

ADAPTATION D'IMPEDANCE EN RF

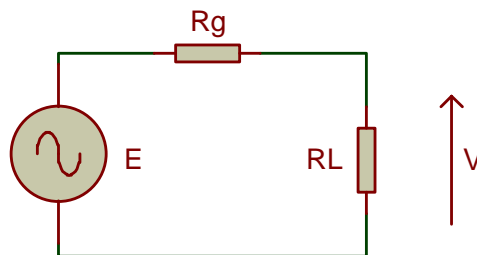
L'objectif de ce TP est de montrer autour d'un point clef de l'électronique RF comment on peut concilier calcul théorique, simulation numérique et relevés expérimentaux.

Le choix de l'adaptation d'impédance est intéressant car il touche non seulement le domaine des Radio Fréquences, mais aussi celui de l'énergie. On montrera ainsi comment on peut optimiser les transferts d'énergie RF, sachant que le coût du watt RF est sans commune mesure avec celui du réseau 50Hz.

1 – Préparation

1.1 - Puissance transmise à une charge résistive

On considère un générateur sinusoïdal d'amplitude E et de résistance interne R_g , connecté à une charge résistive R_L



- Donner l'expression de la puissance P dissipée dans la charge R_L en fonction de E , R_g et R_L .
- Montrer que cette puissance est maximale pour $R_L=R_g$ et vaut $P_{max}=E^2/8R_g$

AN : $E=1V$ crête $R_g = 50\Omega$

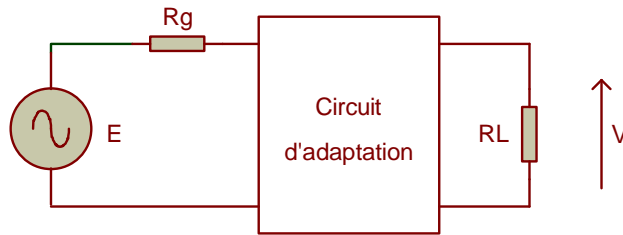
- Calculer la puissance transmise à la charge pour $R_L= 50\Omega$ et $R_L=500\Omega$.
- Exprimer la puissance reçue par la charge de 500Ω en fonction de la puissance maximale disponible (cas où $R_L=50\Omega$)
- Conclusion

1.2 – Circuit d'adaptation en L

Afin d'optimiser le transfert d'énergie entre une source et un charge résistive quelconque, on utilise un circuit d'adaptation dont le plus simple est le circuit en L.

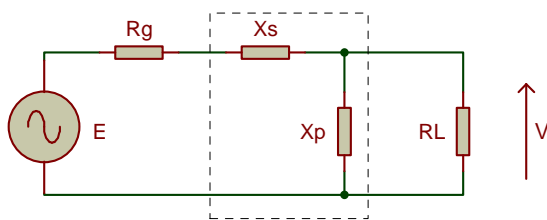
Le but de ce réseau est de présenter à la source une résistance $R_L^*=R_g$ afin que le transfert d'énergie soit maximal.

De même, la source sera vue par la charge comme une résistance $R_g^*=R_L$

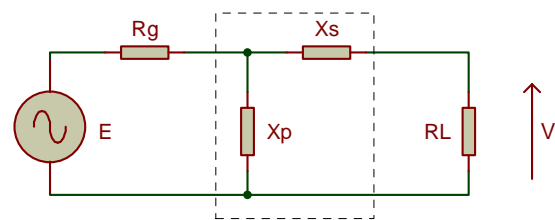


Soit n le rapport R_g/R_L ou R_L/R_g de manière à ce que $n > 1$, que nous appellerons rapport de transformation.

Le circuit en L est constitué d'une branche série et d'une branche shunt. Il doit toujours être connecté de manière à ce que la branche shunt soit du côté de la résistance R_g ou R_L la plus élevée, comme indiqué sur la figure suivante.



cas où $R_L > R_g$



cas où $R_g > R_L$

Chacune des branches du L est constituée d'une réactance pure X . Les réactances X_s de la branche série et X_p de la branche shunt sont de signe opposé.

