



UNIVERSITÉ DE NANTES



Rapport de mini-projet - Électronique Hautes Fréquences - Projet Transversal

ÉCOLE POLYTECH DE NANTES
DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE ET TECHNOLOGIE DU NUMÉRIQUE

Rédigé par
Victor DUFRENE
Anthelme BOUTRY
Louison GOUY
Kedai WANG
Huanqing LIN

Client : Loïc MARTIN
Professeur encadrant :
Yann MAHE
Tchanguiz RAZBAN

1 Résumé

2 Synthèse de filtre passe-bas en technologie

L'objectif est de réaliser un filtre passe-bas dont le gabarit est donné à la figure 1 avec une réponse de Tchebychev.

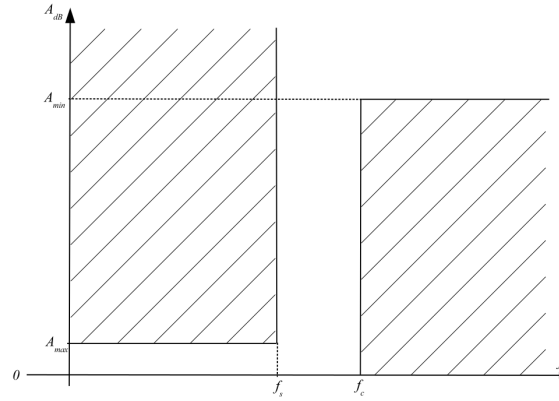


Figure 1: Gabarit filtre passe bas équivalent

Les valeurs numériques associées au gabarit sont les suivantes.

A_{max}	A_{min}	f_s	f_c
0.1 dB	15,00 dB	2 GHz	3 GHz

Table 1: Valeur numérique gabarit souhaité

La conception d'un filtre hautes fréquences débute par une synthèse classique avec des éléments passifs (condensateurs et bobines) comme il a été fait dans le module moyennes fréquences du S7. A partir du gabarit de la figure 1, l'équation ci-dessous nous permet d'obtenir l'ordre du filtre à concevoir.

$$n \geq \frac{\argch\left(\sqrt{\frac{\alpha_{min} - 1}{\alpha_{max} - 1}}\right)}{\argch(1/k)} \quad (1)$$

On rappelle :

$$\argch(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) \quad (2)$$

Où :

- n est l'ordre du filtre souhaité;
- k est la sélectivité égal à :

$$k = \frac{f_s}{1,5f_s} = \frac{2}{3} \approx 0,67 \quad (3)$$

- α_{min} est l'atténuation minimale (en linéaire) du signal dans la bande atténuée égal à $10^{\frac{15}{10}} \approx 31,6$
- α_{max} est l'atténuation maximale (en linéaire) du signal dans la bande passante égal à $10^{\frac{0,1}{10}} \approx 1,02$

L'application nous donne $n \geq 4,5$ soit au minimum un ordre 5 pour respecter le gabarit souhaité. Le schéma passe-bas en impédance que nous allons utiliser est donné ci-dessous par la figure ??.

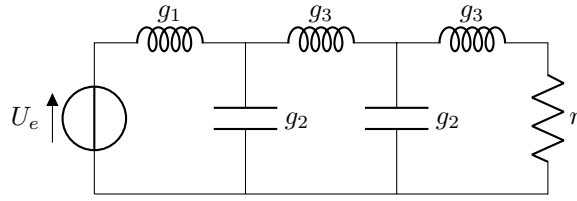


Figure 2: Schéma prototype d'un filtre passe-bas de Tchebycheff en impédance.

Avec :

- les coefficients g_k , les valeurs normalisées des condensateurs et des bobines;
- r , la résistance de charge normalisée est égale à 1. Sa valeur dénormalisée est de 50Ω ;
- U_e , le signal d'entrée ayant une résistance série normalisée égale à 1 et donc 50Ω en dénormalisée.

