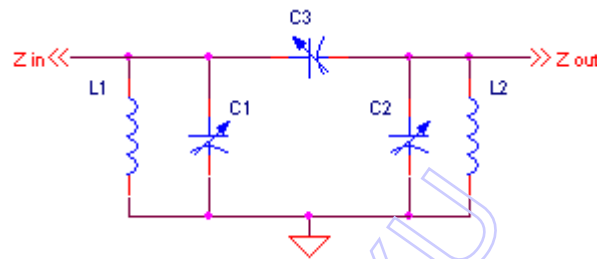


Filtre passe-bande à couplage capacitif

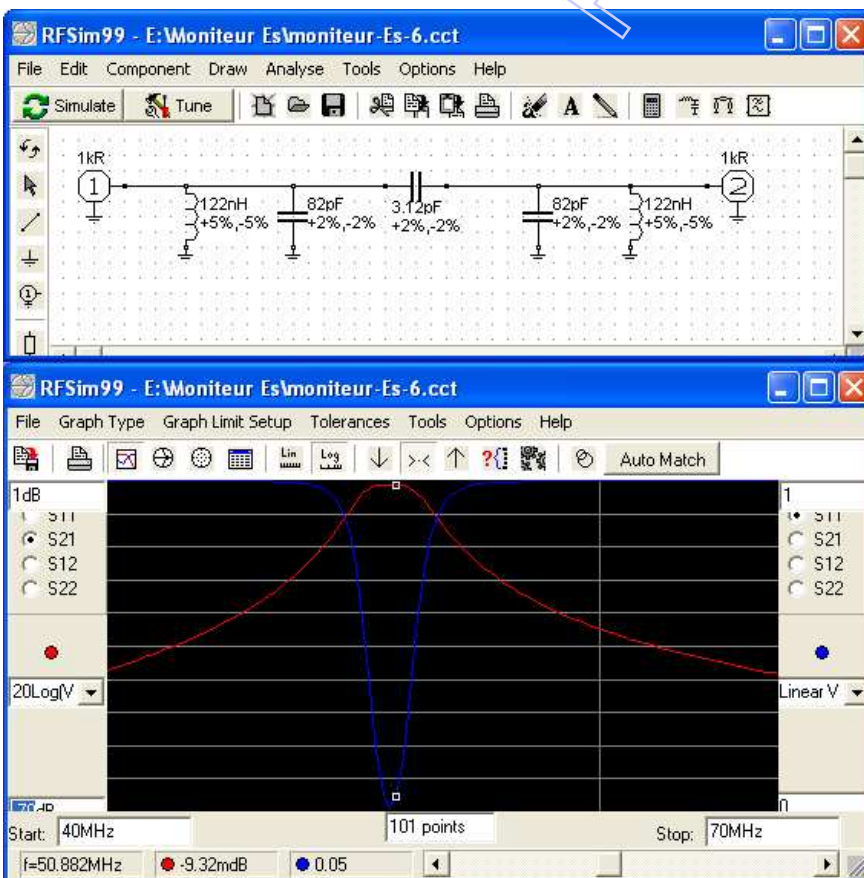
<http://pagesperso-orange.fr/F4DXU/>

Ce type de filtre passe-bande est très souvent utilisé comme filtre de bande dans les émetteurs-récepteurs du commerce ou de fabrication amateur. Dans sa version la plus simple il est constitué de deux circuits LC parallèles couplés par un condensateur. Sa bande passante, qui dans ce cas est fixée par la résonance de chacun des circuits LC et par leur couplage est donnée à -3 dB.



Modèle 1

L'image ci-dessous représente ce type de filtre à couplage capacitif. C1 et C2 permettent le réglage précis des accords et C3 le couplage entre les deux circuits LC parallèles. Le réglage du couplage conditionne la forme de sa réponse, sa fonction de transfert. (diagramme de Bode en rouge).