Ainsi, si la branche série est inductive ($X_s = jL\omega$), la branche shunt sera capacitive ($X_p = -j/C\omega$) et vice versa.

On considèrera par la suite uniquement le cas où $R_L > R_g$

On pose $Q_s = X_s/R_g$ et $Q_p = R_L/X_p$

On montre que l'adaptation a lieu si

$$Q_s = -Q_p = \pm\sqrt{n-1}$$

- Dans le cas où $R_g = 50\Omega$, $R_L = 500\Omega$ et $f = 2,4\text{MHz}$, calculer les valeurs de X_s et X_p , et les valeurs des composants associés.

NB : Il y a deux solutions : une solution passe bas et une solution passe haut. Calculer la valeur des éléments dans les deux cas et faire un schéma à chaque fois.

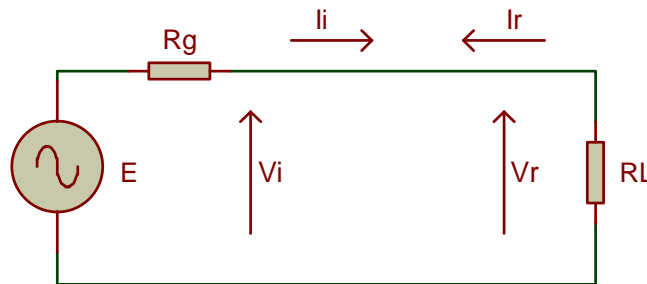
2 – Simulation numérique

2.1- Modélisation d'un quadripôle, matrice S

En fréquence élevée, la modélisation d'un quadripôle linéaire par les paramètres habituels H, Z, Y n'est plus possible car la détermination expérimentale de ces paramètres nécessite des mesures en court circuit ou en circuit ouvert très difficiles à mettre en œuvre.

On utilise donc le modèle S dans lequel toutes les mesures s'effectuent sur entrée et sortie adaptées à la valeur normalisée de 50Ω .

Lorsque les dimensions physiques des circuits ne sont plus très grandes devant la longueur d'onde, on doit prendre en compte les phénomènes de propagation du signal électrique et introduire la notion de signaux incidents et réfléchis. Ainsi, tout signal électrique (tension ou courant) peut se décomposer en un signal incident et un signal réfléchi :



$$V = V_i + V_r$$

$$I = i_l - i_r$$

En appliquant ceci à la modélisation d'un quadripôle, on obtient la représentation suivante dans laquelle a_1 et a_2 représentent les ondes incidentes sur les accès (port) 1 et 2, b_1 et b_2 représentent les ondes émergentes par ces mêmes accès.



La matrice reliant les ondes émergentes b_1 et b_2 aux ondes incidentes a_1 et a_2 s'écrit :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

soit

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

Les coefficients S_{ij} de la matrice sont appelés « paramètres S ». Ce sont des nombres complexes, souvent donnés sous forme module (en dB) et argument.

Par exemple, le paramètre S_{21} , appelé facteur de transmission entrée-sortie, mesuré sur charge adaptée en sortie ($a_2=0$), représente le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée, c'est-à-dire le gain du quadripôle.

Le paramètre S_{11} est rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incidente en entrée, lorsque la sortie est adaptée ($a_2=0$), on l'appelle coefficient de réflexion en entrée.

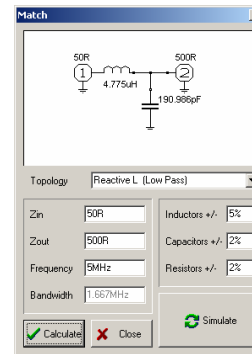
2.2 – Logiciel de calcul et de simulation de circuits RF

Il existe un grand nombre de logiciels de ce type, souvent très complets mais dont la prise en main n'est pas intuitive et le coût dissuasif.

Nous utiliserons le logiciel libre RFSIM, très facile d'utilisation et dont les performances sont suffisantes dans le cadre de cette étude. On en trouvera une description en annexe.

RFSIM possède un outil de calcul de circuit d'adaptation en L que nous allons mettre à profit pour vérifier les calculs effectués précédemment, dans les deux cas possibles.

Ouvrir le menu *Tools/Design/Match* renseigner les cases et appuyer sur *calculate*.



