

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N°: 2023/TLC/



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE: TELECOMMUNICATION
OPTION: SYSTEMES DE TELECOMMUNICATION

Mémoire Présenté Pour L'obtention
Du Diplôme De Master Académique

Présenté par : Elbar Messouda
Silini Radia

Thème

Etude et conception des filtres
hyperfréquences

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. KEBAILI Farida	MCB	Université de M'sila	Président
Dr. DJELLID Asma	MCA	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. BENMEDDOUR Fadila	MCA	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Mme. CHABANE Rayene	MAA	Université de M'sila	Examineur

Année Universitaire: 2022 /2023

Remerciements

Nous remercions en premier lieu mon Dieu de nous donner la santé et la patience pour avoir terminé ce travail.

Ainsi nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à nos encadrantes **Dr. DJELLID Asma et Dr. BENMEDDOUR Fadila** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour leur suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire aussi **Dr. DJIADEL ELSSADI** pour son aide et ses conseils.

Nous tenons à remercier également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail; ainsi que tous nos enseignants du département d'électronique.

Nous voulons également remercier nos familles pour leur soutien moral particulièrement nos parents pour leur soutien inconditionnel tout au long de nos longues années d'études.

Nous remercions aussi tous nos collègues étudiants pour leur soutien moral.

Enfin nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

« **Mes chers parents** »

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance, ses efforts et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail mon éternelle gratitude.

Mon père, pour ses sacrifices et ses privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci infiniment pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

*Mes frères Amine et Chaker et mes sœurs Hadjer et Ikram,
Qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance,
De courage et de générosité.*

Ma sœur et ma chère amie Messouda, je vous souhaite une vie pleine de succès, de joies et de bonheur.

A mes chères amies :

*Ferial , Wissem , Imane , Hadjer , Manel, Sabrina , Chaima et Abire
Je ne trouve pas les mots sincères pour exprimer mes sentiments et mes pensées.
Vous êtes mes sœurs, merci pour les meilleurs moments passés ensemble. Je
vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

RADIA

Dédicaces

Je tiens c'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

A qui m'a encouragé et inspiré et ma enseigné, mon premier et dernier motif et pour toujours mon père « Ali » dieu le bénisse.

A l'être le plus cher de ma vie ma mère « Meriem ».

A mon frère, mes sœurs, mes amis

Sans vous, je ne serais pas arrivé à ce jour.

MESSOUDA

Liste des abréviations

IMUX : Input Multiplexer	29
OMUX : Output Multiplexer	29
SMA : SubMiniature version A	30

Liste des tableaux

Tableau I.1 - Comparaison des technologies de filtrage	23
Tableau I.2 - Dénormalisation et changement de variables	28

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1- Illustration de l'Échelle de Longueur d'Onde, Spectres et Distribution d'Énergie	16
Figure I.2 - Nécessité du filtrage dans une chaîne de transmission	17
Figure I.3 - Gabarit d'un filtre passe-bas	18
Figure I.4 - Gabarit d'un filtre passe-haut	19
Figure I.5 - Gabarit d'un filtre passe- bande	20
Figure I.6 - Gabarit d'un filtre coupe-bande	21
Figure I.7 - Méthode de synthèse des filtres actifs (a) et passifs (b)	23
Figure I.8- Les organismes de normalisation les plus influents	25
Figure I.9 - Réponse d'un filtre passe bas exprimée en fonction de la fréquence normalisée	26

Chapitre II

Figure II.1 - Transposition Spectrale : Exploration des Fréquences et Bande de Base	43
Figure II.2 - Déplacement de fréquence en bande de base	44
Figure II.3 - Transposition passe bas - passe haut	44
Figure II.4 - Transposition du passe bas vers le passe bande	45
Figure II.5 - Transposition passe bas -coupe bande	45
Figure II.6 - Gains de filtres de Butterworth passe-bas d'ordre 1 à 5 en fonction de la fréquence	48
Figure II.7- Diagramme de Bode d'un filtre de Butterworth passe-bas du premier ordre	48
Figure II.8- Réponse fréquentielle d'un filtre passe-bas de Tchebychev de type 1 d'ordre 4 avec $\varepsilon = 1$	50
Figure II.9 - Réponse fréquentielle d'un filtre de Tchebychev inverse passe-bas avec $\varepsilon = 0.01$	51
Figure II.10- Modes de couplages en résumé	53

Chapitre III

Figure III. 1- Implémentation de filtre passe bas par la méthode stepped impedance. (a). Vue en perspective. (b). Vue de dessus sur la partie métallique	56
Figure III. 2- Résultats simulés sous Ansoft Designer 3.5 de la réponse en fréquence de $S_{11}(dB)$ et $S_{21}(dB)$ du prototype de filtre passe bas réalisé par stepped impédance	56
Figure III.3 - Structure d'un filtre passe bande	58
Figure III.4 - Résultats simulés sous Ansoft Designer 3.5 de la réponse en fréquence de $S_{11}(dB)$ et $S_{21}(dB)$ du prototype de filtre passe bande utilisant les stubs circuit ouvert	59
Figure III.5 - Implémentation de filtre passe haut optimum distribué	60
Figure III.6 – Réponses en fréquences simulés par Ansoft Designer de $S_{11}(dB)$ et $S_{21}(dB)$ de la conception de la Figure 5	60
Figure III.7 - Structure d'un filtre coupe bande optimum d'ordre trois	62
Figure III.8 - Résultats simulés sous Ansoft Designer 3.5 de la conception d'un filtre coupe bande de la figure 7	62

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des Abreviations	5
Liste des tableaux	6
Liste des figures	7
Sommaire	8
Introduction Générale	12
Chapitre I	
Fondements Théoriques des filtres hyperfréquences	
I.1. Introduction	15
I.2. Généralités	15
I.2.1. Définition d'un filtre	16
I.2.2. Filtre idéal et filtre réel	17
I.3. Types de filtres	18
I.3.1. Filtre passe-bas	18
I.3.2. Filtre passe-haut	19
I.3.3. Filtre passe-bande	20
I.3.4. Filtre coupe-bande	21
I.4. Catégories de filtres	22
I.4.1. Filtrés Passifs	22
I.4.2. Filtrés Actifs	22
I.5. Filtrage hyperfréquence	24
I.5.1. La normalisation des unités	24
I.5.1.1. Normalisation de l'unité de fréquence	25
I.5.1.2. Normalisation de l'unité d'impédance	26
I.5.2. Dénormation et Changement de Variables ou de Fréquence	27
I.5.3. Evolution vers un filtre hyperfréquence	29
I.5.4. Cahier de charges du filtre	29
I.5.5. Fondements Théoriques et Concepts Clés des Filtrés Hyperfréquence	31
I.6. Utilisations des Filtrés Hyperfréquence	31
I.6.1. Les applications clés des filtres hyperfréquence	31
I.6.2. Avantages des filtres.	32