Les éléments du filtre se déterminent de la manière suivante car un nombre infini de couple LC peuvent donner la même résonance mais pas la bande passante et l'adaptation voulue :

$$L1 = L2 = \frac{Zi.(f_{\max} - f_{\min})}{2.\pi.f_{\min}.f_{\max}}$$

$$C1 = C2 = \frac{f_{\max} / f_{\min}}{2.\pi.Zi.(f_{\max} - f_{\min})}$$

$$C3 = \frac{f_{\min} + f_{\max}}{4.\pi.Zi.f_{\min}.f_{\max}} \text{ (Dixit F5AD)}$$

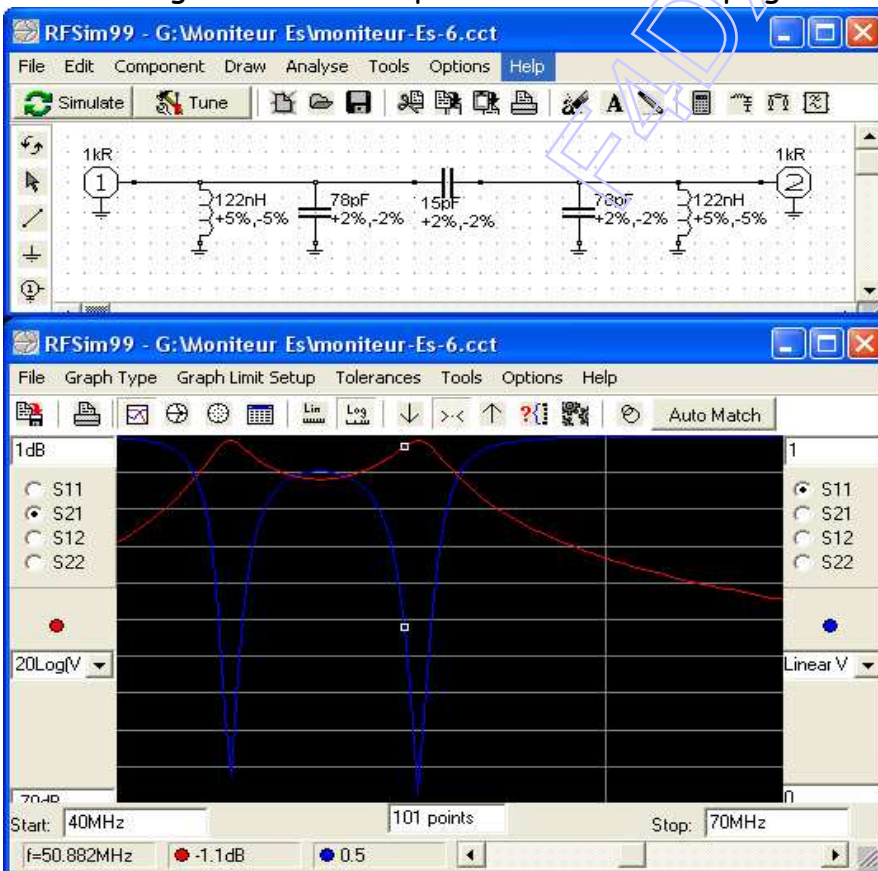
Avec f_{\min} et f_{\max} les fréquences limites de la bande passante du filtre et Zi l'impédance itérative ou caractéristique du circuit.

L'impédance itérative (Zi) vue à l'entrée (Zin) du quadripôle est l'impédance obtenue lorsque le

quadripôle est chargé (en Z_{out}) par cette même impédance. Cela signifie que pour toutes les fréquences comprises entre f_{min} et f_{max} , le quadripôle est transparent. Plusieurs cellules de même impédance itérative peuvent être chaînées sans que cette dernière ne change, d'où son nom. Le choix de cette impédance Z_i est important car si elle est mal déterminée, les valeurs théoriques des selfs et capacités seront valides alors que quasiment irréalisables dans la pratique. La valeur courante d'impédance caractéristique est 50Ω mais cette valeur est inadaptée et conduit à des valeurs de selfs très faibles et des valeurs de condensateurs très importantes.

