

# Comment ça marche ?

## Les circuits réactifs (17)

### Filtres complexes

Par le radio-club F6KRR

*Après les filtres gaussiens nous allons poursuivre avec les filtres complexes dont la fonction de transfert est issue de polynômes mathématiques particuliers.*

#### En quête du filtre idéal.

Avec les filtres gaussiens, on ne peut guère descendre en dessous d'un facteur de forme de 4 sans pertes excessives (grand nombre de pôles). Par contre, ils sont faciles à régler et ils ont une phase linéaire dans la bande passante. Nous avons vu que l'on pouvait améliorer le facteur de forme avec des combinaisons de circuits couplés. Le calcul et le réglage de ces filtres deviennent vite "imbuvables". Des mathématiciens ont développé des polynômes particuliers qui permettent d'obtenir les fonctions de transfert nécessaires pour obtenir certaines réponses. Ci-dessous une liste des types de filtres les plus utilisés avec leurs principales qualités :

- 1 - Réponse linéaire en phase sur toute la bande : filtres de **Bessel**.
- 2 - Réponse linéaire en phase dans la bande passante seulement : les filtres **gaussiens** que nous avons vus (réponse naturelle des circuits oscillants).
- 3 - Réponses (quasi) linéaires en phase et en amplitude dans la bande passante : filtres de **Butterworth**.
- 4 - Amélioration du facteur de forme en tolérant une certaine ondulation dans la bande passante : filtres de **Tchebychev**.
- 5 - Amélioration supplémentaire du facteur de forme en ajoutant des zéros dans la fonction de transfert : filtres **elliptiques** ou de **Cauer**.

#### Filtres de Bessel

Ils ne sont employés que lorsqu'on a un besoin impératif de linéarité de phase comme dans certains filtres destinés aux radars. En contre partie ils ont le plus faible facteur de forme. Ils sont cités pour mémoire.

#### Filtres gaussiens

Les filtres gaussiens sont actuellement principalement utilisés dans les transmissions numériques à cause de leur bonne linéarité de phase. Nous avons déjà vu les réponses que l'on pouvait en espérer selon l'ordre du filtre et nous n'y reviendrons pas.

## Filtres à réponse de Butterworth

Ce sont les filtres les plus employés dès que l'on veut obtenir une réponse à amplitude constante dans une grande partie de la bande passante. Nous avons sur la figure 1 les réponses dans la bande passante et hors bande selon l'ordre du filtre prototype <sup>(1)</sup>.

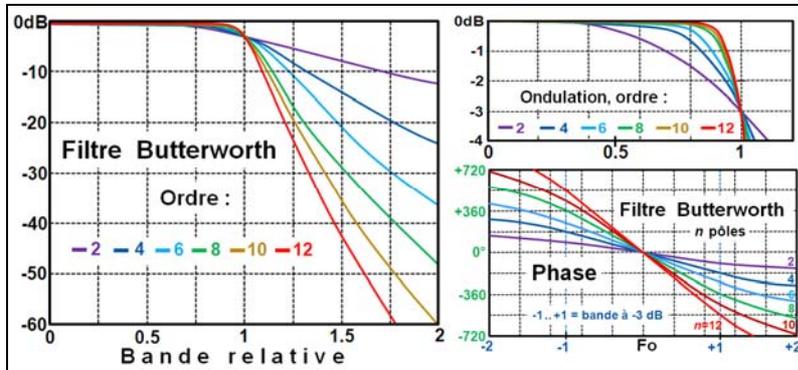


Figure 1.

Noter qu'un filtre passe-bande (ou un filtre coupe-bande) à  $n$  pôles correspond à un ordre  $n$  du filtre prototype car c'est la combinaison de deux filtres prototypes, l'un passe-bas, et l'autre passe-haut (qui est obtenu en inversant la réponse du filtre passe-bas, en gardant la même fréquence de coupure).

## Filtres à réponse de Tchebychev

On emploie ces filtres quand on n'est pas trop exigeant sur la linéarité de l'amplitude et de la phase dans la bande passante. Ils permettent pour un même facteur de forme de réaliser le filtre avec moins de pôles que pour le Butterworth, donc (en principe) moins de pertes. Voir sur la figure 2 un exemple de filtre Tchebychev avec trois ondulations différentes (filtre prototype du 6<sup>ème</sup> ordre et filtre passe-bande 6 pôles).