I.6.3. Inconvénients des filtres.	33
I.7. Conclusion	33
Chapitre II	
Filtres Hyperfréquences - Étude et Applications	
II.1. Introduction	35
II.2. Fonction de transfert	35
I.2.1. Représentation d'une fonction de transfert - diagramme de Bode	35
I.2.2. Filtres linéaires	36
II.2.2.1. Filtres d'ordre 1	36
II.2.2.2. Filtres d'ordre 2	39
II.3. Transposition de fréquence	42
II.3.1. Notions nécessaires	42
II.3.2. Concept de Transposition en fréquence	43
II.3.2.1. Transposition passe bas vers passe haut	44
II.3.2.2. Transposition passe bas-passe bande	44
II.3.2.3. Transposition passe bas-coupe bande	45
I.4. Méthodes classiques de conception de filtres	46
I.4.1. Approches de conception de filtres	46
1.4.2. Méthodes classiques de conception de filtres (Butterworth, Chebyshev, etc.)	47
1.4.2.1. Filtres Butterworth	47
1.4.2.2. Filtres Chebyshev	49
I.4.3. Techniques avancées de conception	52
II.5. Conclusion	53
Chapitre III	
Résultats des simulations	
III.1. Introduction	55
III.2. Filtre Passe Bas Stepped impedance	55
III.2.1. Structure	55
III.2.2. Cahier de charge	55
III.2.3. Résultats	56
III.3. Filtre Passe bande Stepped impedance	57
III.3.1. Structure	57
III.3.2. Cahier de charge	57

III.3.3. Résultat	58
III.4. Filtre Passe-haut Stepped impedance	59
III.4.1. Structure	59
III.4.2. Cahier de charge	59
III.4.3. Résultat	60
III.5. Filtre Passe bande Stepped impedance	61
III.5.1. Structure	61
III.5.2. Cahier de charge	61
III.5.3. Résultat	62
III.6. Conclusion	63
Conclusion Générale	65
Bibliographie	66
Résumé	67
Mots clés	67
Summary	67
Keywords	67
ملخص	67

Introduction Générale

Introduction générale

L'importante utilisation du spectre de fréquences a engendré de nouvelles contraintes sur les systèmes de télécommunication, ce qui entraîne systématiquement de nouvelles recherches et de nouvelles technologies dans le progrès et le développement. le marché

Les filtres micro-ondes passifs sont considérés comme étant une pièce maîtresse dans l'analyse des signaux dans le domaine des télécommunications modernes : spatial, téléphonie mobile, radars ... la conception des filtres radiofréquences et micro-ondes constitue un grand défi, des performances électriques sans cesse améliorées, une sélectivité importante, un minimum d'encombrement et un coût de production réduit. Tous ces détails représentent une contrainte importante dans leur réalisation.

Les structures planaires ont connu ces dernières années via de nombreuses recherches approfondies dans le domaine un important développement technologique très attractif qui est caractérisé par leur faible coût de réalisation, adaptation et intégration sur les systèmes actifs.

Dans ce contexte, les travaux que nous présentons dans ce manuscrit s'inscrivent dans cet axe de recherche de mise au point de méthodes de synthèse pour la conception de filtres hyperfréquences.

Dans la première partie de notre mémoire, nous avons abordé des généralités sur les filtres. Dans la deuxième nous avons développé la conception des filtres basée sur un calcul analytique.

La troisième partie qui est le dernier chapitre, il comporte la conception des filtres en utilisant le logiciel «HFSS».

Chapitre I

Fondements théoriques
des filtres
hyperfréquences

I.1. Introduction :

Ce chapitre constitue une exploration approfondie des concepts fondamentaux qui sous-tendent les filtres hyperfréquences. Dans ce contexte, nous abordons les principes clés du filtrage, depuis la définition et la distinction entre filtres idéaux et réels jusqu'à la catégorisation en types spécifiques tels que les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande.

De plus, nous examinons les catégories de filtres, à savoir passifs et actifs, en soulignant leurs caractéristiques distinctives. En évoluant vers le filtrage hyperfréquence, nous explorons la normalisation des unités et les concepts fondamentaux propres aux filtres hyperfréquences.

Nous mettons en évidence les utilisations clés, les avantages et les limitations des filtres hyperfréquences, jetant ainsi les bases essentielles pour une compréhension approfondie de ce domaine crucial dans les systèmes de télécommunication moderne.

1.2. Généralités

Dans le domaine de la transmission, un signal est toujours accompagné par des signaux indésirables tels que des bruits, des interférences et des fréquences porteuses, ce qui justifie l'utilisation de filtres. Ce qui les différencie réside dans leur technologie et leur domaine d'application : les filtres à très basse fréquence, les filtres audiofréquences et les filtres hyperfréquences.

Tous les types de filtres partagent une caractéristique commune : ils intègrent des circuits sensibles à des fréquences spécifiques, connus sous le nom de résonateurs, qui sont généralement basés sur des constantes localisées.

Par exemple, dans la plage de fréquences moyennes (de 10^2 à 10^7 Hz), les résonateurs sont principalement constitués d'inductances, de capacités ou de matériaux piézo-électriques.

De manière similaire, pour les fréquences extrêmement élevées (supérieures à 10^8 Hz), les résonateurs utilisent des constantes réparties, prenant la forme de lignes de transmission, de guides d'ondes ou de cavités [1].

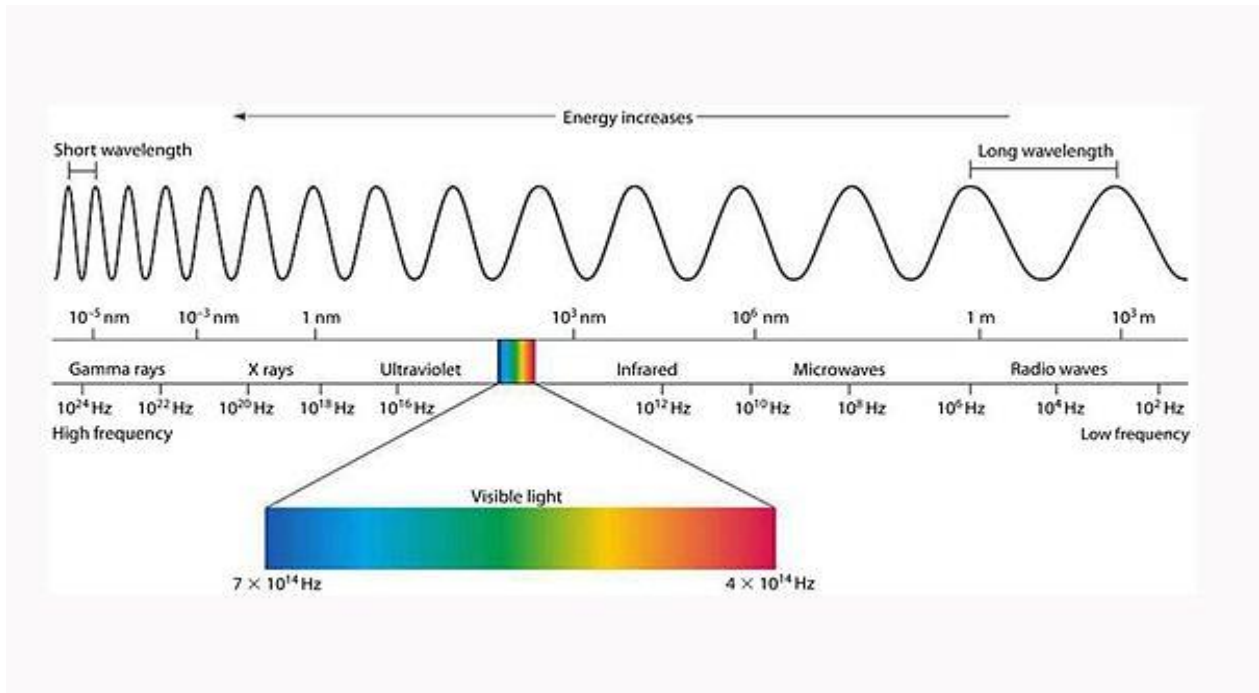


Figure I.1- Illustration de l'échelle de longueur d'onde, spectres et distribution d'énergie [2].