L'image ci-dessus est une simulation du circuit effectuée avec RFSim99, pour une impédance itérative de 1000Ω , une fréquence centrale de 51 MHz et une bande passante de 2 MHz. Le calcul de l'impédance de C_3 à la fréquence centrale est : $Z_{C3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_3} = 1000\Omega$, c'est intéressant puisque que c'est aussi la valeur de l'impédance itérative. Ce qui semble normal puisque qu'à la résonance, les deux circuits LC (Q élevés) ont une impédance très élevée par rapport à Z_{C3} donc quasiment sans influence via à vis de Z_{C3} . Le résultat est très concluant mis à part un très léger décalage en fréquence du à l'arrondi du calcul des éléments. La courbe en rouge représente la fonction de transfert du filtre, c'est aussi le paramètre S_{21} . La courbe bleue représente le coefficient de réflexion qui est aussi le paramètre S_{11} à l'entrée gauche du filtre. On peut noter une très bonne adaptation d'impédance puisque que ce coefficient S_{11} prend une valeur proche de 0 dans la bande passante du filtre. C'est le couplage critique ou optimal, dans la bande passante, la réponse du filtre est plate et l'atténuation est très faible.

L'image ci-dessous représente un fort couplage ou couplage sur critique, la capacité de couplage C_3 (15 pF) a une valeur supérieure à celle du couplage critique. On notera un élargissement de la bande passante, les deux fréquences f_{min} et f_{max} s'écartent ce qui provoque une forte atténuation à la fréquence centrale ainsi qu'une très forte désadaptation, S_{11} tend vers 1. Dans ce cas les deux circuits LC s'influencent fortement. Le coefficient de couplage K et les deux pulsations valent :



couplage C_3 (15 pF) a une valeur supérieure à celle du couplage critique. On notera un élargissement de la bande passante, les deux fréquences f_{min} et f_{max} s'écartent ce qui provoque une forte atténuation à la fréquence centrale ainsi qu'une très forte désadaptation, S_{11} tend vers 1. Dans ce cas les deux circuits LC s'influencent fortement. Le coefficient de couplage K et les deux pulsations valent :

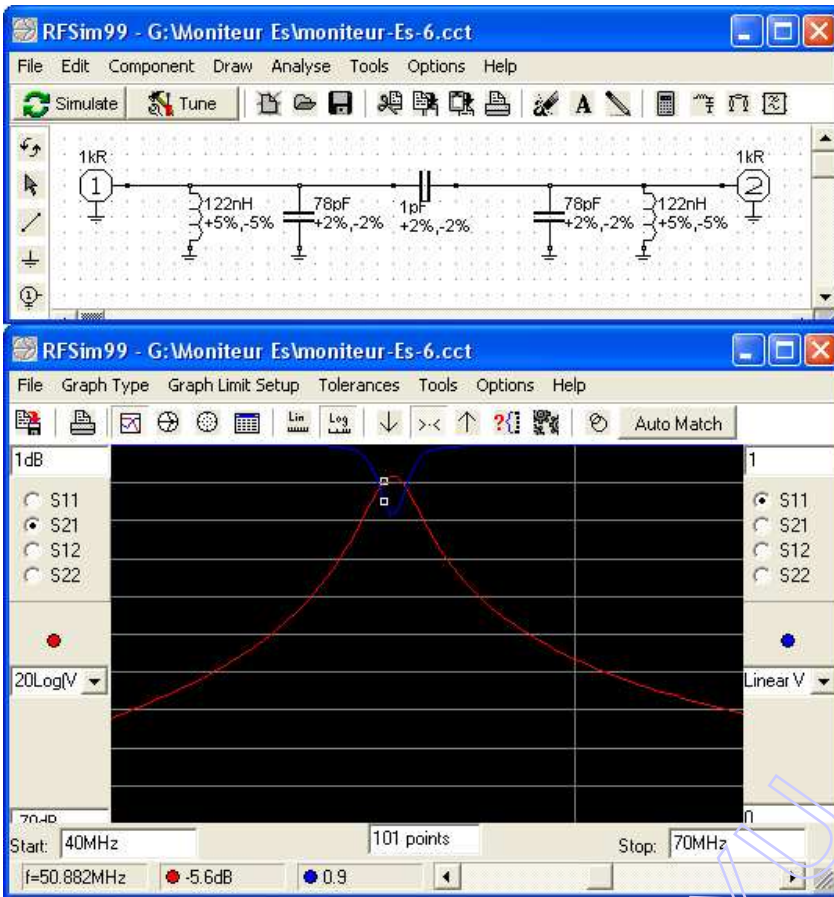
$$K = \frac{C_3}{\sqrt{(C_1 + C_3) + (C_2 + C_3)}}$$