Pour obtenir les valeurs de g_k nous ne pouvons pas utiliser les tableaux donnés dans le polycopié d'électronique moyennes fréquences car ils ne sont valables uniquement pour des ondulations de 0.5 dB et 1 dB. Notre gabarit nous impose une ondulation maximale de 0.1 dB dans la bande passante. Pour obtenir des coefficients g_k qui permettent de respecter l'ondulation voulue nous avons réalisé un script sur Octave disponible en annexe. Le résultat obtenu est le suivant.

g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1.1468	1.3712	1.9750	1.3712	1.1468

Table 2: Valeurs des composants normalisées pour une ondulation de 0.1 dB

Pour trouver les valeurs réelles des composants il faut : pour les condensateurs, multiplier les g_k pairs par un coefficient C_{denom} et pour les bobines, multiplier les g_k impairs par un coefficient L_{denom} . Les valeurs de ces coefficients sont données ci-dessous.

$$C_{denom} = \frac{1}{2\pi f_s R} \quad L_{denom} = \frac{R}{2\pi f_s} \quad (4)$$

Le tableau ci-dessous donne les applications numériques pour les composants du filtre avec $f_c = 2GHz$ et $R = 50\Omega$.

L_1	C_2	L_3	C_4	L_5
4.56 nH	2.18 pF	7.86 nH	2.18 pF	4.56 nH

Table 3: Valeurs réelles des composants du filtre passe-bas.

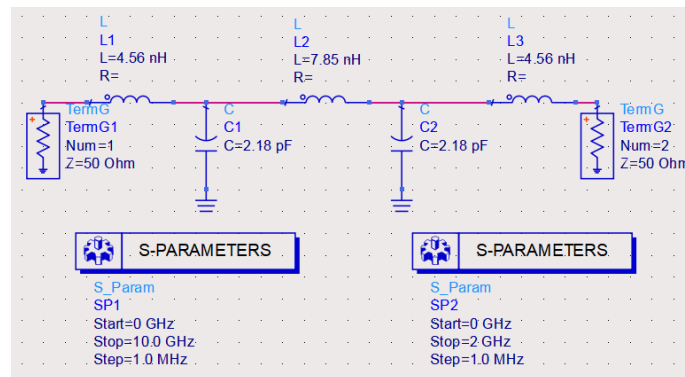


Figure 3: Filtre passe-bas avec des éléments idéaux.