I.2.1. Définition d'un filtre

Un filtre représente un élément électronique, un quadripôle linéaire dépourvu de pertes, qui exerce la capacité de séparer les signaux en fonction de leurs fréquences.

Son caractère prédominant réside dans le schéma d'atténuation vis-à-vis de la fréquence. La trajectoire d'affaiblissement est précisée par des éléments tels que la bande passante (B), la raideur de rejet (K), aussi appelée pente, les pertes d'insertion ainsi que le taux d'ondulation. Par conséquent, le choix de la technologie du filtre dépend des facteurs suivants [1] :

- Le profil requis ;
- Le degré d'atténuation souhaité ;
- La fréquence de seuil ;
- La sélectivité, la raideur ou la pente de rejet.

I.2.2. Filtre idéal et filtre réel

Un filtre idéal transmettrait sans altération ni déphasage toutes les fréquences pertinentes, tout en éliminant totalement les fréquences indésirables.

Dans la réalité, la conception d'un filtre répondant à ces critères est irréalisable. Obtenir une atténuation nulle dans la bande passante, une atténuation infinie dans la bande atténuée et des transitions instantanées entraînerait une caractéristique de réponse inatteignable [1].

Par conséquent, il devient nécessaire de définir des spécifications, comprenant :

- A_{\max} : L'atténuation maximale tolérée dans la bande passante ;
- A_{\min} : L'atténuation minimale dans la bande atténuée ;
- f_p : La fréquence de coupure ;
- f_a : La fréquence de transition.

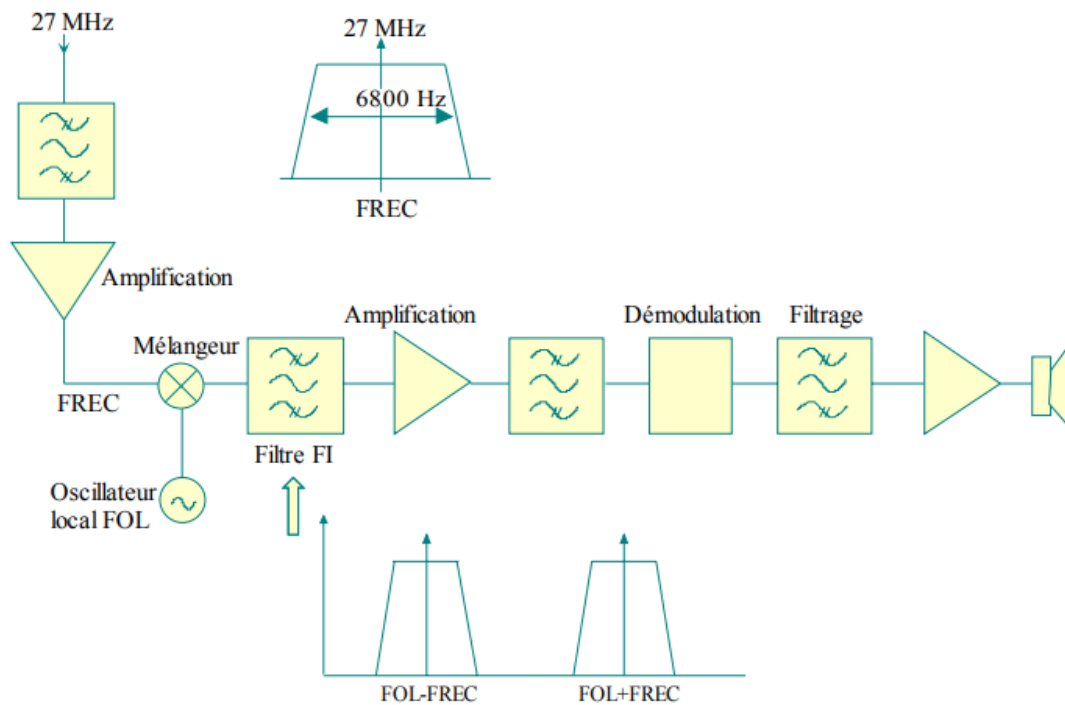


Figure I.2 - Nécessité du filtrage dans une chaîne de transmission [3].

I.3. Types de filtres

Les filtres se déclinent en plusieurs types, chacun adapté à des besoins et des applications spécifiques. Parmi les catégories courantes figurent les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande [3].

- Les **filtres passe-bas** laissent passer les fréquences en dessous d'une certaine valeur, trouvant des applications dans la réduction du bruit et la séparation des signaux ;
- Les **filtres passe-haut** laissent passer les fréquences au-dessus d'un seuil donné, utilisés notamment pour éliminer les basses fréquences indésirables ;
- Les **filtres passe-bande** permettent un intervalle de fréquences spécifique, tandis que les filtres **coupe-bande** rejettent une plage de fréquences précise.

I.3.1. Filtre passe-bas

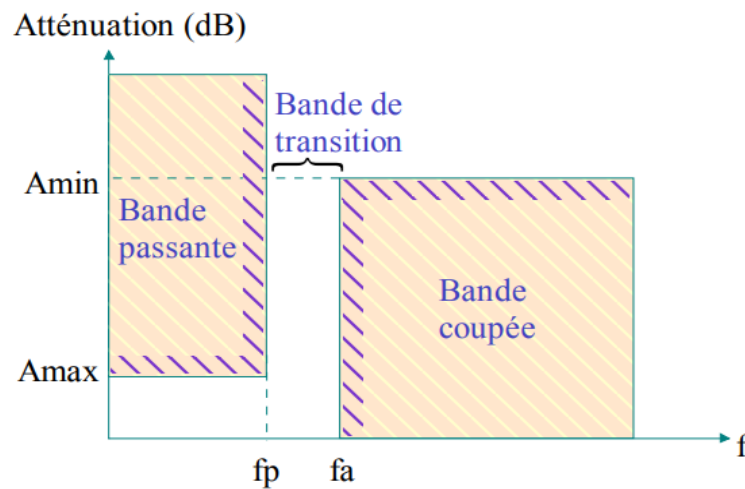


Figure I.3 - Gabarit d'un filtre passe-bas [3].