$$\omega_{C1}^2 = \frac{1}{L \cdot (C_1 + C_3)}$$

$$\omega_{C2}^2 = \frac{1}{L \cdot (C_2 + C_3)}$$

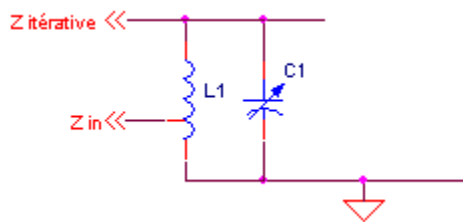
Ce type de couplage n'est à ma connaissance pas utilisé sauf peut-être si l'on souhaite favoriser deux fréquences pas très éloignées l'une de l'autre !

L'image ci-dessous représente un faible couplage ou couplage sous critique, la capacité de couplage C3 (1 pF) a une valeur inférieure à celle du couplage critique.



Les deux fréquences se rejoignent, la bande passante se rétrécit et une forte atténuation apparaît aussi. Ce type de couplage n'est pas optimum et n'est en général pas utilisé, l'atténuation ou perte d'insertion est aussi très forte et la réponse du filtre est loin d'être plate. Le coefficient de réflexion S11 a une valeur proche de 1, les impédances des ports d'entrée et de sortie sont très désadaptées.

Revenons au couplage critique, il a été simulé et calculé pour une impédance itérative de 1000Ω mais dans la majeure partie des cas c'est une impédance de 50Ω que l'on rencontre. Il est donc nécessaire de réaliser une adaptation d'impédance selon un procédé maintenant bien connu.



Le schéma ci-contre représente le circuit d'entrée du filtre où il a été pratiqué une prise intermédiaire sur la self L1. Le système est un abaisseur d'impédance qui transforme $Z_{itérative}$ en Z_{in} . Le rapport de transformation se calcule de la manière

$$\text{suivante : } N = \sqrt{\frac{Z_{in}}{Z_{itérative}}} = 0.22 . \text{ Le filtre étant symétrique,}$$