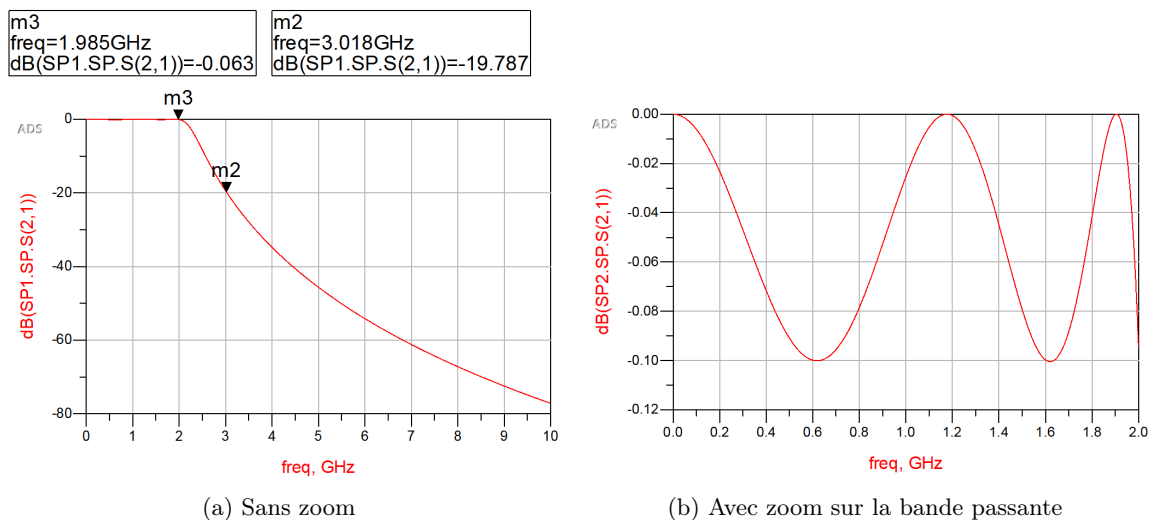


Figure 4: Simulation du module du coefficient de transmission S21 en dB

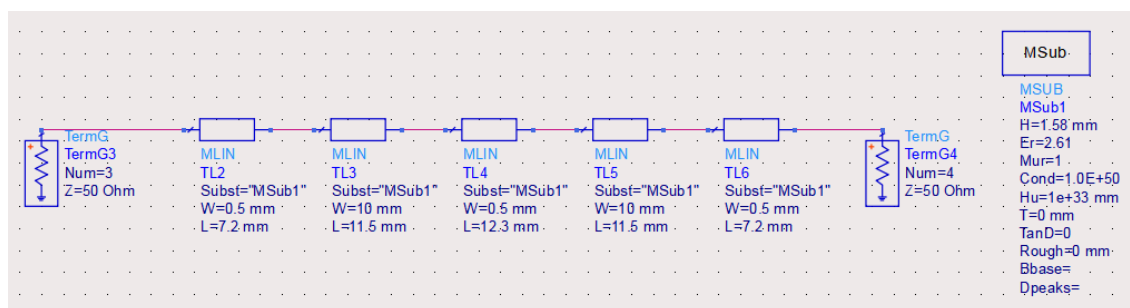


Figure 5: Filtre passe-bas en technologie micro ruban.

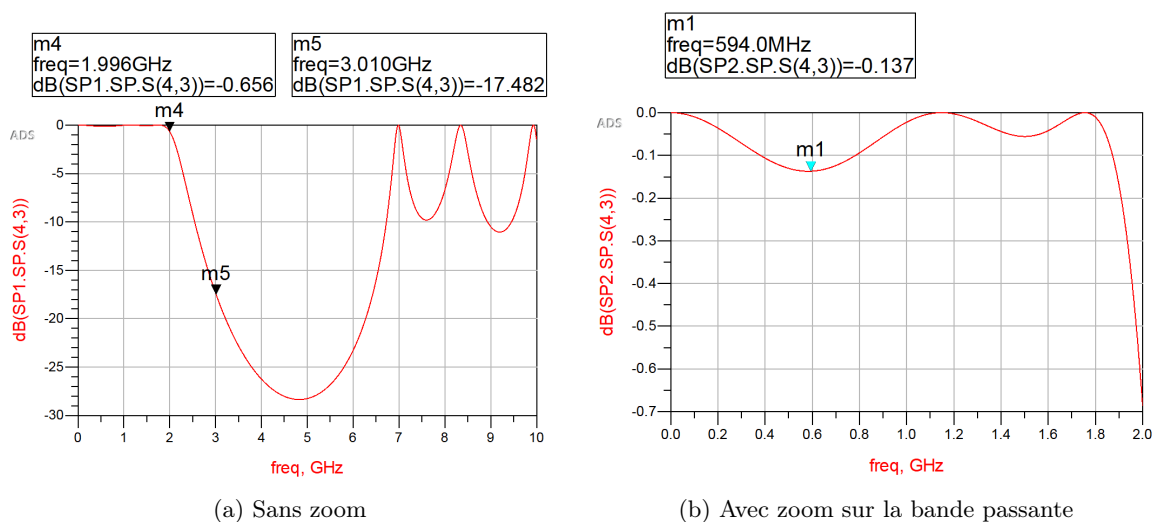


Figure 6: Simulation du module du coefficient de transmission S43 en dB

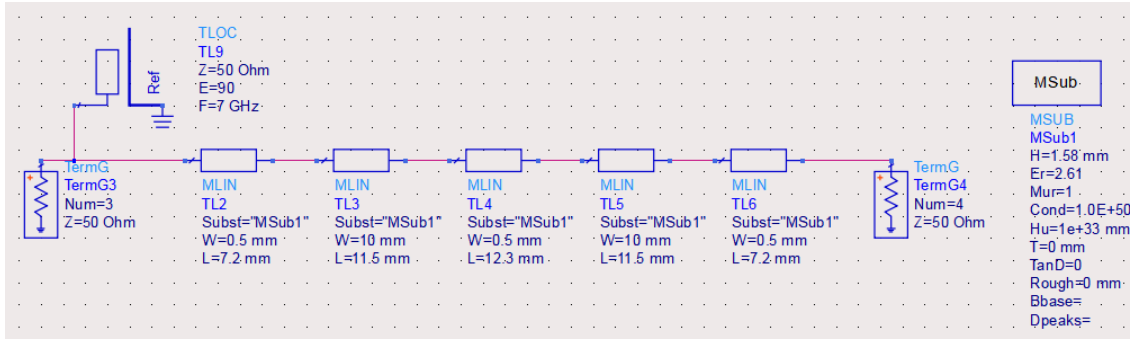


Figure 7: Filtre passe-bas amélioré en technologie micro ruban.

