

Comment ça marche ?

Les circuits réactifs (18)

Filtres à quartz en échelle

Par le radio-club F6KRK

Après les généralités sur les filtres complexes les plus utilisés, nous allons voir deux applications avec des filtres à quartz en échelle. La particularité de ces filtres est de comporter des quartz strictement identiques.

Filtres à quartz en échelle

Parmi une quantité d'architectures, on s'intéressera d'abord au filtre à réponse de Butterworth, le plus facile à réaliser pour un radioamateur. Les quartz étant des résonateurs série avec des réactances très élevées, on utilisera une structure en pi (couplage capacitif en pied). Voir sur la figure 4 le schéma électrique équivalent d'un résonateur à quartz.

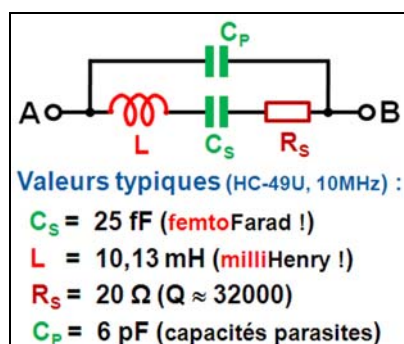


Figure 1

C_s , L et R_s sont des valeurs électriques dynamiques équivalentes. Noter la valeur extrêmement faible de la capacité série C_s qui a ainsi une grande réactance, ce qui, avec une faible résistance série, procure un Q à vide très élevé (>25000 , pouvant atteindre 500 000). C_p est la capacité statique entraînée par la métallisation des connections et la mise en boîtier. Cette capacité va provoquer une résonance parallèle très proche de la résonance série (car $C_p \gg C_s$) et perturber la réponse du quartz utilisé en filtrage (détails en annexe 1).

Filtre à réponse de Butterworth

Considérons la figure 2 qui représente un filtre 4 pôles composé de quatre quartz du type de la figure 1 avec les réponses en fréquence et en phase ainsi qu'une méthode de calcul à partir des paramètres des quartz et un tableau de coefficients dépendant du nombre de pôles.

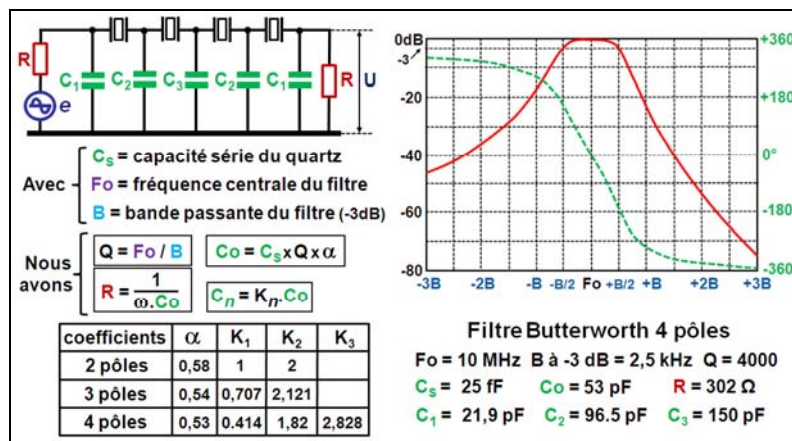


Figure 2

Dans la formule qui permet de calculer C_0 , le coefficient α varie un peu en fonction du nombre de pôles. Ce coefficient dépend principalement du type de filtre (ici "Butterworth") et en moindre mesure de la capacité statique C_P et du Q à vide du quartz (X_L/R_S). Les Q des quartz ont d'autant plus d'influence que le nombre de pôles est élevé et que leur rapport avec le Q du filtre est faible. Les coefficients correspondent ici au quartz de la fig. 1. La variation de α est surtout due à la capacité statique C_P qui a d'autant plus d'influence que le nombre de pôles est faible. Noter que l'on a impérativement besoin de la valeur de la capacité série dynamique qui est en général inconnue avec des quartz de récupération. Nous verrons dans le prochain "Comment ça marche" une méthodologie pour caractériser les paramètres d'un quartz inconnu.

Réalisation du filtre : A partir de F_0 , de B et de C_s , on calcule C_0 et R (résistance de source et de charge) ainsi que les C_n à partir des coefficients K ⁽¹⁾. Ensuite on effectue le câblage et un premier contrôle. Si la bande passante mesurée (B_m) n'est pas correcte, on multiplie α par le rapport $\{B/B_m\}$. Puis on réitère le processus.