Pour un passe-bas, la notion de sélectivité est définie par :

$$k = f_p / f_a \quad \text{I.1}$$

- $k < 1$ dans le cas d'un filtre réel
 - $k = 1$ dans le cas du filtre idéal
 - k donne une indication de la largeur de la bande de transition. Plus k est grand, plus le filtre est sélectif.
- **Forme canonique d'un Filtre passe bas (1^{er} ordre)** [4]

$$H(jx) = \frac{H_0}{1 + jx} \quad \text{I.2}$$

Avec, $x = \frac{\omega}{\omega_0}$ pulsation réduite, ω_0 étant la pulsation propre.

I.3.2. Filtre passe-haut

$$k = f_a / f_p$$

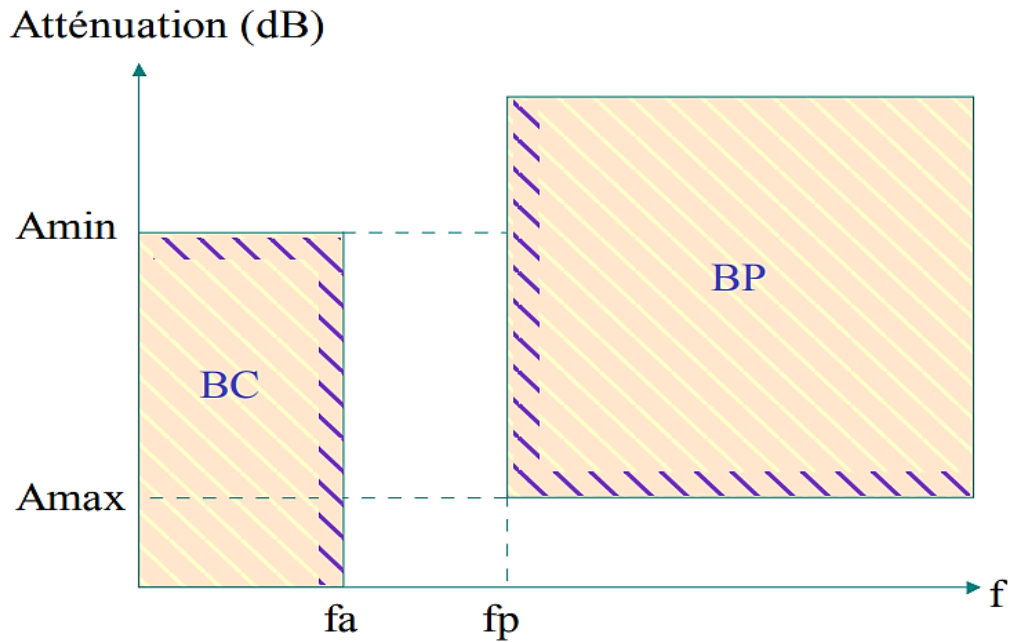


Figure I.4 - Gabarit d'un filtre passe-haut [3].

- Forme canonique d'un Filtre passe haut (1^{er} ordre) [4]

$$H(jx) = \frac{jx}{1 + jx} = \frac{H_0}{1 + \frac{1}{jx}} \quad \text{I.3}$$

I.3.3. Filtre passe-bande

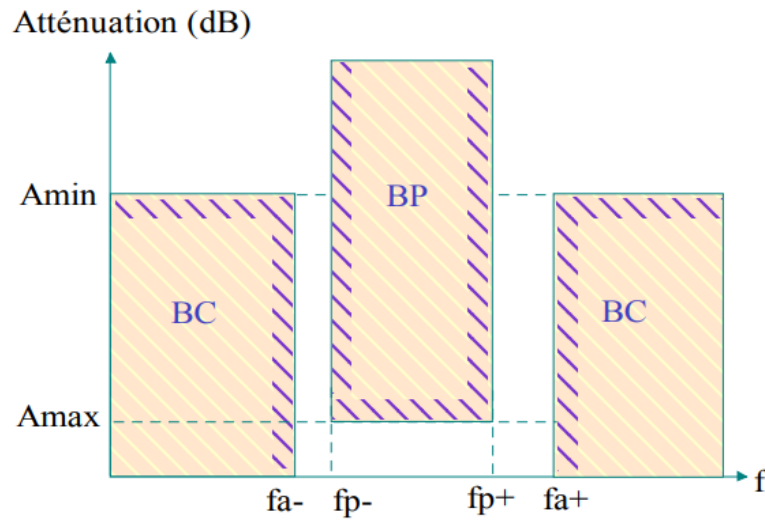


Figure I.5 - Gabarit d'un filtre passe-bande [3].

- Sélectivité

$$k = \frac{\Delta f_p}{\Delta f_a} \quad \text{I.4}$$

- Fréquence centrale :

$$f_0 = \sqrt{f_{p-} * f_{p+}} \quad (\text{Moyenne géométrique des deux fréquences de coupure})$$

- Largeur de bande

$$\Delta f_p = f_{p+} - f_{p-} \quad \text{I.5}$$

- Largeur de bande relative

$$B = \frac{\Delta f_p}{f_0} \quad \text{I.6}$$

Lors du calcul du filtre, il faut disposer d'un gabarit symétrique.

Un passe-bande est symétrique si

$$f_{a+} * f_{a-} = f_{p+} * f_{p-} = f_0^2 \quad \text{I.7}$$

- **Forme canonique d'un Filtre passe bande** [3]

$$H(jx) = \frac{j\frac{x}{Q}H_0}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}} = \frac{H_0}{1 + jQ(x - \frac{1}{x})} \quad \text{I.8}$$

Avec, Q facteur de qualité.

I.3.4. Filtre coupe-bande

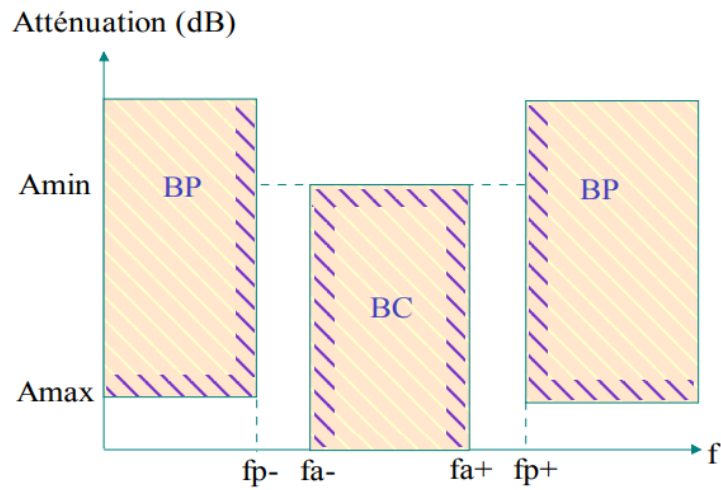


Figure I.6 - Gabarit d'un filtre coupe-bande [3].