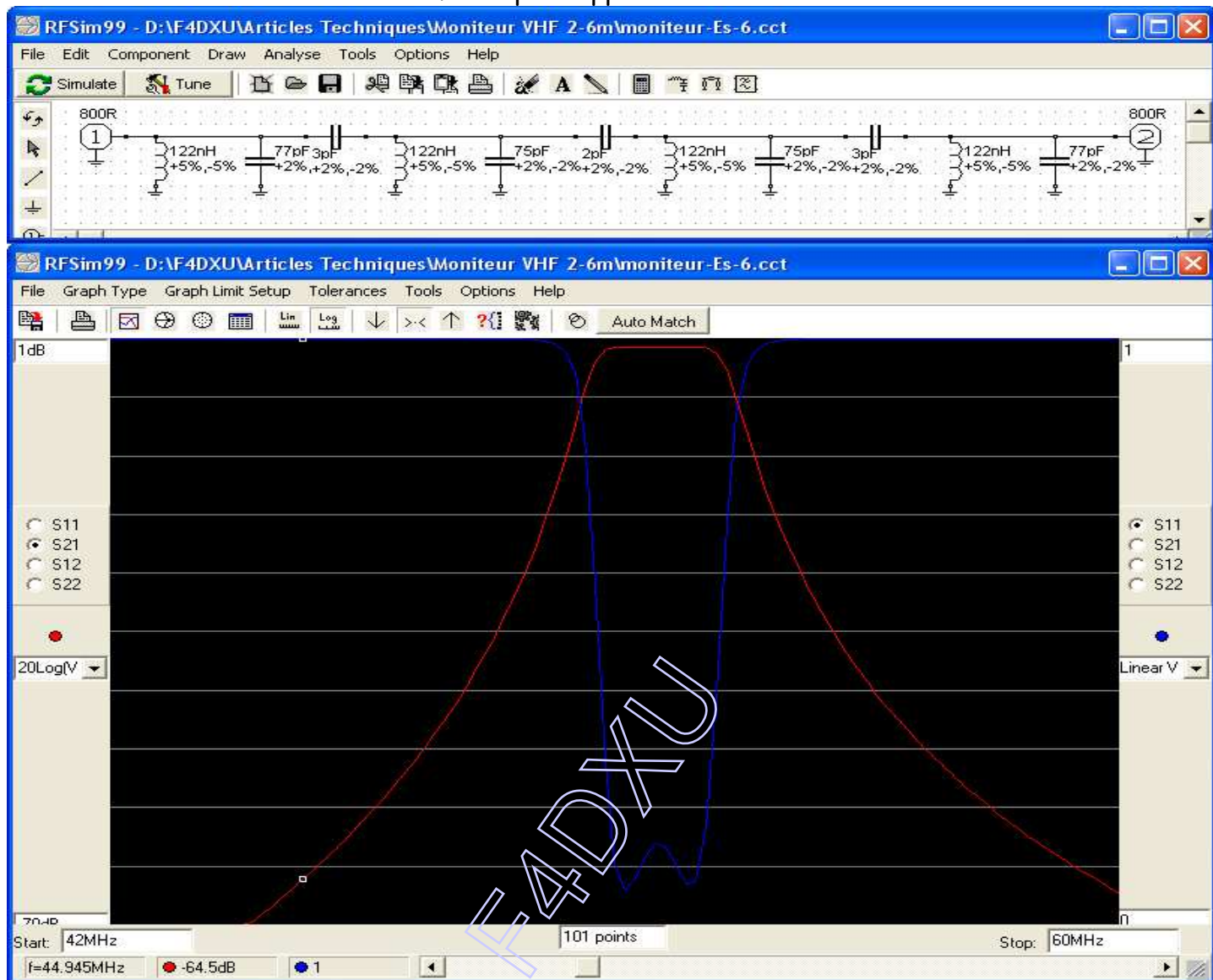
le même type d'adaptation est à réaliser du côté de Z_{out} . Avec 2 cellules LC l'atténuation est de l'ordre de 35 dB à 10% de f_{min} ce qui est déjà très honorable.

Il est toutes fois possible d'ajouter d'avantage de cellules LC pour augmenter encore l'atténuation hors de la bande passante du filtre. C'est ce qui est proposé sur le schéma ci-dessous. La simulation a été faite avec 4 cellules LC et trois condensateurs de couplage. On constate que l'atténuation à 10% de f_{min} passe à environ 65 dB, c'est mille fois plus que la valeur précédente de 35 dB. Le filtre est plus difficile à régler puisque qu'il y a quatre réseaux LC et trois couplages capacitifs. Le calcul des éléments du filtre peut être fait, avec une bonne approximation, en utilisant les mêmes formules que précédemment soit :