L'examen de la courbe de réponse en amplitude montre une dissymétrie pour les fréquences supérieures. Cela résulte des résonances parallèles (dus à C_p) qui amènent ici un nul à 10,022 MHz ⁽²⁾. Dans le cas d'un filtre BLU, on peut mettre cela à profit pour diminuer le résidu de l'OL de transposition en HF (appelé à tort "porteuse") en utilisant le filtre en BLU inf ⁽³⁾. Noter la variation rapide de la phase dans la bande ce qui indique un temps de propagation de groupe élevé (retard important). Mais comme elle est relativement linéaire, le retard est sensiblement constant.

Important : Nous avons vu que les capacités de couplage ont pour effet de modifier la fréquence de résonance des circuits oscillants. Quand nous avons des résonateurs série comme ici, l'effet est d'augmenter F_0 qui passe dans notre exemple de 10,001 MHz à 10,003 MHz.

Filtre à réponse de Tchebychev

Nous prendrons comme exemple un filtre BLU 8 pôles avec une bande passante de 2,5 kHz et une ondulation de 1 dB dans la bande. La figure 3 montre les réponses en fréquence et en phase de ce filtre composé de huit quartz du type de la figure 1, mais avec un Q de 128000. Elle décrit également une méthode de calcul à partir des paramètres des quartz et d'une table de coefficients dépendant du nombre de pôles.

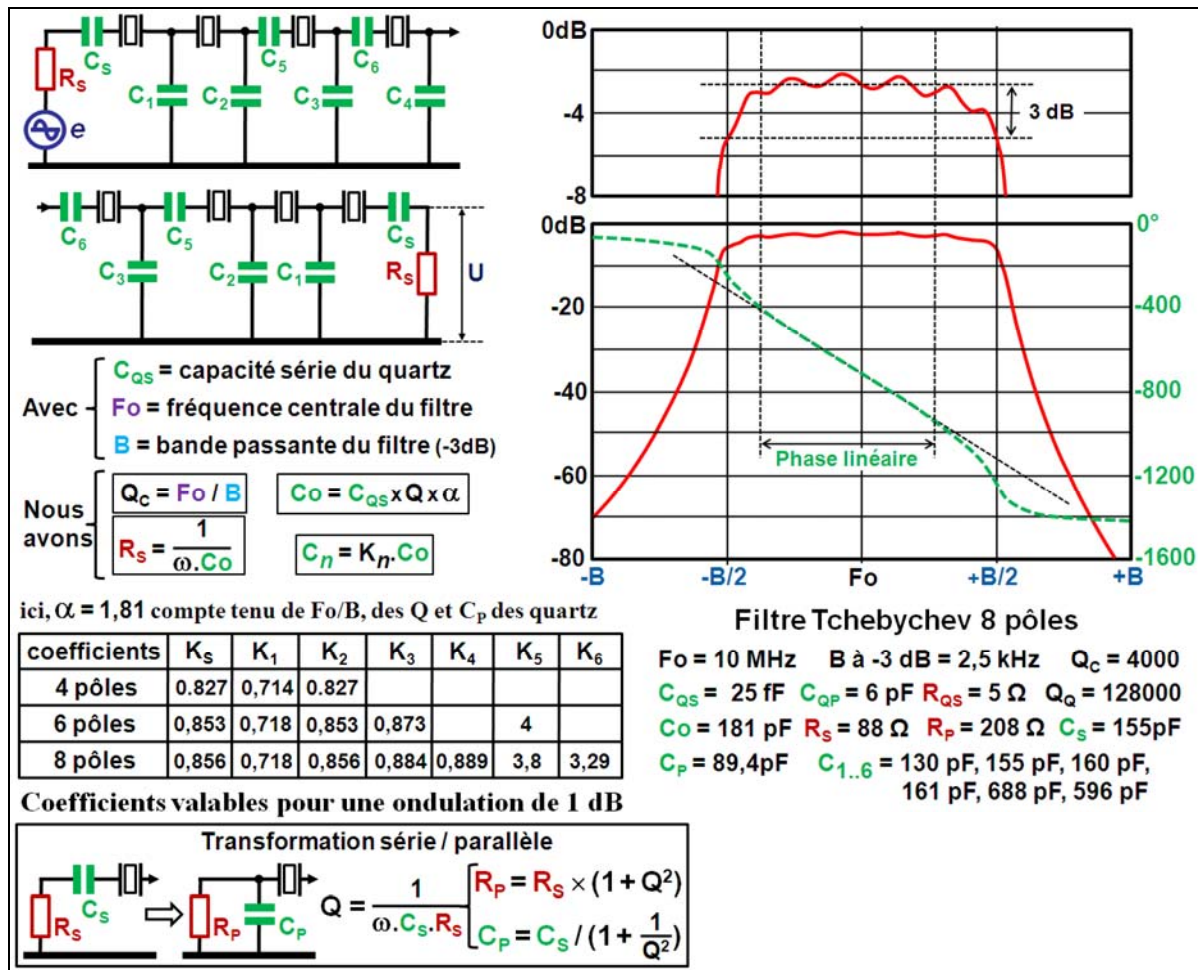


Figure 3.