- Sélectivité

$$k = \frac{\Delta f_a}{\Delta f_p} \quad \text{I.9}$$

- Fréquence centrale

$$f_0 = \sqrt{f_{p-} * f_{p+}} \quad (\text{Moyenne géométrique des deux fréquences de coupure})$$

- Largeur de bande relative :

$$B = \frac{\Delta f_p}{f_0} \quad \text{I.10}$$

- **Forme canonique d'un Filtre passe bande** [4]

$$H(jx) = \frac{H_0 - x^2}{1 - x^2 - j\frac{x}{Q}} \quad \text{I.11}$$

I.4. Catégories de filtres :

En règle générale, on peut classer les filtres dans deux grandes catégories distinctes [5] :

I.4.1. Filtres passifs

- **Composants** : Les filtres passifs sont composés de composants passifs tels que des résistances, des condensateurs et des bobines (inductances). Ils n'impliquent pas d'amplification active des signaux.
- **Alimentation** : Les filtres passifs n'ont pas besoin d'une source d'alimentation externe. Ils fonctionnent en exploitant les propriétés réactives des composants passifs pour atténuer ou filtrer les fréquences indésirables.
- **Amplification** : Les filtres passifs n'amplifient pas les signaux. Ils réduisent généralement l'amplitude des fréquences spécifiques en les atténuant.
- **Complexité** : Les filtres passifs sont souvent plus simples en termes de conception et de mise en œuvre par rapport aux filtres actifs.

I.4.2. Filtres actifs

- **Composants** : Les filtres actifs utilisent des composants actifs tels que des transistors, des amplificateurs opérationnels et des amplificateurs pour amplifier et manipuler les signaux.
- **Alimentation** : Les filtres actifs nécessitent une source d'alimentation externe pour alimenter les composants actifs utilisés dans leur conception.
- **Amplification** : Les filtres actifs sont capables d'amplifier les signaux. Ils peuvent atténuer ou amplifier certaines fréquences en fonction de la conception et du type de filtre.

- **Complexité** : Les filtres actifs sont souvent plus complexes à concevoir et à mettre en œuvre en raison de la présence de composants actifs et de l'amplification.
- **Flexibilité** : Les filtres actifs offrent une plus grande flexibilité dans la conception des caractéristiques de fréquence et de gain, ce qui les rend adaptés à des applications où des spécifications plus précises sont nécessaires.

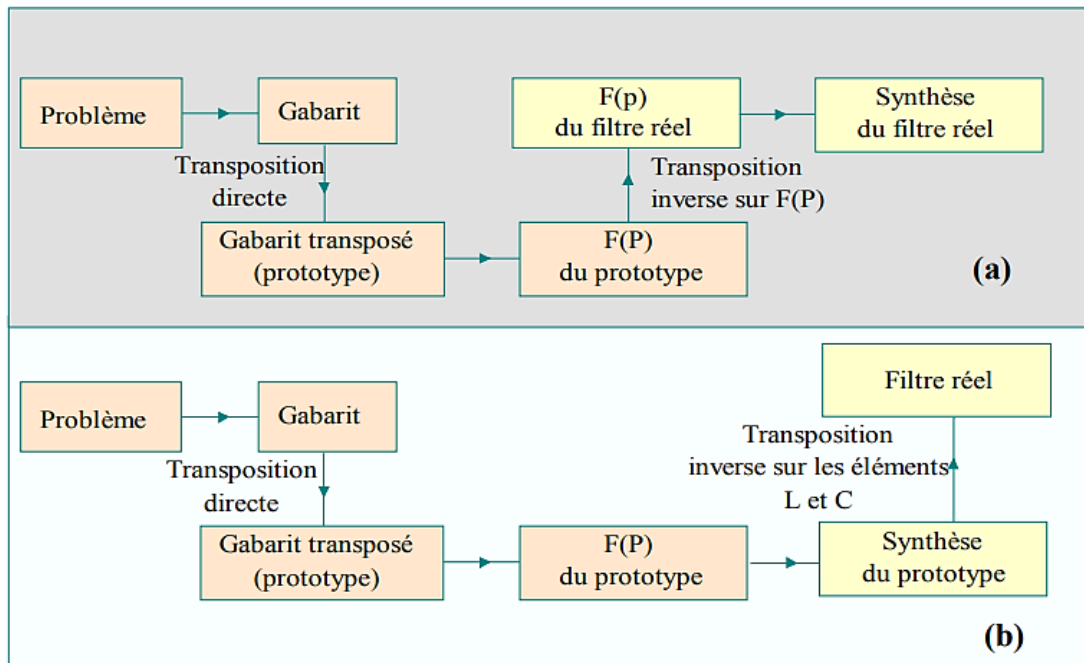


Figure I.7- Méthode de synthèse des filtres actifs (a) et passifs (b) [5].

Type de technologie	Gamme de fréquences
Filtres numériques	0 à ω_{max}
Filtres RC actifs discrets	10 Hz à 1 MHz
Filtres à condensateur commuté	10 Hz à 5 MHz
Filtres RLC passifs	0,1 MHz à 0,1 GHz
Filtres RC actifs intégrés	0,1 MHz à 15 GHz
Filtres hyperfréquences	0,5 GHz à 500 GHz

Tableau I.1 - Comparaison des technologies de filtrage.

I.5. Filtrage hyperfréquence

I.5.1. La normalisation des unités

Les termes "**norme**" ou "**standard**" font référence aux exigences techniques et aux spécifications concernant la conception et le fonctionnement d'un équipement ou d'un système dans son ensemble. Ces exigences sont établies par des organismes d'experts afin d'assurer l'uniformité et les performances [6].

Après des études minutieuses, des discussions approfondies et des tests rigoureux sur le terrain, ces organismes publient ces exigences sous forme de documents officiels. Ces organismes de normalisation opèrent à l'échelle mondiale et leur autorité est universellement reconnue.

Tous les équipements destinés à un usage public ou commercial doivent être conformes aux normes en vigueur [6].

Dans le domaine des télécommunications en particulier, la normalisation englobe les spécifications techniques des appareils, ainsi que les protocoles et les procédures de communication.

Voici une liste des organismes de normalisation les plus influents actuellement [6]:

- ❖ **L'IEEE** (Institute of Electrical and Electronics Engineers) est un puissant organisme international de professionnels dans le domaine de l'électricité et des télécommunications. Il édite des normes, y compris le standard **Wifi IEEE 802.11**.
- ❖ **L'UIT** (Union Internationale des Télécommunications), basée à Genève, coordonne les normes de télécommunications dans 193 pays via sa section UIT-T.
- ❖ **L'IETF** (Internet Engineering Task Force), fondé en 1986, est l'autorité mondiale informelle des normes Internet, éditées sous forme de documents RFC (Request For Comment).
- ❖ **L'ISO** (International Organisation for Standardization) est une organisation indépendante couvrant divers domaines de l'ingénierie, y compris les télécommunications.



Figure I.8- Les organismes de normalisation les plus influents

Les fréquences hyperfréquences englobent une vaste gamme, allant de gigahertz (GHz) à terahertz (THz), ce qui peut rendre les valeurs numériques complexes et potentiellement confuses.