La touche *Simulate* permet de visualiser la réponse fréquentielle du circuit, sous forme de paramètres S.

Faire tracer les courbes S21 et S11. Interprétation

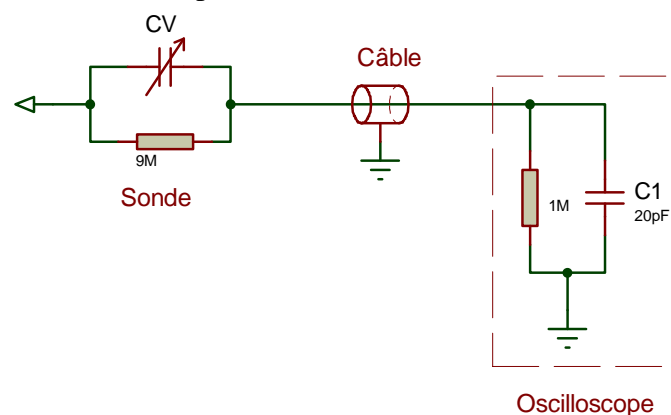
3 – Manipulation

3.1 – Précautions de mesure en RF

Toutes les mesures de tension doivent s'effectuer à l'oscilloscope à l'aide d'une sonde de tension X10 dont on aura préalablement vérifié la calibration.

- Sachant que l'impédance d'entrée de l'oscilloscope est de $1M\Omega$ en parallèle avec $20pF$ et que la capacité linéique d'un câble coaxial est d'environ $60pF/m$, expliquer pourquoi une liaison directe de $1,5m$ fausserait les mesures (calculer la capacité ramenée en bout de câble et son impédance à la fréquence considérée. On pourra utiliser l'outil de calcul de RFSIM accessible par *Tools/Design/Calculator*)

Le schéma d'une sonde d'oscilloscope X10 est donné ci dessous



- Calculer la valeur de la capacité CV nécessaire à compenser la capacité d'entrée de l'oscilloscope et la capacité du câble de $1,5m$ (CV et la somme des capacités parasites doivent former un diviseur capacitif de même rapport que le diviseur résistif).
- Quelle est l'impédance ramenée par la sonde sur le montage en test ?

3.2 – Mesure de la puissance transmise

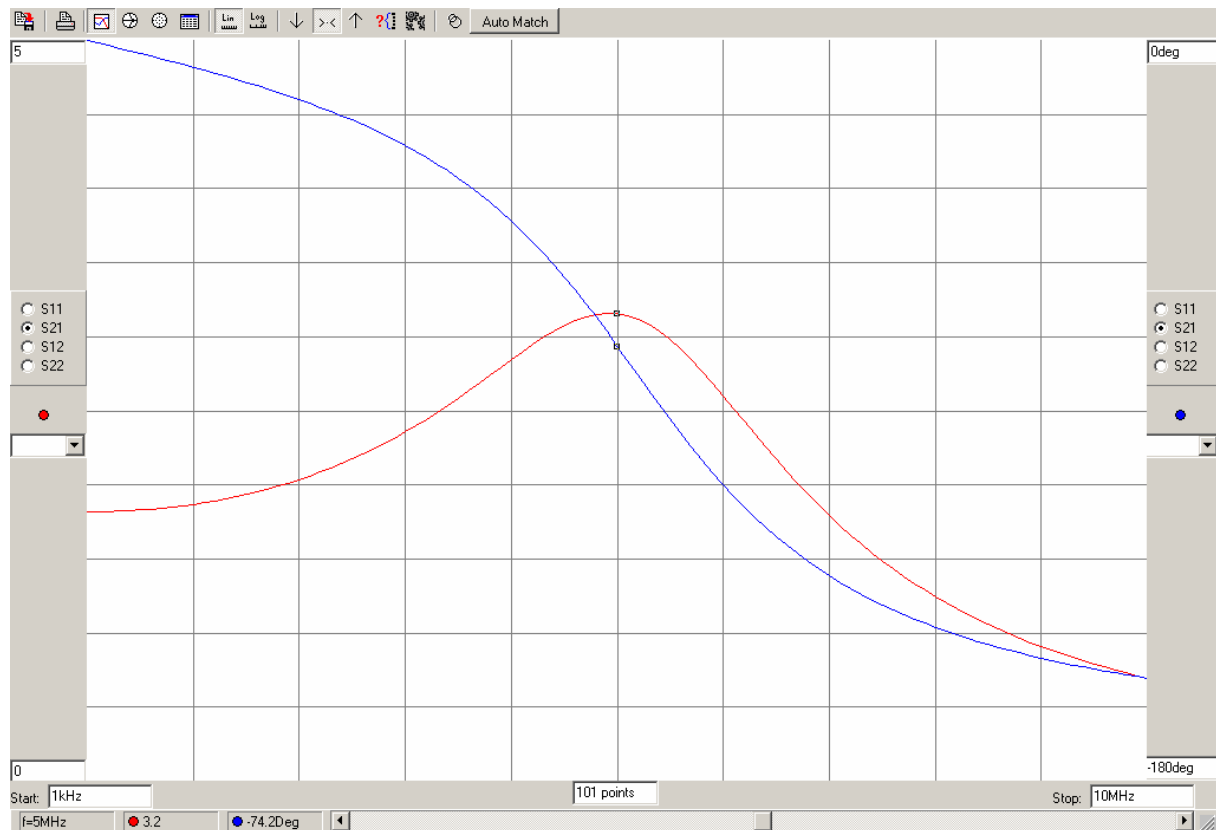
Relier la sortie du générateur sinusoïdal à l'entrée de l'oscilloscope et ajuster la fréquence à 2,4 MHz et le niveau de sortie à 2V crête.