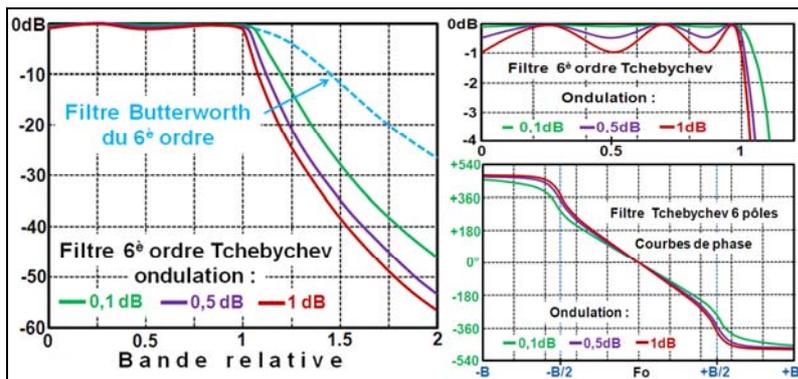


Figure 2.

Noter que la bande relative se réfère à la fréquence de transition et non plus à la fréquence de coupure à -3 dB (voir annexe 1).

Nous pouvons voir sur la figure 2 qu'avec une ondulation de seulement 0,1 dB, pour le même ordre, il y a une nette amélioration du facteur de forme du "Tchebychev" par rapport au "Butterworth". Mais cela se paie par une ondulation de phase dans la bande passante. Par ailleurs la réalisation pratique demande un Q à vide des composants bien plus élevé (ici, on suppose qu'ils sont infinis).

## Filtres à réponse de Causer (filtres elliptiques)

Jusqu'ici, les filtres que nous avons vus ont des zéros situés soit à  $F=0$ , soit à  $F=\infty$ , soit aux deux. On peut améliorer le facteur de forme en introduisant des zéros proches de la fréquence de transition et nous obtenons un filtre Elliptique ou à réponse de Causer. Il n'y a plus alors de relation fixe entre l'ordre du filtre et le nombre de pôles. Par ailleurs l'atténuation hors bande ne croît infiniment qu'après le dernier zéro et elle diminue aux fréquences intermédiaires (remontées), comme on peut le voir sur la figure 3. Le niveau de ces remontées constitue un paramètre nouveau : l'atténuation minimum hors bande.

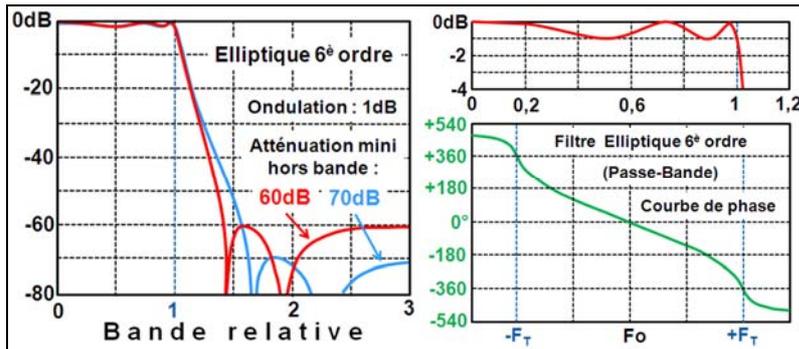


Figure 3.

On constate sur la fig. 3 qu'une augmentation de l'atténuation minimum hors bande entraîne une dégradation du facteur de forme. Mais ceci est à relativiser car en pratique le Q fini des composants ne permet pas toujours d'obtenir le facteur de forme théorique.

## Temps de propagation de groupe

Nous avons vu que le temps de propagation de groupe (retard apporté par le filtre pour une fréquence de travail  $F$  donnée) était égal à  $-(1/360) \times (\Delta\phi/\Delta F)$  ( $\phi$  en degrés). Nous avons sur la figure 4 les courbes du retard relatif en fonction des différents filtres du même ordre.