La normalisation implique d'exprimer les valeurs de fréquence, de bande passante, de temps et d'autres paramètres dans des unités standardisées, facilitant ainsi les calculs et les comparaisons. Cette pratique simplifie la manipulation des données, en éliminant les multiples ordres de grandeur et en permettant une représentation cohérente.

I.5.1.1. Normalisation de l'unité de fréquence

Lors du processus de conception des filtres, il est essentiel de normaliser les unités de fréquence afin de parvenir à des valeurs standardisées qui faciliteront les calculs et les comparaisons entre différents filtres [7]. Cette normalisation repose sur la fréquence normalisée, notée " f ", qui est définie en fonction de la fréquence caractéristique " F " et de la fréquence de référence " F_u ".

Pour les filtres passe-bas et passe-haut, la fréquence de référence " F_u " est choisie comme étant la dernière fréquence à laquelle le filtre laisse passer les signaux sans atténuation significative.

Dans ce cas, la fréquence normalisée " f " est exprimée comme le quotient entre la fréquence caractéristique " F " du filtre en question et la fréquence de référence " F_u " [7] :

$$f = \frac{F}{F_u} \quad \text{I.12}$$

En revanche, pour les filtres passe-bande ou coupe-bande, où l'objectif est de laisser passer une bande spécifique de fréquences, la fréquence centrale " F_o " est cruciale. Cette fréquence centrale est choisie de manière à correspondre à la moyenne géométrique des deux fréquences de coupure " F_{c1} " et " F_{c2} ", délimitant la bande souhaitée. Ainsi, dans ces cas-là, la fréquence de référence " F_u " est équivalente à la fréquence centrale " F_o " :

$$F_u = F_o = \sqrt{F_{c1}F_{c2}} \quad \text{I.13}$$

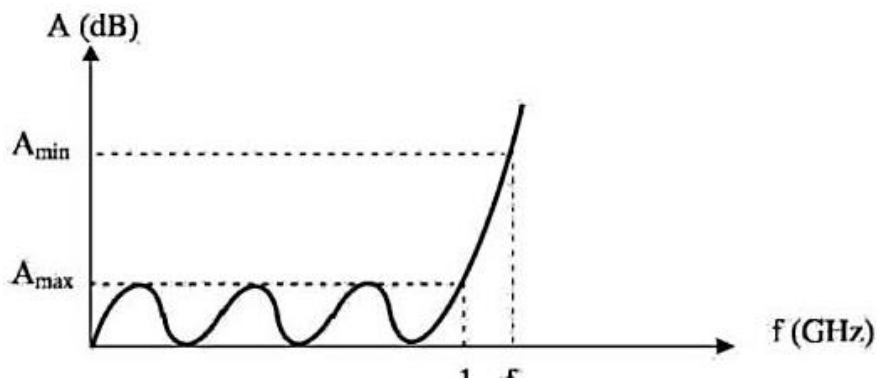


Figure I.9 - Réponse d'un filtre passe bas exprimée en fonction de la fréquence normalisée [8].

I.5.1.2. Normalisation de l'unité d'impédance

Lorsqu'il s'agit de normaliser les unités d'impédance dans le contexte de la conception de filtres, nous utilisons une valeur spécifique appelée " R_0 " comme référence.

Cette valeur joue le rôle d'unité d'impédance, et la normalisation est réalisée en rapport à l'impédance de charge " R_L ".

Cette démarche permet de simplifier les calculs et d'harmoniser les valeurs d'impédance, ce qui est essentiel pour assurer une comparabilité efficace entre différents filtres [9].

❖ Les unités couramment utilisées en télécommunication incluent [10]

- **Hertz (Hz)** : Mesure de la fréquence des signaux.
- **Bit (b)** : Unité fondamentale de l'information binaire.
- **Byte (B)** : Groupe de 8 bits, utilisé pour représenter des données.
- **Baud** : Nombre de symboles transmis par seconde dans une modulation.
- **dB (décibel)** : Mesure logarithmique du rapport entre deux puissances ou tensions.
- **dBm (décibel milliwatt)** : Mesure de la puissance par rapport à 1 milliwatt.
- **bps (bits par seconde)** : Taux de transfert binaire.
- **bps/Hz (bits par seconde par hertz)** : Mesure de l'efficacité spectrale.
- **kHz, MHz, GHz, THz** : Préfixes pour indiquer les multiples de Hertz.

I.5.2. Dénormation et changement de variables ou de fréquence

Après la conception du filtre passe-bas normalisé, qui est défini par les valeurs des bobines L_n et des condensateurs C_n , il est possible d'élaborer la conception de tout type de filtre en adaptant ses caractéristiques pour une fréquence centrale ω_0 spécifique, une plage de fréquences de référence ($\omega_2 - \omega_1$) donnée, et une impédance de charge R_L appropriée [11].

Le tableau I.2 contient les schémas de transformation qui facilitent la conception de filtres dont les courbes d'amplitude et les durées de transition sont déterminées à partir des courbes similaires des filtres passe-bas normalisés, en effectuant des modifications de variables [8].

Cette approche repose sur des changements de variables et des ajustements de fréquence qui ouvrent la voie à la conception de filtres personnalisés, adaptés aux besoins spécifiques, tout en capitalisant sur les informations fournies par les filtres passe-bas normalisés.

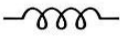
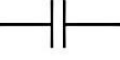
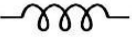
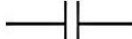
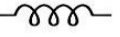
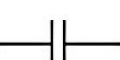


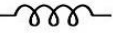
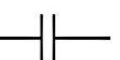

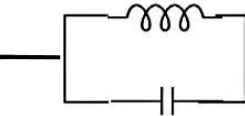
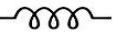
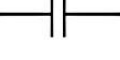
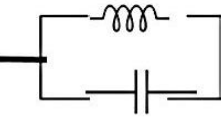
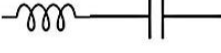
Elément de synthèse d'un filtre passe bas normalisé	Eléments équivalents d'un filtre quelconque ayant une même fonction de base		
L_n  C_n 	 	$L = L_n \frac{R_L}{\omega_c}$ $C = C_n \frac{1}{R_L \omega_c}$	Passe bas R_L et ω_c
 	 	$C = \frac{1}{L_n R_L \omega_c}$ $L = \frac{R_L}{C_n \omega_c}$	Passe haut R_L et ω_c
 	 	$\begin{cases} L_p = L_n \frac{R_L}{2\Delta\omega} \\ L_p C_s \omega_0^2 = 1 \end{cases}$ $\begin{cases} C_s = C_n \frac{1}{2\Delta\omega R_L} \\ L_p C_s \omega_0^2 = 1 \end{cases}$	Passe bande R_L, ω_0 et $\Delta\omega$ $\Delta\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}$
 	 	$\begin{cases} C_s = \frac{1}{2L_n \Delta\omega R_L} \\ L_p C_s \omega_0^2 = 1 \end{cases}$ $\begin{cases} C_s = \frac{1}{2C_n \Delta\omega} \\ L_p C_s \omega_0^2 = 1 \end{cases}$	Coupe bande $R_L, \omega_0, \Delta\omega$

Tableau I.2 - Dénormalisation et changement de variables [8].