- Que représente cette mesure de tension ?
- Connecter une charge de $50\ \Omega$ à la sortie du générateur et mesurer à l'oscilloscope la tension à ses bornes. Comparer à la valeur précédente, que peut on en conclure ? En déduire une méthode permettant de mesurer la résistance interne d'un générateur. Calculer la puissance reçue par la charge de $50\ \Omega$.
- Refaire la mesure avec la charge de $500\ \Omega$, calculer la puissance reçue et la comparer au cas précédent et à l'étude théorique. Conclusion.
- Même mesure, mais avec le réseau d'adaptation (passe bas $10\ \mu\text{H} - 390\ \text{pF}$) inséré entre le générateur et la charge de $500\ \Omega$. Expliquer pourquoi la puissance est légèrement plus faible que sur $50\ \Omega$.
- Faire un tableau comparatif des mesures effectuées, conclusion.

3.3 – Bande passante de l'adaptation

L'adaptation n'est parfaite qu'à une seule fréquence, celle pour laquelle le réseau a été calculé.

La simulation permet de prévoir l'évolution fréquentielle du circuit. La figure suivante montre l'évolution de S21 (amplitude et phase) en fonction de la fréquence (échelles linéaires)



Vérifiez l'allure de cette courbe en relevant quelques points. A quelle fréquence l'adaptation est elle la meilleure ?

4 – Conclusion

Les circuits d'adaptation d'impédance sont très utilisés en RF, notamment dans les amplificateurs de puissance pour adapter les impédances d'entrée et de sortie des transistors, dans les coupleurs d'antennes, etc.