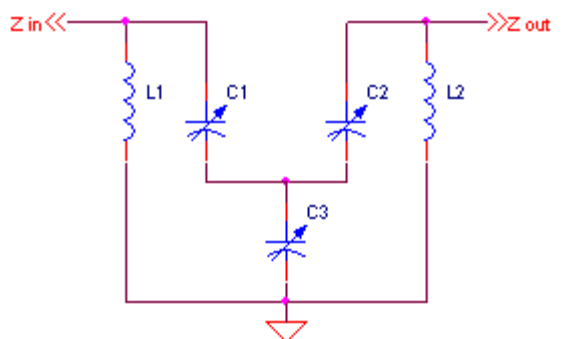
$$L = \frac{Z_i \cdot (f_{max} - f_{min})}{2 \cdot \pi \cdot f_{min} \cdot f_{max}} \quad C = \frac{f_{max} / f_{min}}{2 \cdot \pi \cdot Z_i \cdot (f_{max} - f_{min})} \quad C_{couplage} = \frac{f_{min} + f_{max}}{4 \cdot \pi \cdot Z_i \cdot f_{min} \cdot f_{max}} \text{ en notant tout de même que}$$

les accords ont légèrement changés ainsi que la valeur de l'impédance itérative. L'évolution de la

valeur des condensateurs de couplage va en diminution quand on regarde d'abord les condensateurs des extrémités du filtre par rapport à celui du centre.



Par une transformation triangle étoile des condensateurs d'accord et de couplage on obtient une deuxième forme du filtre passe bande à couplage capacitif (modèle 2).



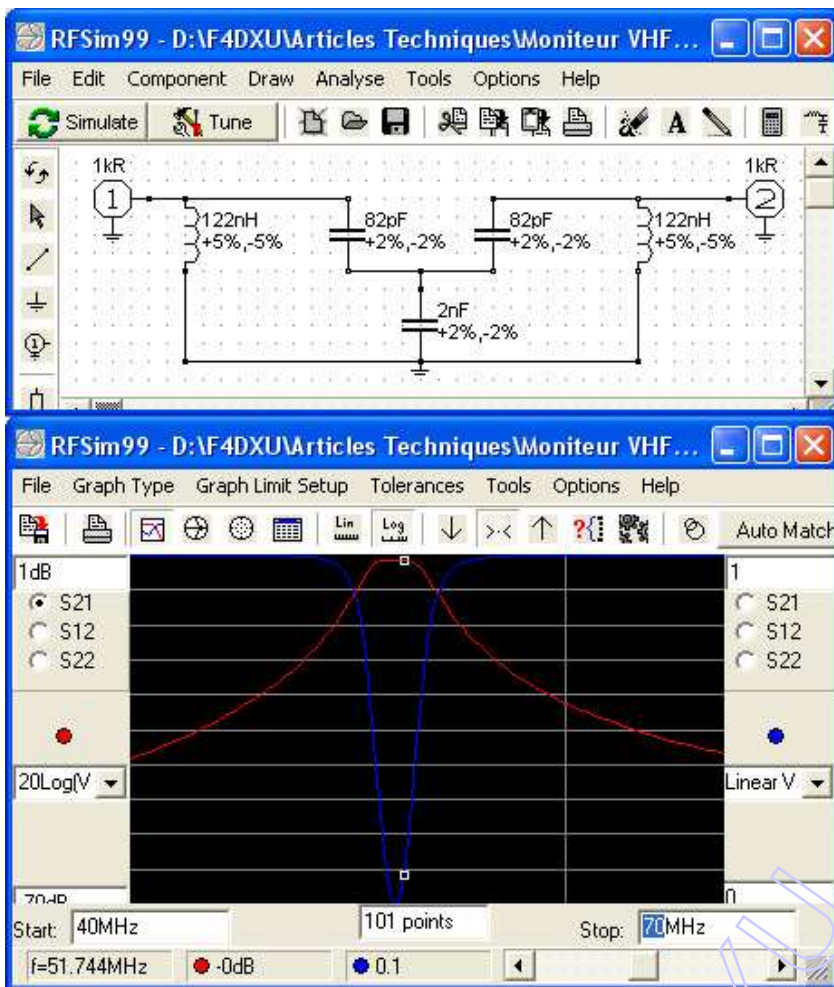
Dans ce cas le coefficient de couplage K et les deux pulsations, donnés à titre indicatif valent :

$$K = \sqrt{\frac{C1 \cdot C2}{(C1 + C3) + (C2 + C3)}} \quad \omega_{c1}^2 = \frac{1}{L \cdot \frac{C1 \cdot (C3 + C2)}{C1 + C2 + C3}} \quad \text{et}$$