Les filtres hyperfréquences sont essentiels dans les systèmes de télécommunication modernes, permettant aux applications variées (audio, vidéo, télécommunications,

instrumentation, radars) de partager et d'optimiser l'utilisation limitée du spectre. Le filtrage d'un signal consiste à contrôler les fréquences dans une bande spécifique, en sélectionnant les composantes souhaitées et en isolant celles indésirables.

Les systèmes de filtrage hyperfréquences jouent un rôle clé, notamment à la réception et au niveau des multiplexeurs d'entrée (IMUX) et de sortie (OMUX). La technologie et les spécifications du filtre peuvent varier en fonction de sa position et de ses exigences.

I.5.3. Evolution vers un filtre hyperfréquence

Les filtres électriques ont émergé comme des éléments fondamentaux des premiers circuits électroniques, visant à sélectivement atténuer ou amplifier des signaux dans certaines bandes de fréquences.

Leur conception initiale était principalement axée sur les fréquences audio et radio. Cependant, l'avènement des applications de télécommunication à haute fréquence a exigé une évolution vers des filtres hyperfréquence plus sophistiqués [10].

Cette transition s'est accompagnée du passage des composants passifs aux actifs et a été motivée par la nécessité d'optimiser la performance dans des domaines tels que les communications sans fil, les radars et les satellites.

Les filtres hyperfréquences ont ainsi pris une importance croissante, définissant les contours de la connectivité moderne et jouant un rôle crucial dans la gestion et la manipulation des signaux à des fréquences de plus en plus élevées.

I.5.4. Cahier de charges du filtre

Voici les éléments typiquement inclus dans un cahier des charges pour un filtre électrique/électronique [11] :

- ❖ **Objectif et contexte** : Une introduction expliquant le but du filtre, son rôle dans le système global, et le contexte dans lequel il sera utilisé.
- ❖ **Type de filtre** : Spécification du type de filtre nécessaire, comme un filtre passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande,... etc.

❖ **Caractéristiques de fréquence**

Préciser la (ou les) fréquence(s) de coupure **f_c** désirée (s).

- Les valeurs limites de la bande passante **f_p** et bande atténuée **f_a** .
- Les valeurs permises des ondulations en bande passante **dp** et atténuée **da**
- La largeur de la zone de transition **Δf** permise.
- Eventuellement l'ordre maximal permis.

- ❖ **Atténuation/Amplification** : Exigences concernant le niveau d'atténuation des fréquences indésirables ou l'amplification des fréquences souhaitées.
- ❖ **Impédance de Charge** : Spécification de l'impédance de charge à laquelle le filtre sera connecté.
- ❖ **Stabilité** : Exigences pour la stabilité du filtre, en évitant les oscillations ou les comportements instables.
- ❖ **Distorsion** : Limites sur la distorsion harmonique ou non linéaire admise par le filtre.
- ❖ **Tolérances** : Plages acceptables de variation pour les paramètres du filtre, en tenant compte des variations dues aux composants et aux conditions environnementales.

Le filtre à réaliser doit être le plus proche possible des caractéristiques du signal émis.

Une caractéristique importante et non négligeable de ce filtre est la nécessité d'atténuer les remontées parasites au-delà de 20 dB jusqu'à 6 GHz. Le filtre doit en effet à la fois supprimer le bruit basse fréquence de rétrodiffusion, mais également le bruit blanc généré dans le photomultiplicateur et ce sur toute la bande passante du dispositif d'acquisition. Nous n'avons pas de contraintes concernant l'encombrement ni la puissance du signal RF puisque nos signaux sont très faibles. L'environnement étant très bruité électro-magnétiquement, le filtre devra être placé dans un boîtier faisant office de cage de Faraday. Les connectiques seront de type SMA avec une impédance d'entrée/sortie de 50 [8].

I.5.5. Fondements Théoriques et Concepts Clés des Filtres Hyperfréquence

- Fréquence, Bande Passante et Réponse en Fréquence :

Les filtres hyperfréquence opèrent dans des gammes de fréquences élevées, nécessitant une compréhension profonde des propriétés spectrales des signaux. La fréquence centrale et la largeur de bande jouent un rôle clé dans la conception et la performance des filtres, influençant leur capacité à sélectionner ou rejeter certaines fréquences [12].

- Propriétés et Limitations

Les filtres hyperfréquence présentent des caractéristiques uniques, notamment des pertes de transmission, des réflexions et des distorsions qui deviennent plus prédominantes à mesure que les fréquences augmentent. L'efficacité de filtration dépend de la topologie du filtre et des paramètres de conception, ce qui peut conduire à des compromis entre sélectivité et pertes [12]

- Caractéristiques électromagnétiques

À des fréquences hyperfréquences, les effets capacitifs, inductifs et de rayonnement deviennent significatifs, nécessitant une modélisation précise des composants. Les circuits imprimés et les matériaux diélectriques jouent un rôle crucial dans la conception, car ils peuvent introduire des pertes et des résonances indésirables [12].

I.6. Utilisations des filtres hyperfréquences

I.6.1. Les applications clés des filtres hyperfréquences

Les filtres hyperfréquences revêtent une importance cruciale dans divers domaines de télécommunication en raison de leur rôle fondamental dans la gestion des signaux à haute fréquence. Les communications sans fil, par exemple, tirent parti des filtres hyperfréquence pour sélectionner et filtrer des signaux dans des bandes de fréquences spécifiques, améliorant ainsi la qualité de la transmission et la résistance aux interférences [12].

Dans les systèmes de radars, les filtres hyperfréquence sont utilisés pour filtrer les échos de retour, permettant une meilleure résolution et une détection plus précise des objets. De plus,

les satellites de télécommunication exploitent les filtres hyperfréquence pour séparer les signaux émis et reçus dans différentes bandes de fréquences, optimisant ainsi l'utilisation du spectre et la fiabilité des communications spatiales.

Cependant, l'intégration de filtres hyperfréquence dans des systèmes complexes requiert une attention particulière aux compromis entre sélectivité, pertes et distorsions. Des techniques de modélisation avancées et des méthodes de conception assistées par ordinateur sont utilisées pour garantir l'optimisation des performances globales des systèmes [13].

❖ Exemples [13]

- Les filtres hyperfréquence dans les réseaux 5G assurent une meilleure isolation entre les canaux de communication, améliorant la qualité des services sans fil.
- Les radars météorologiques utilisent des filtres hyperfréquence pour rejeter les signaux indésirables et détecter avec précision les précipitations.
- Les satellites de navigation par GPS utilisent des filtres hyperfréquence pour séparer les signaux émis par différents satellites, facilitant une localisation précise.

L'adaptation judicieuse des filtres hyperfréquence à des applications spécifiques reste essentielle pour optimiser les performances des systèmes de télécommunication modernes.

