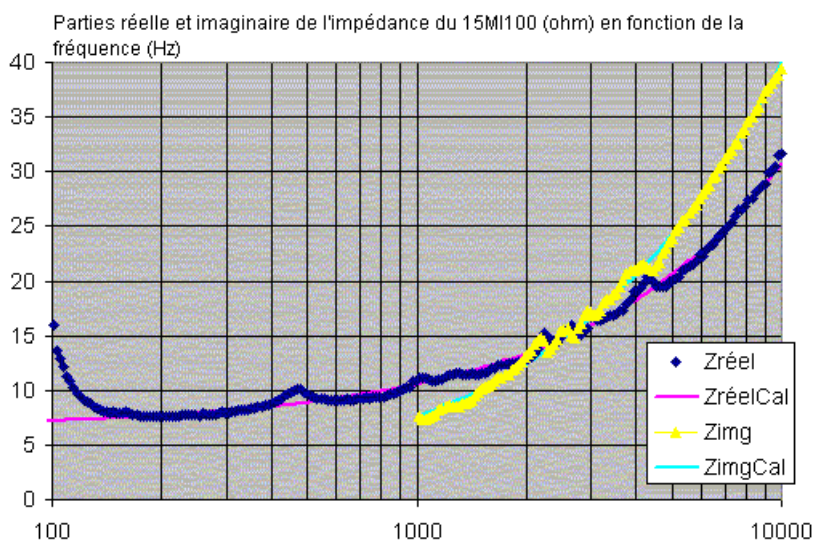
On notera une sensibilité plus élevée de 8dB de la compression.



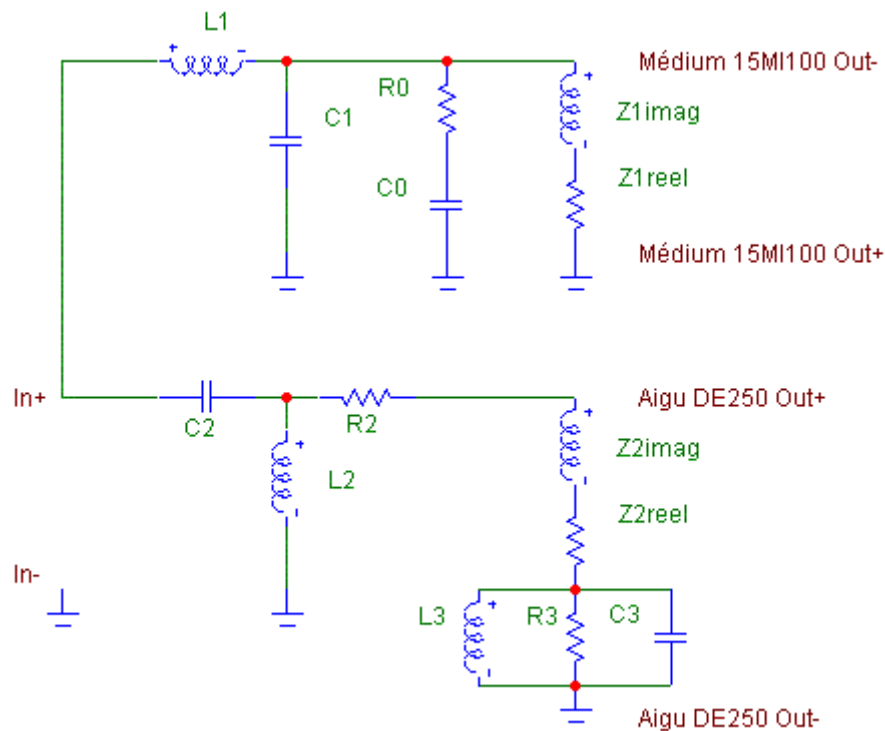
La deuxième étape consiste à mesurer, avec Audiotester, le module et la phase des impédances complexes (figures 2a pour le 15MI100 et 2b pour la DE250).



Il est ensuite calculé avec Excel les parties réelles et imaginaires des impédances (figures 3a pour le 15MI100 et 3b pour la DE250).



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, L3, C3, R3 pour la DE250) est le suivant (Figure 4) :



Les paramètres issus de la modélisation des impédances (RE, Krm, Erm, Kxm, Exm, L3, C3 et R3) sont :

Modèle impédance médium 15MI100 en fonction de la fréquence f (Hz) :

$$Z1reel = RE + K_{rm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{rm}} \text{ avec } RE=6,56 \text{ K}_{rm}=0,00410 \text{ E}_{rm}=0,786$$

$$Z1img = K_{xm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{xm}} \text{ avec } K_{xm}=11,2 \text{ E}_{xm}=0,743$$

Modèle impédance aigu DE250 en fonction de la fréquence f (Hz) :

$$Z2reel = RE + K_{rm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{rm}} \text{ avec } RE=5,76 \text{ K}_{rm}=0,00467 \text{ E}_{rm}=0,794$$

$$Z2img = K_{xm} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{E_{xm}} \text{ avec } K_{xm}=0,00591 \text{ E}_{xm}=0,608$$

$$\text{Résonance } 1560 \text{ Hz} \quad L3=0,324\text{m} \quad R3=10,8 \quad C3=32,3\mu$$

Les impédances ainsi calculées ont été reportées dans les figures 3a et 3b de la page précédente.