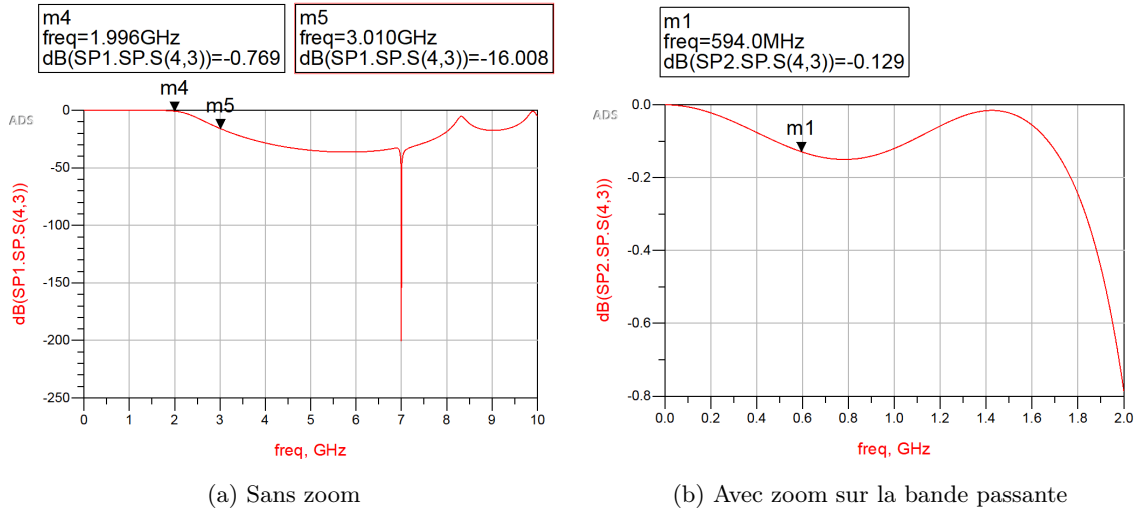


Figure 8: Simulation du module du coefficient de transmission S43 en dB

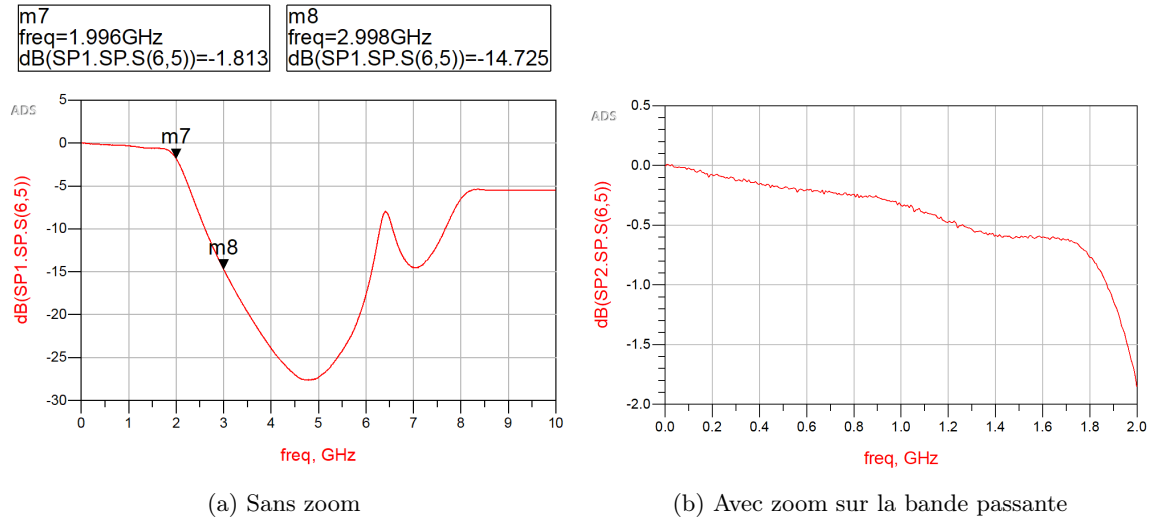


Figure 9: Module du coefficient de transmission S65 en dB d'un filtre passe-bas sur substrat epoxy