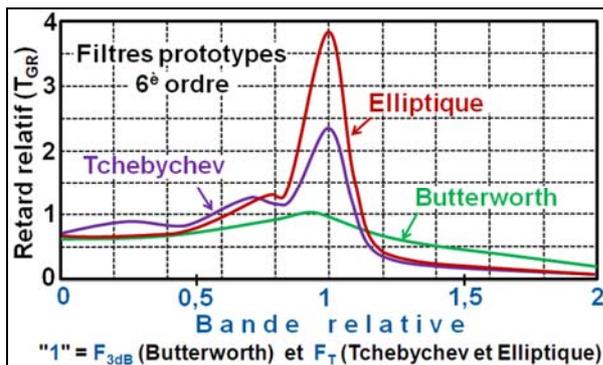


Figure 4.

Nous constatons que pour une fréquence proche de la fréquence de transition, les retards selon le type de filtre varient dans un rapport de un à quatre. Cela signifie par exemple que pour une modulation numérique, le débit en bauds pourra être quatre fois plus important avec le filtre de Butterworth qu'avec le filtre Elliptique (mêmes bandes passantes).

Notre inventaire des types de filtres est loin d'être exhaustif, mais il est suffisant pour résoudre la plupart des cas rencontrés par l'électronicien. Dans le prochain "Comment ça marche" nous verrons un exemple d'application avec les filtres à quartz en échelle.

## **Annexe 1 : Fréquence de transition**

Considérons le filtre prototype. Comme nous l'avons vu sur la figure 1 du dernier "Comment ça marche", la fréquence de transition  $F_T$  est la frontière entre la bande passante pour une ondulation de  $A_{dB}$  et la bande de transition. Si l'ondulation n'est pas spécifiée, alors la fréquence de transition est égale à la fréquence de coupure  $F_C$  à -3 dB et correspond donc à une ondulation de 3 dB <sup>(2)</sup>. Si l'on spécifie une ondulation inférieure à 3 dB, la fréquence de transition sera à l'intérieur de la bande passante à -3dB.

Pour un filtre quelconque, le rapport entre  $F_T$  et  $F_C$  dépend de l'ondulation que l'on se donne et du nombre de pôles. Il est toujours inférieur à 1. Pour une même ondulation (<3dB), il se rapproche de 1 en allant du filtre gaussien au filtre de "Cauer" via le "Butterworth" et le "Tchebychev".

Sur la figure 1 (filtre de Butterworth), nous voyons bien la fréquence de transition à -1 dB se rapprocher de la fréquence de coupure quand on augmente l'ordre du filtre.

Sur la figure 2 (filtre de Tchebychev), nous voyons bien la fréquence de coupure à -3dB se rapprocher de la fréquence de transition pour  $n_{dB}$  d'ondulation quand  $n$  augmente (la bande relative se rapporte ici à la fréquence de transition alors que pour la figure 1, elle se rapporte à la fréquence de coupure à -3dB).

## **Annexe 2 : Conception des filtres.**

Avant l'avènement des calculateurs et des ordinateurs, il n'était pas évident de calculer son filtre à partir des polynômes adéquats. On utilisait pour passer au schéma final des tableaux de coefficients et de courbes de réponses correspondant au filtre prototype avec des formules adaptées aux architectures. Comme il y a une grande quantité de paramètres, l'ensemble des tableaux et des courbes constituait une véritable "bible". Ensuite on construisait une maquette du filtre avec possibilités d'ajustements puis on "bidouillait" le filtre pour obtenir la réponse désirée. Il suffisait alors de mesurer la valeur des composants pour, en principe, pouvoir reproduire industriellement le filtre. Maintenant, on utilise des programmes de calcul sur ordinateur. Puis, en tenant compte de la qualité des composants que l'on sait obtenir, on construit le filtre dans un simulateur de circuits (comme P-Spice) et on "bidouille" sur le simulateur. Après on construit un prototype pour vérifier que l'on n'a pas fait d'erreurs et on met en fabrication. On peut même se passer du prototype si l'on est sûr de faire "bon du premier coup" (c'est en général ce que demande le chef de projet).

**La Rubrique "Comment ça marche ?" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@ref-union.org".**

### **Notes.**

- 1) *Rappel : l'ordre est déterminé par le nombre de composants réactifs. Donc un circuit oscillant est du deuxième ordre.*
- 2) *Si la fréquence de coupure est spécifiée à -6 dB, l'ondulation est alors de 6 dB.*