Noter qu'ici les coefficients sont relatifs à l'impédance (capacités d'adaptation en série avec la charge). Si l'on veut les capacités en parallèle avec la charge, ce qui permet d'y intégrer les capacités parasites, il est nécessaire de faire une transformation série / parallèle à l'aide des formules de la figure 3. C'est ce qui a été fait pour le filtre donné en exemple. Cette transformation peut être faite indifféremment d'un seul côté ou des deux côtés du filtre.

Ici, le coefficient α est égal à **1,81** pour une ondulation de 1 dB. Avec un Q naturel des quartz de 256000 au lieu de 128000, α passe à **1,75**. Cela montre l'influence du Q à vide pour de faibles largeurs de bande à des fréquences élevées. De telles qualités de Q ne se rencontrent qu'avec des quartz fabriqués spécialement pour le filtrage. Avec des quartz standards pour oscillateurs, le facteur de forme espéré pour un filtre Tchebychev 8 pôles ne peut être obtenu pour des rapports F_0/B élevés. On constate alors qu'on ne l'améliore quasiment plus au-delà d'un certain nombre de pôles ⁽⁴⁾.

On remarquera que non seulement la variation de phase est rapide, donc un temps de propagation de groupe important, mais qu'elle n'est linéaire que dans une portion centrale de la bande passante avec une augmentation importante du retard vers les extrémités. Si cela n'a pas d'importance pour un filtre BLU, cela oblige dans le cas d'une modulation numérique à avoir un faible débit en bauds, ce qui complique le procédé (nFSK ou OFDM des modems parallèles) ⁽⁵⁾.

Dans le prochain "Comment ça marche", nous poursuivrons avec la description de méthodes pour la caractérisation des résonateurs à quartz et la réalisation des filtres à quartz en échelle.

Annexe 1 : Circuit parallèle et circuit série

Physiquement, il n'y a qu'un seul circuit oscillant. Il s'agit de la mise en boucle d'un condensateur et d'une bobine, d'en injecter de l'énergie et de l'extraire (moins les pertes). La différence réside dans la façon d'insérer le C.O. dans un montage. Si on lit la tension U_P aux bornes du circuit, on a affaire à un circuit parallèle. Si on lit le courant qui traverse le circuit ($U_S = R_c \times i$), on a affaire à un circuit série. Exemple sur la figure 4.

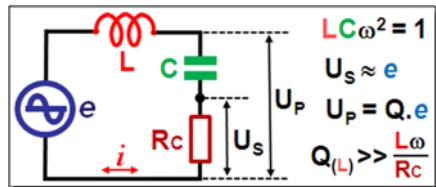


Figure 4

En reprenant le schéma du circuit équivalent du quartz (figure 1), nous voyons qu'il a deux comportements :

- celui d'un circuit série composé de L et de C_s . La capacité C_p n'a alors aucune action, ayant une réactance très grande devant R_s .
- celui d'un circuit parallèle composé de L et C' . Cette dernière est égale à $(C_s \times C_p) / (C_s + C_p)$, donc inférieure à C_s . Comme $C_p \gg C_s$, la résonance parallèle se fera à une fréquence **légèrement supérieure** à la résonance série (dans un rapport égal à la racine carrée du rapport entre C_s et C'). Ici, avec $C_s = 25 \text{ fF}$ et $C_p = 6 \text{ pF}$, si F_s est égale à 10 MHz , F_p est égale à $10,021 \text{ MHz}$.

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) Noter qu'ici ces coefficients concernent l'admittance (capacités d'adaptation en parallèle sur la charge).
- 2) Si l'on voulait absolument un filtre symétrique, il faudrait neutrodiner la capacité C_p des quartz en mettant en parallèle des inductances de mêmes réactances (inverses).
- 3) Faire la commutation BLU_{\pm} en effectuant un changement de fréquence en mode infradyne ou supradyne.
- 4) Plus le nombre de pôles est élevé et/ou plus l'ondulation tolérée est importante, et plus le Q à vide des quartz doit être élevé également (inversement à la largeur de bande). S'il est trop faible, les ondulations diminuent et la bande passante à -3dB aussi. On finit par avoir une réponse de Butterworth, voire gaussienne.
- 5) Ou alors à transmettre des séquences dites "d'égalisation" qui permettent de calculer la fonction de transfert du canal de propagation (dont le filtre fait partie) mais cela diminue le débit "utile" de la transmission. On en reparlera dans des prochains "Comment ça marche" consacrés aux modulations numériques et aux modems.