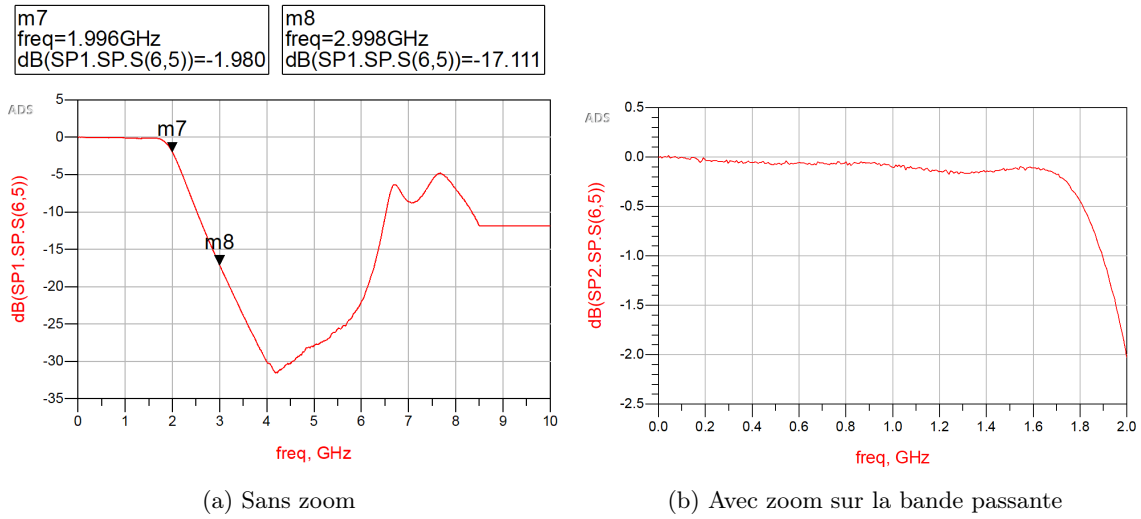


Figure 10: Module du coefficient de transmission S65 en dB d'un filtre passe-bas sur substrat teflon

3 synthèse d'un filtre passe-bande

La synthèse d'un filtre en hautes fréquences à partir d'un gabarit se rapporte à la méthode étudiée en moyenne fréquence. Une étape finale est ajoutée permettant la transformation des éléments localisés en éléments distribués. Le cahier des charges est le suivant, concevoir un filtre passe bande basé sur une fonction d'approximation de type Tchebychev et respectant le gabarit figure 11. L'implémentation réelle doit se en utilisant exclusivement des lignes micro ruban de longueur $\lambda_g/2$ ou $\lambda_g/4$ et des stubs.

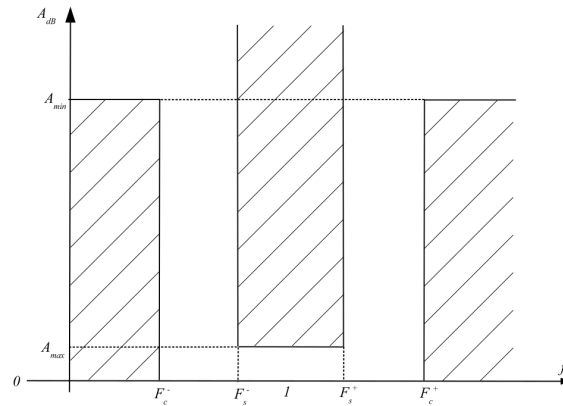


Figure 11: Gabarit du filtre passe-bas souhaité

Les valeurs numériques associées au gabarit sont les suivantes. Les fréquences sont en GHz et l'atténuation en dB.

A_{max}	A_{min}	f_c^-	f_s^-	f_s^+	f_c^+
0,1000	15,00	1,500	1,750	2,250	3,000

Table 4: Valeur numérique gabarit souhaité

Symétrie du gabarit

Avant de commencer la synthèse du filtre il est nécessaire de valider une condition sur la symétrie. Si elle n'est pas respectée il faudra modifier le gabarit du cahier des charges. La condition s'opère sur la

moyenne géométrique de la bande passante et de la bande coupée notées :

$$f_{co} = \sqrt{f_c^- \cdot f_c^+}, \quad f_{so} = \sqrt{f_s^- \cdot f_s^+} \quad (5)$$

Ainsi, si $f_{so} = f_{co}$, le gabarit est centré il n'est pas nécessaire de réaliser d'opération particulière. On obtient alors $f_{so} = f_{co} = f_0$ avec f_0 la fréquence centrale du gabarit. Si $f_{so} \neq f_{co}$, le gabarit n'est pas centré il faut passer par une étape de centrage du gabarit avant de réaliser la synthèse du filtre.