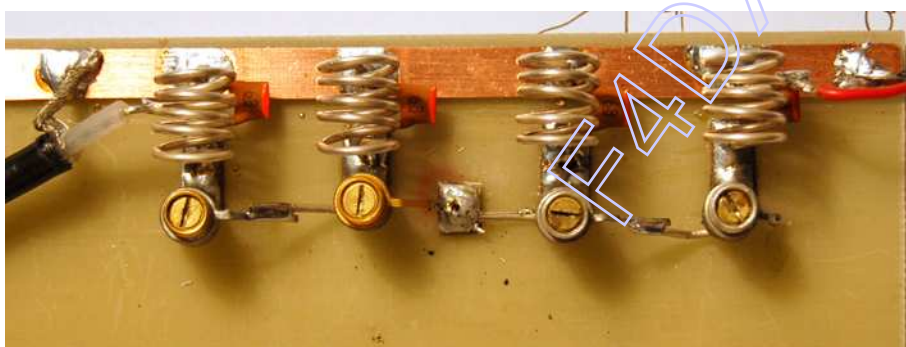
$$\omega_{c2}^2 = \frac{1}{L \cdot \frac{C2 \cdot (C3 + C1)}{C1 + C2 + C3}}$$

Model 2

Dans ce cas, le coefficient de couplage doit être identique (faible) au model 1 du début du document. On considère le diviseur capacitif constitué de C1 et C3, pour que la tension sur C3 soit faible (faible couplage) il faut que C3 ait une forte valeur. Le comportement du filtre est identique au modèle 1, même bande passante, même fréquence centrale ...

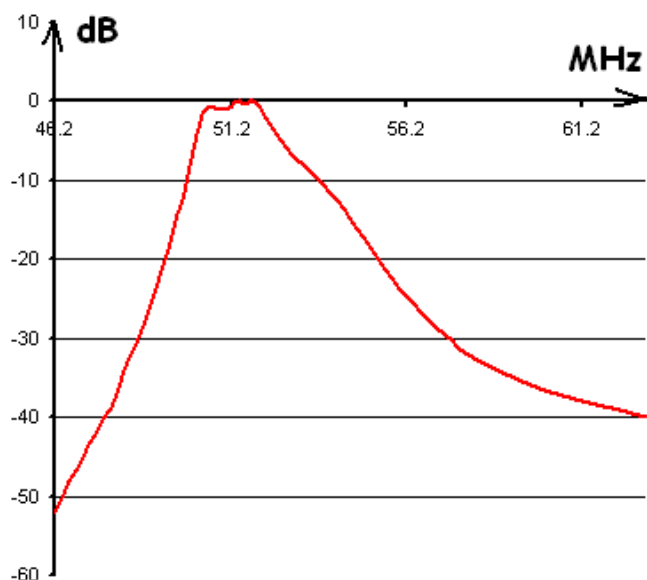


L'image ci-contre représente la simulation de ce filtre. Etant donné que ces types de filtre sont des passe-bande à couplage capacitif, il ne doit y avoir aucun couplage magnétique entre les selfs. C'est pour cette raison que toutes les cellules doivent être blindées individuellement. Dans le cas d'un faible couplage magnétique, la valeur des capacités de couplage doivent être revues à la baisse. Si l'on souhaite réaliser un couplage magnétique total, les capacités de couplage disparaissent mais alors le réglage est moins pratique.