ANNEXE

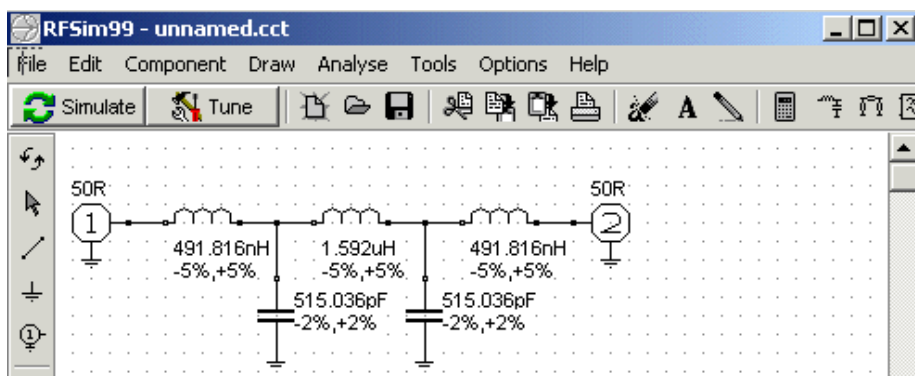
Le logiciel RFSIM

D'après le site <http://perso.orange.fr/f6crp/ba/rfsim.htm>

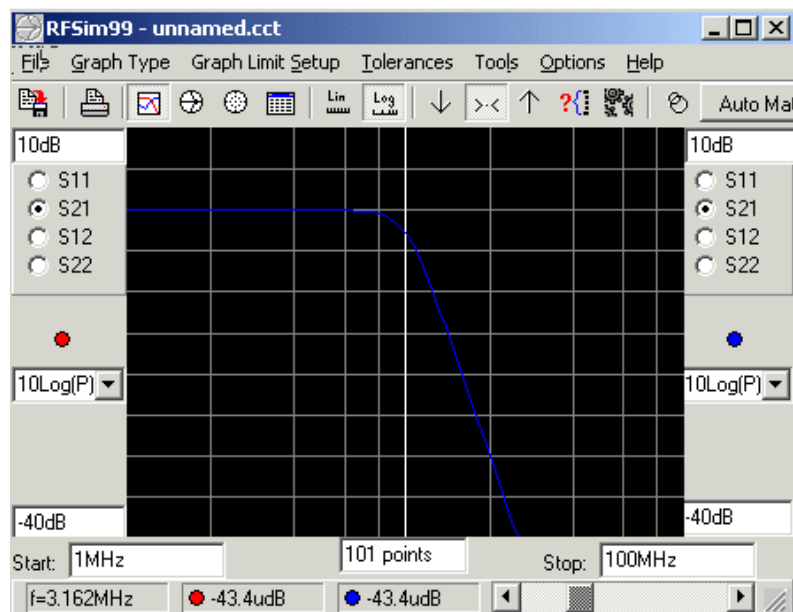
Que fait-il ?

Fondamentalement deux choses :

- la simulation de la réponse de filtres en fonction des valeurs et des typologies que vous avez décrites
- la conception de filtres, atténuateurs, lignes de transmission etc. en fonction de vos exigences.



Très classiquement avant de simuler la réponse d'un filtre, il va falloir le décrire au logiciel, un peu comme vous le faites sur un routeur de circuit imprimé. Voilà en images comment cela se présente. C'est très simple, avec la souris vous sélectionnez le composant idoine (self/capa/source/charge/masse), vous indiquez la valeur du composant, ce menu vous est d'ailleurs proposé automatiquement, vous établissez les connexions, vous placez une source en entrée et une charge en sortie. C'est fini, il ne vous reste plus qu'à cliquer sur le bouton "**Simulate**" pour obtenir la réponse de votre filtre. Vous noterez que l'on peut affecter une valeur de tolérance aux composants. Voici ce que donne la simulation du filtre ci-dessus:

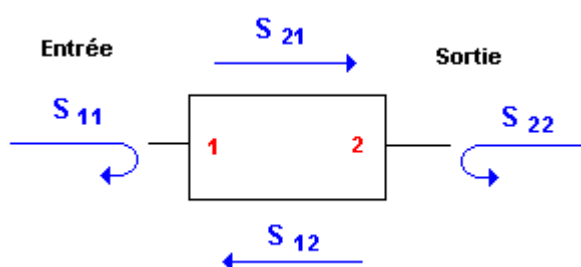


Un petit mot concernant les paramètres de visualisation, ceci peut paraître un peu nébuleux à ceux qui ne manipulent pas les paramètres "S". Comme vous pouvez le constater, vous devez choisir les réponses entre S11 - S21 - S12 - S22. Le "S" vient de Scattering" ou réflexion dans notre bonne vieille langue et les indices 1 ou 2 indiquent l'entrée ou la sortie d'un dispositif. Si l'on se contente d'étudier des éléments possédant une entrée et une sortie, nous aurons affaire à quatre paramètres "S".