Application numérique :

$$f_{co} = \sqrt{f_c^- \cdot f_c^+} = \sqrt{1,500 * 3,000} = 2,121 GHz \quad (6)$$

$$f_{so} = \sqrt{f_s^- \cdot f_s^+} = \sqrt{1,750 * 2,250} = 1,984 GHz \quad (7)$$

$$f_{so} < f_{co} \quad (8)$$

Le filtre est asymétrique il faut réaliser l'opération de centrage. Dans notre cas elle vise à diminuer f_{co} . Il est possible de faire varier la borne positive f_c^+ . Cela à pour effet de sur contraindre le cahier des charges. Pour répondre aux exigences il est interdit d'élargir la bande atténuée ou de diminuer la bande passante. Ainsi on fixe la fréquence centrale $f_0 = f_{so} = \sqrt{f_s^- \cdot f_s^+}$. Il vient donc :

$$f_c^+ = \frac{f_{so}^2}{f_c^-} = \frac{1,984^2}{1,500} = 2,614 GHz \quad (9)$$

Les nouvelles valeurs numériques pour le gabarit du filtre sont les suivantes. Elle font référence à la figure 11.

A_{max}	A_{min}	f_c^-	f_s^-	f_0	f_s^+	f_c^+
0,1000	15,00	1,500	1,750	1,984	2,250	2,614

Table 5: Valeur numérique gabarit centré

Gabarit passe bas

L'étape suivant dans la conception d'un filtre passe bande symétrique vise à simplifier la synthèse en passant par un gabarit passe bas. Cela permet de calculer son ordre puis sa structure en éléments localisés.

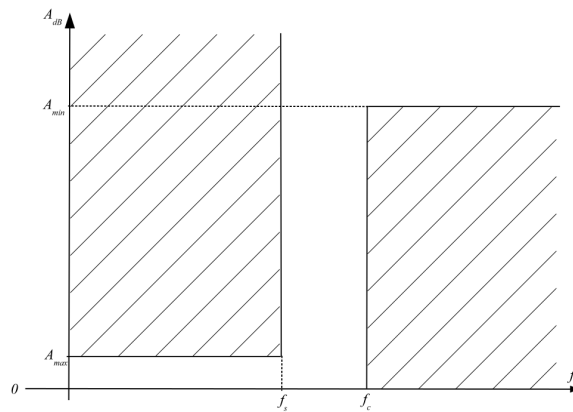


Figure 12: Gabarit filtre passe bas équivalent

L'évaluation du coefficient de sélectivité permet d'établir le gabarit normalisée. Cette grandeur se note k est sans unité et strictement inférieure à 1. Son expression est la suivante :

$$k = \frac{\Delta.f_s}{\Delta.f_c} = \frac{f_s^+ - f_s^-}{f_c^+ - f_c^-} = \frac{2,250 - 1,75}{2,614 - 1,500} = 0,4488 \quad (10)$$

L'ordre du filtre $\delta \in N$ est donnée pour une fonction d'approximation de Tchebychev avec l'expression suivante. Les atténuations A_{min} et A_{max} en dB correspondent respectivement aux fréquences f_s et f_c .

$$\delta \geq \frac{\argch\left(\sqrt{\frac{10^{A_{min}/10} - 1}{10^{A_{max}/10} - 1}}\right)}{\argch(1/k)} \quad (11)$$

On rappelle pour la calculatrice :

$$\argch(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) \quad (12)$$

On calcule avec $A_{min} = 15dB$ et $A_{max} = 0,1dB$. L'ordre δ est arrondi à l'entier supérieur.

$$\frac{\argch\left(\sqrt{\frac{10^{15/10} - 1}{10^{0,1/10} - 1}}\right)}{\argch(1/0,4488)} = 2,975, \quad \delta = 3 \quad (13)$$

Le gabarit impose un ordre minimum de 3, c'est la valeur que nous retiendront. On note tout de même que l'arrondi au supérieur présente un faible écart avec l'ordre choisi. Notre filtre devrait respecter les spécifications mais des approximations pourraient entraîner des débordements notamment aux fréquences particulières f_c et f_s .