Une fois le comportement des transducteurs modélisé, les fonctions de transfert du passe-bas et du passe-haut ont été calculées avec le logiciel Maple (figures 5a pour le passe-bas du 15MI100 et 5b pour le passe-haut de la DE250).

```
> 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);
```

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

```
> restart;
```

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

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

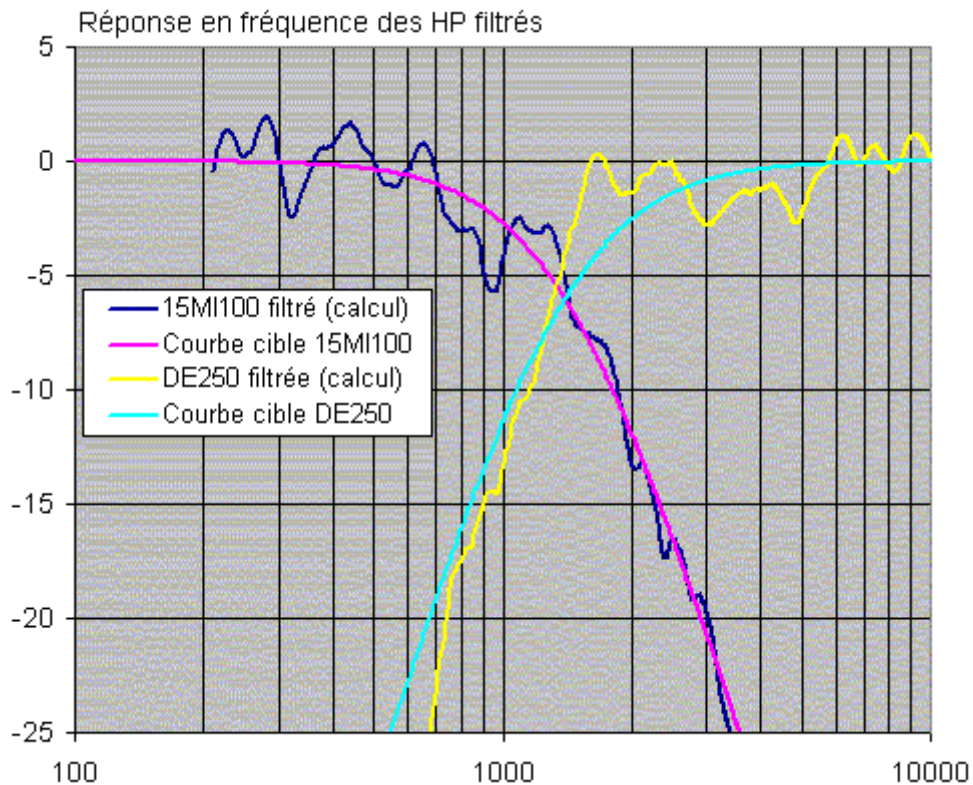
```
> Za:=1/(1/(I*L2*omega)+1/(R2+Zout));
```