Quelques mots sur ces fameux paramètres :

- ** Les paramètres "S" sont des rapports de tension.
- ** Les paramètres "S" sont vectoriels
- ** Les paramètres "S" sont mesurés sur une impédance caractéristique (50 Ω dans notre cas).

Voyons avec un dessin ce que concrètement cela signifie :



Nous parlons de rapports de tension. Prenons le cas du paramètre S21. Il s'agit du rapport de tension de la sortie (2) sur l'entrée (1), en d'autres termes, ce paramètre décrit le gain du dispositif (qui peut être une atténuation). Il sera appelé coefficient de transmission direct et c'est certainement celui qui nous intéressera le plus.

Passons à S11, il s'agit du rapport entre la tension sortante et la tension entrante à l'entrée, on l'appellera coefficient de réflexion à l'entrée. Idem pour S22 mais côté sortie. Quant à S12, il ne nous intéresse guère pour le moment. Donc pour simplifier voire caricaturer, le principal paramètre que nous allons utiliser est S21.

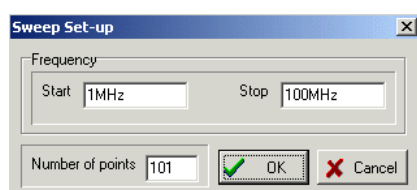
Les paramètres de visualisation :

RF SIM99 a été bien pensé et vous offre pas mal d'options et de choix de visualisation. Pour commencer, l'excursion de fréquence . Vous pouvez définir la fenêtre d'analyse en cliquant sur [Graph Limit Setup] puis [Frequency Sweep].

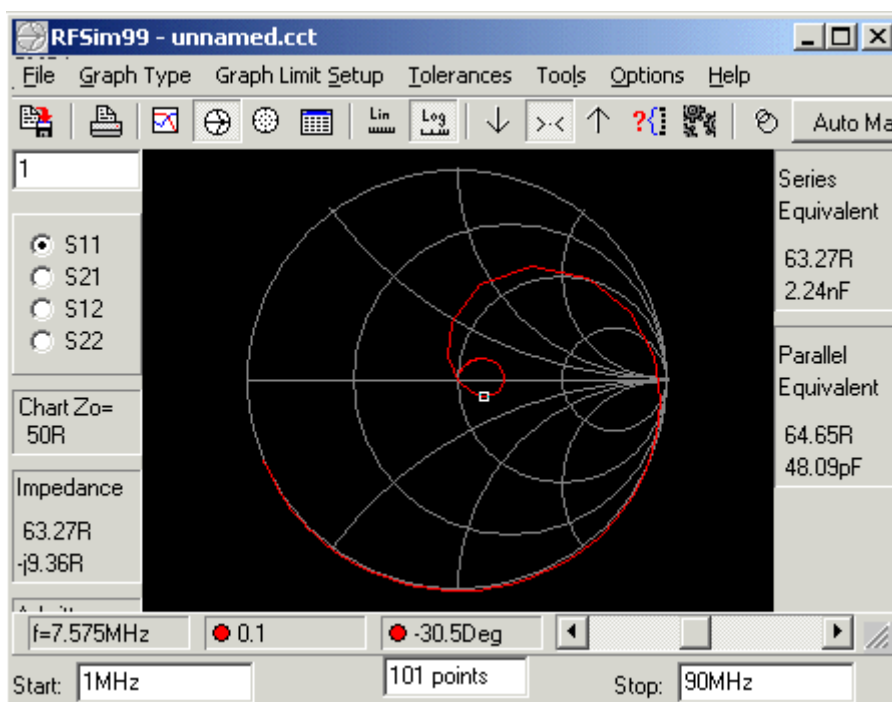
Vous pouvez également définir le nombre de points d'analyse (balayage de 1 à 100 MHz avec 101 points, cela représente grosso modo un pt de mesure / MHz).

En déplaçant le curseur du bas de l'écran, vous observerez qu'un index suit la courbe de réponse, parallèlement trois informations vous sont communiquées, à savoir la fréquence, et les valeurs des paramètres "S" sélectionnés.

Vous pouvez choisir d'afficher la réponse en valeur logarithmique (puissance/tension), en termes de phase ou en délais de groupe.