Prototype passe bas normalisé vers passe bande dénormalisé

Cette étape vise à transformer le schéma passe bas réalisé en son équivalent passe bande. Il existe deux schémas possible dit de type impédance et de type admittance où, respectivement, le premier élément en partant de la source est une inductance ou le premier élément est une capacité. N'ayant pas d'indications sur ce point dans le cahier des charges nous choisirons arbitrairement. Il faut toutefois avoir à l'esprit que cela engendrera un résultat différent lors de la transposition en éléments distribués. Pour un ordre 3, dans le premier cas on aura deux lignes $\lambda/2$ et un stub. Dans le second, deux stubs et une ligne $\lambda/2$ seront nécessaires.

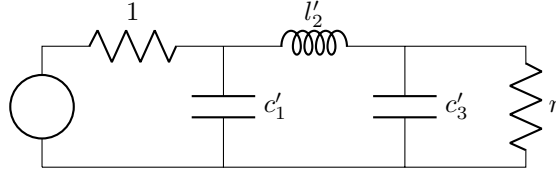


Figure 13: Schéma prototype filtre passe-bas ordre 3 en admittance

La figure 13 représente le prototype du filtre passe bas. Il est composé de trois composants réactifs et le premier est un condensateur, nous sommes bien en présence d'un filtre d'ordre trois de type admittance. Les valeurs normalisées de ces composants s'expriment à partir de l'atténuation maximum A_{max} , de l'ordre du filtre et de la charge. Dans le cas des ordres paires les deux résistances n'ont pas la même valeur, il est donc préférable de choisir un ordre impaire sans quoi une problématique d'adaptation se posera. Les calculs pour obtenir les valeurs des composants sont détaillés dans [?] à la page 93. Ils font intervenir des fonctions trigonométriques relativement complexes. La figures 14 ci-dessous rassemble les grandeurs en question pour une ondulation inférieur à 0,1dB en bande passante et pour un ordre compris entre 1 et 10.

1	0.3052	1									
2	0.8430	0.6220	1.3554								
3	1.0315	1.1474	1.0315	1							
4	1.1088	1.3061	1.7703	0.8180	1.3554						
5	1.1468	1.3712	1.9750	1.3712	1.1468	1					
6	1.1681	1.4039	2.0562	1.5170	1.9029	0.8618	1.3554				
7	1.1811	1.4228	2.0966	1.5733	2.0966	1.4228	1.1811	1			
8	1.1897	1.4346	2.1199	1.601	2.1699	1.5640	1.9444	0.8778	1.3554		
9	1.1956	1.4425	2.1345	1.6167	2.2053	1.6167	2.1345	1.4425	1.1956	1	
10	1.1999	1.4481	2.1444	1.6265	2.2253	1.6418	2.2046	1.5821	1.9623	0.8853	1.3554

Figure 14: Coefficients normalisés fonction de Tchebychev 0,1dB ondulation

La première colonne de ce tableau correspond à l'ordre du filtre. Les valeurs suivantes correspondent aux composants de gauche à droite sur le schéma. La dernière valeur concerne la résistance de charge. On remarque bien que pour les ordres paires cette dernière est différente de la résistance série au générateur. Dans notre cas $c'_1 = 1,0315$, $l'_2 = 1,1474$ et $c'_3 = 1,0315$. Les informations nécessaires à la transformation du schéma équivalent passe bas au schéma équivalent passe bande ont été rassemblées. Nous pouvons opérer cette opération. Les éléments inductifs doivent être remplacés par une self et un condensateur en série. Les éléments capacitifs doivent être remplacés par une self et un condensateur en parallèle. Les valeurs normalisées des nouveaux composants sont données par les expressions suivantes: Cas de l'inductance :

$$c_k = \frac{B}{l'_k}, \quad l_k = \frac{l'_k}{B} \quad (14)$$

Cas du condensateur :

$$l_k = \frac{B}{c'_k}, \quad c_k = \frac{c'_k}{B} \quad (15)$$

Où B désigne la bande passante

$$B = \frac{\Delta f_s}{f_0} = \frac{f_s^+ - f_s^-}{f_0} = \frac{2,250 - 1,75}{1,984} = 0,2520 \quad (16)$$

4 Conclusion

Il existe une méthode détaillée dans le *cours de filtrage actif* de Vincent Gouret faisant varier à la fois f_{so} et f_{co} . Elle permet d'optimiser la contrainte sur la sélectivité.