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

```
> 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 figure 6a compare les courbes de réponses cibles (Linkwitz-like d'ordre 3 à 1400Hz) et les réponses calculées des haut-parleurs filtrés.



La fonction Solveur d'Excel a été utilisée afin de minimiser l'écart entre réponse cible et réponse calculée 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 :

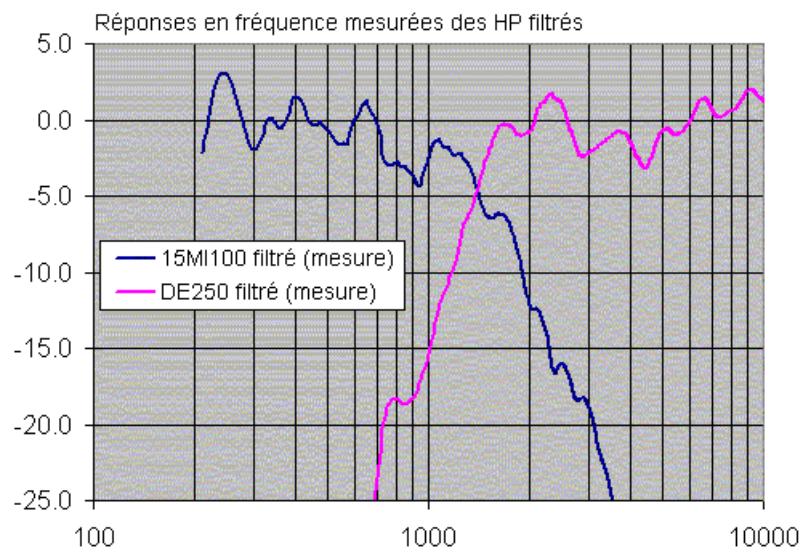
$$L1 = 1,9\text{mH} \quad C1 = 15\mu\text{F} \quad R0 = 22\text{ohm} \quad C0 = 42\mu\text{F}$$

Et pour le filtre calculé de la DE250 :

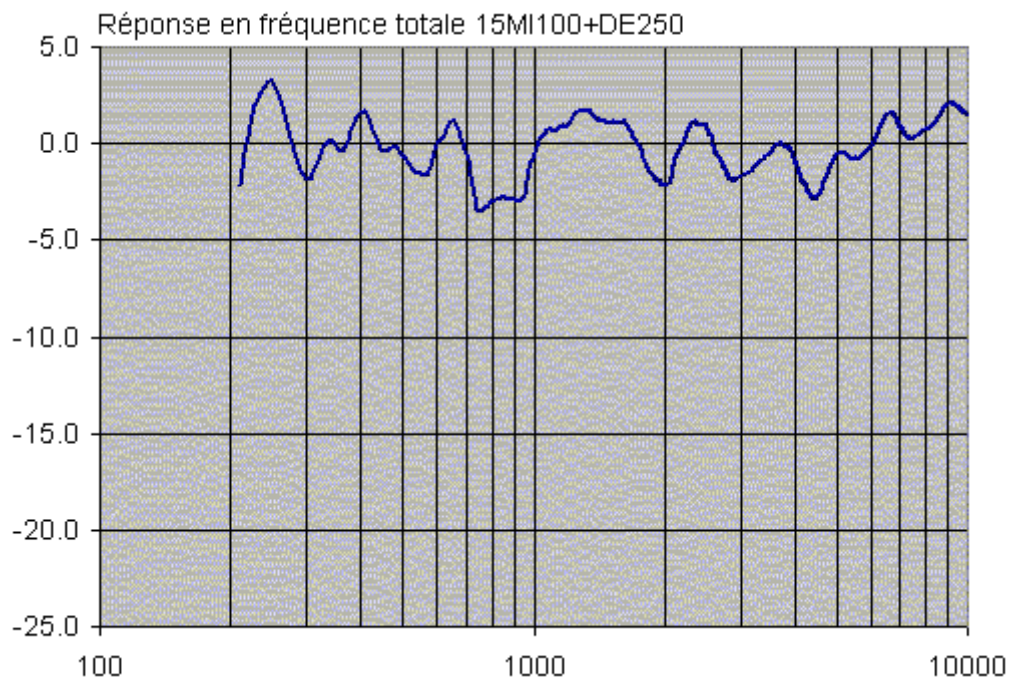
$$C2 = 2,3\mu\text{F} \quad L2 = 2,9\text{mH} \quad R2 = 9,6\text{ohm}$$

On notera le décalage des fréquences de coupure : 950Hz pour le 15MI100 ($L1=1,9\text{mH}$ $C1=15\mu\text{F}$) et 1,9kHz pour la DE250 ($C2=2,3\mu\text{F}$ et $L2=2,9\text{mH}$).

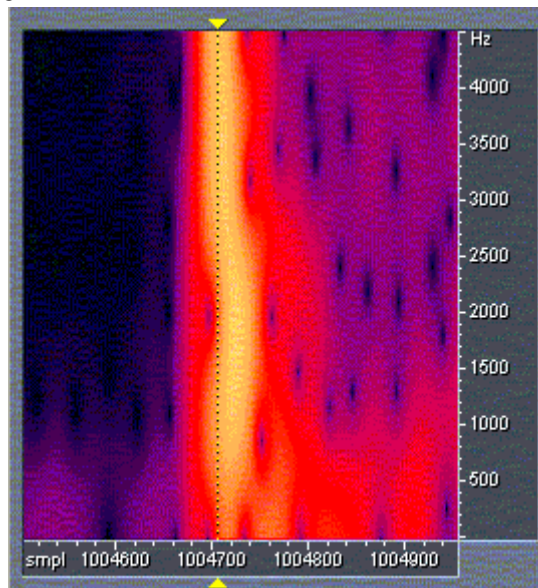
La figure 6b montre des courbes de réponse en fréquence mesurées des HP filtrés en bon accord avec les courbes attendues.