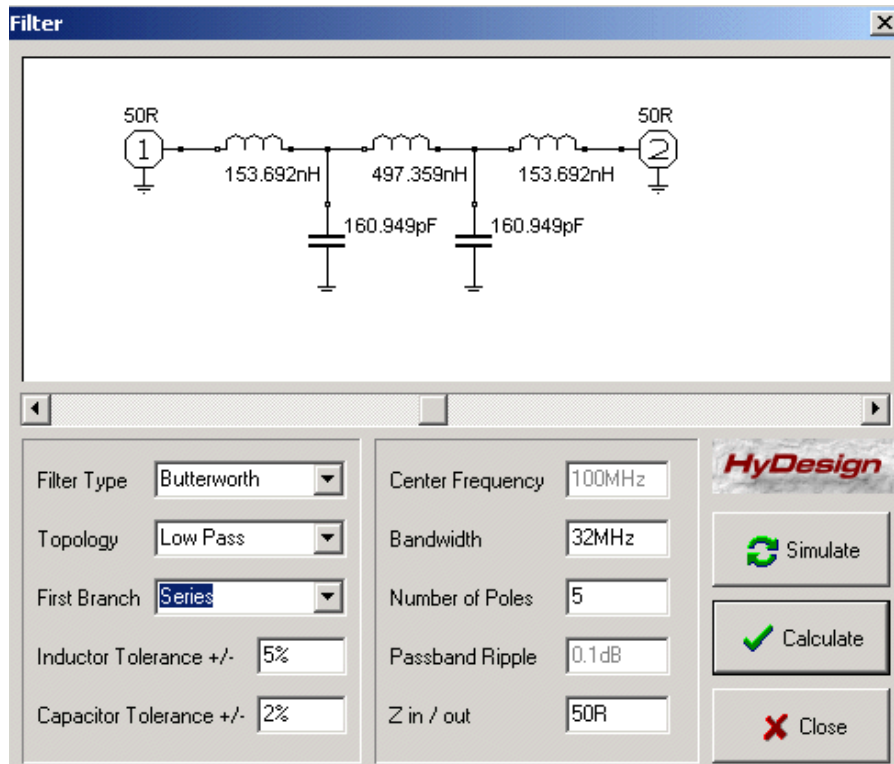
On peut aussi afficher les valeurs sous forme de tableaux, d'abaque de Smith, de projection polaire. Le programme est très riche et offre une multitude de choix et de menus d'affichage. Il est également possible de faire varier les tolérances des composants (ce n'est pas un gadget s'agissant de construction amateur). Essayez cette dernière fonctionnalité c'est très éclairant et spectaculaire. Vous pourrez ainsi appréhender un peu mieux ce que sera votre filtre. Pour ce faire, cliquer sur l'icône [Tolerance Multi Sweep], choisissez un nombre de balayages et faites OK. La courbe de réponse va s'épaissir vous permettant de situer les limites en fonction des variations de valeur des composants



La conception de circuits :

Simuler le fonctionnement des circuits c'est bien, pouvoir concevoir son filtre en fonction de ses propres exigences c'est encore mieux. L'idéal est de voir cela avec un exemple. Nous souhaitons réaliser un filtre passe-bas pour suivre un ampli déca de puissance moyenne ayant une fréquence de coupure de 32 MHz. Avec RFSIM 99, rien n'est plus simple. Depuis le menu [Tools] [Design], sélectionnez [Filter].

Vous devriez voir apparaître quelque chose comme cela. Il ne vous reste plus qu'à opter pour les différentes solutions proposées (type de filtre, typologie, Fc, ondulation, impédance etc.) puis à cliquer sur Calculate.



Le programme va alors modifier le schéma qui se trouve dans la fenêtre de conception en affichant d'une part le schéma du filtre et d'autre part les valeurs des composants. Ensuite dans la seconde fenêtre apparaîtra à vos yeux émerveillés la courbe de réponse du filtre. Les caractéristiques de la bête vous conviennent ? OK, relevez les valeurs et attendez-nous au chapitre suivant pour la suite. Cas contraire, reprenez le menu et modifiez quelques paramètres comme le nombre de pôles par exemple ou l'ondulation tolérable dans la bande passante.