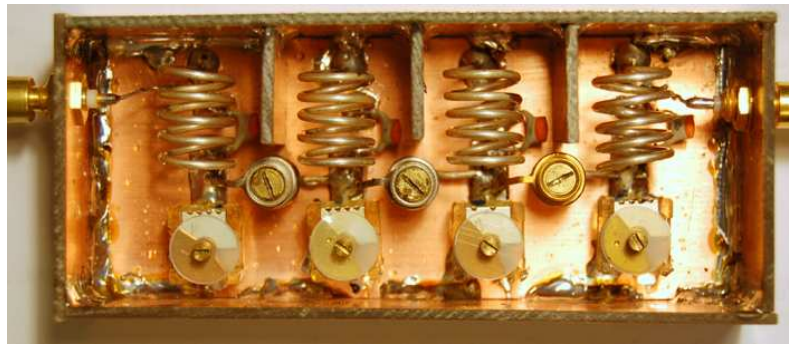
Voici sur la photo ci-contre un premier essai et exemple de réalisation du filtre passe bande à quatre cellules (la capacité à l'extrême droite n'est pas utilisée). Les capacités d'accord sont fixes et le réglage des différents pôles du filtre est

effectué en écartant plus ou moins les spires des selfs. Les différentes cellules LC ne sont pas blindées mais sont un peu éloignées les unes des autres pour minimiser le couplage magnétique.

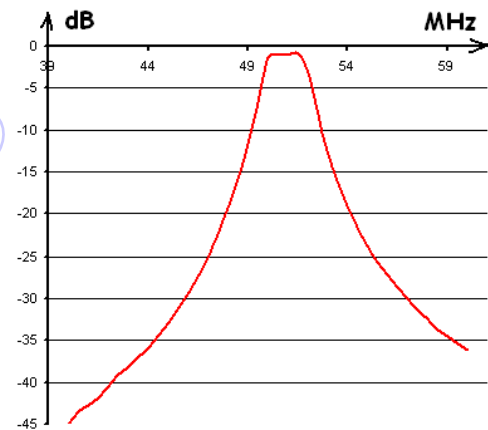
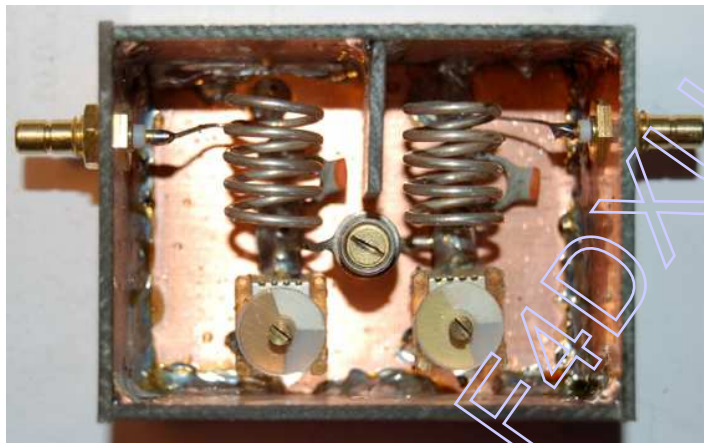


On constate sur la fonction de transfert (S21) ci-à gauche que les performances du filtre sont dégradées. Les pentes d'atténuation ne sont pas symétriques, l'atténuation du flan droit passera à peine sous -40 dB et un fort taux d'ondulation apparaît. Le filtre est à peut de choses près bien calé sur la bande 50 MHz. Cette dégradation est due à une désadaptation volontaire d'impédance des ports d'entrée et sortie pour en observer les effets.

Voici une autre réalisation (ci-dessous) du filtre avec quatre cellules partiellement blindées. Les circuits LC sont à couplage mixte, magnétique et capacitif. Sans volubateur il est très difficile de le régler.



Et ci-dessous une dernière réalisation du même type de filtre mais avec 2 cellules. Le réglage est très aisé. Les réglages ont été effectués avec un analyseur de spectre HP 8590A et un générateur HF Adret 740A. L'ondulation dans la bande passante est inférieure à 1 dB et les pertes d'insertion inférieures à 2 dB.



Bonne réalisation et expérimentation !! F4DXU