La figure 7a représente la réponse en fréquence globale de l'ensemble 15MI100+DE250+H100+filtres. On notera une bonne régularité de l'ensemble.

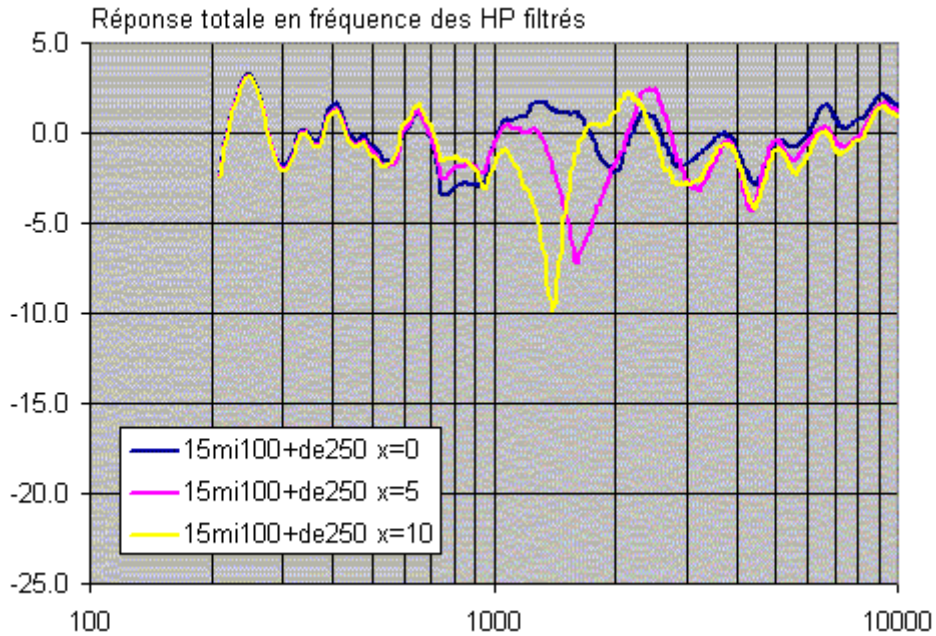


La figure 7b est la vue spectrale de l'impulsion globale qui montre un bon raccord entre les deux HP. Le retard amené par le filtre passe-bas est ici partiellement compensé par le recul apporté par le pavillon H100.

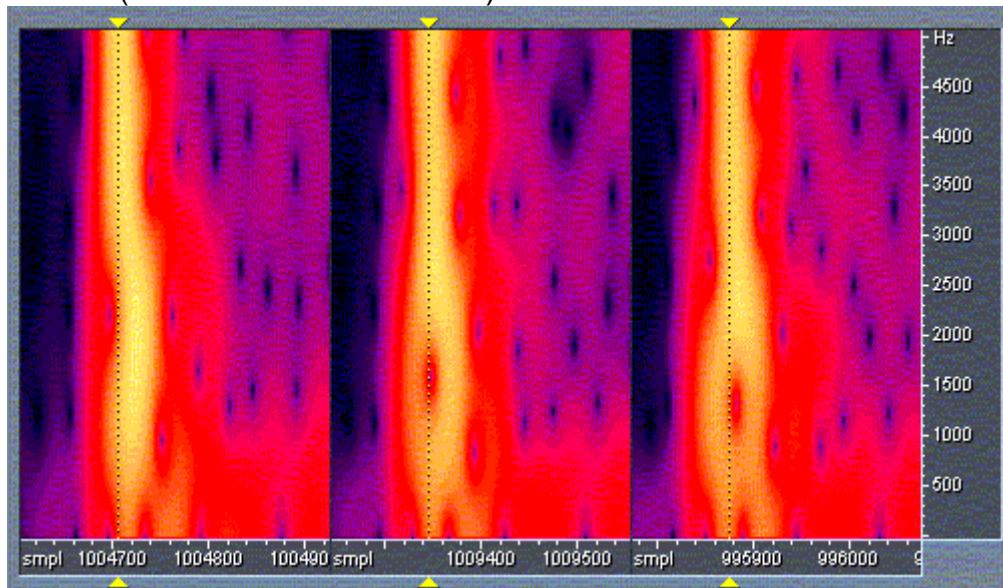


Afin d'affiner l'alignement temporel, il a été étudié l'effet d'un décalage supplémentaire du H100 par rapport au 15MI100.

La figure 8a montre les courbes de réponse en fréquence pour différents décalages du H100.



La figure 8b montre les vues spectrales des réponses impulsionnelles pour différents décalage du H100 (x=0cm x=5cm et x=10cm)



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

Dans le cas étudié ici, il ne faut donc pas chercher à aligner les sommets des impulsions.