I.6.2. Avantages des filtres [12]

- **Séparation des signaux souhaités des signaux indésirables:** les filtres permettent de filtrer les signaux indésirables et de ne laisser passer que les signaux souhaités.
- **Amélioration de la qualité du signal:** les filtres peuvent réduire le bruit et les interférences, ce qui améliore la qualité du signal.
- **Protection des composants:** les filtres peuvent protéger les composants sensibles contre les surcharges et les dommages.
- **Sélectivité améliorée :** Les filtres, en particulier les filtres hyperfréquence, offrent une sélectivité accrue pour filtrer précisément les fréquences indésirables, garantissant une meilleure qualité de signal.

- **Optimisation de la performance** : Les filtres hyperfréquence permettent une optimisation poussée pour répondre aux besoins spécifiques des applications de télécommunication, améliorant la qualité de la transmission.
- **Compact et léger**: les filtres hyperfréquence sont généralement plus compacts et plus légers que les filtres traditionnels, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant des espaces restreints.
- **Large bande passante**: les filtres hyperfréquence offrent une large bande passante, ce qui permet de transmettre un large éventail de fréquences simultanément.

I.6.3. Inconvénients des filtres [12]

- **Atténuation du signal**: les filtres peuvent atténuer le signal, ce qui peut entraîner une perte de puissance.
- **Distorsion du signal**: dans certains cas, les filtres peuvent provoquer une distorsion du signal, ce qui peut affecter la qualité et l'intégrité du signal en raison des réponses en phase et en amplitude non idéales.
- **Pertes de transmission** : Les filtres introduisent inévitablement des pertes de transmission, affectant la puissance du signal de sortie.
- **Complexité de conception** : Les filtres hyperfréquence exigent une conception complexe en raison des propriétés électromagnétiques à haute fréquence, augmentant la difficulté et les coûts de mise en œuvre.

I.7. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a posé les bases essentielles pour une compréhension approfondie des filtres en général et les filtres hyperfréquences spécifiquement. Nous avons exploré la diversité des types de filtres, de la théorie des filtres idéaux aux applications réelles. En passant des filtres passifs aux filtres actifs, nous avons établi un cadre complet pour le filtrage hyperfréquence.

En abordant les avantages et inconvénients, ainsi que les applications clés des filtres hyperfréquence, nous avons tracé une voie vers une maîtrise accrue de cette discipline cruciale en télécommunication. Ce chapitre jette ainsi les bases pour des développements ultérieurs dans la conception et l'optimisation de systèmes hyperfréquence sophistiqués.

Chapitre II

Filtres Hyperfréquence : Étude
et Applications

II.1. Introduction :

Ce chapitre vise à offrir une exploration approfondie des concepts fondamentaux relatifs aux filtres hyperfréquences, ainsi qu'à illustrer leurs applications pratiques au sein de diverses infrastructures de communication.

Ce chapitre abordera les méthodes classiques de conception de filtres, offrant un aperçu détaillé des approches tant analogiques que numériques. Ce chapitre offrira une compréhension approfondie des méthodologies de conception, notamment à travers les filtres Butterworth et Chebyshev, ainsi que des techniques avancées qui marquent des avancées significatives dans ce domaine.

Cette exploration fournira une base solide pour une compréhension approfondie des concepts essentiels et des pratiques novatrices, préparant ainsi le terrain pour des développements futurs dans le domaine en constante évolution des communications hyperfréquences.

II.2. Fonction de transfert

II.2.1. Représentation d'une fonction de transfert : diagramme de Bode

Généralement, on définit alors, pour un filtre (quadripôle) et une charge donnés [5] :

$$\text{La fonction de transfert :} \quad H(j\omega) = \frac{u_s}{u_e} = \frac{S}{E} \quad \text{II.1}$$

$$\text{Le gain:} \quad G(j\omega) = |H(j\omega)| = \frac{|S|}{|E|} \quad \text{II.2}$$

$$\text{Le gain en décibel :} \quad G_{\text{dB}}(\omega) = 20 \log |H(j\omega)| \quad \text{II.3}$$

$$\text{Le déphasage entre l'entrée et la sortie} \quad \varphi(\omega) = \arg H(j\omega) = \varphi_s - \varphi_e \quad \text{II.4}$$

Le diagramme de Bode consiste à représenter en fonction de $\log \omega$ (voire $\log x$ lorsqu'on peut définir une pulsation réduite) :

- Le gain en décibel $G_{\text{dB}}(\omega)$,
- Le déphasage $\varphi(\omega)$.

À noter que l'intervalle qui sépare ω et $10x\omega$ est appelé une *décade*. La pente d'une courbe

de gainen dB est donc exprimée en dB/déc.

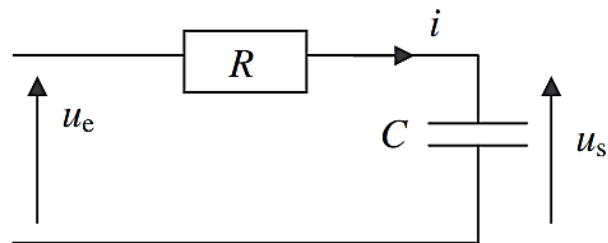
II.2.2. Filtres linéaires [14]

Un filtre est un quadripôle dont la fonction de transfert dépend de ω . Un filtre passif (par opposition à un filtre actif) ne contient que des dipôles passifs et ne fournit pas d'énergie au signal d'entrée.

II.2.2.1. Filtres d'ordre 1

■ Filtre passe-bas d'ordre 1

Exemple de circuit réalisant un tel filtre



Fonction de transfert

$$\underline{H}(j\omega)$$

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

II.5

Fonction de transfert

$$\underline{H}(jx)$$

$$\underline{H}(jx) = \frac{1}{1 + jx}$$

II.6

Argument de $\underline{H}(jx)$

$$\varphi(x) = -\arg(1 + jx) = -\arctan x$$

II.7

Pulsation de coupure

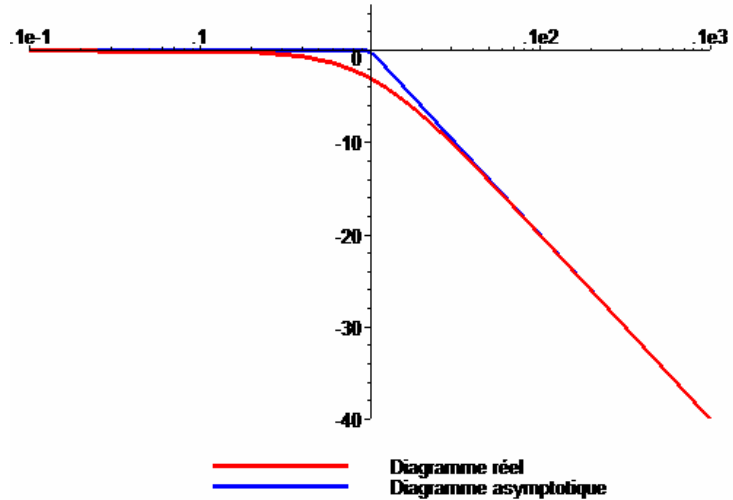
$$\omega_c = \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

II.8

Bande passante

$$[0, \omega_0]$$

Allure du diagramme de Bode du gain en dB en fonction de log x

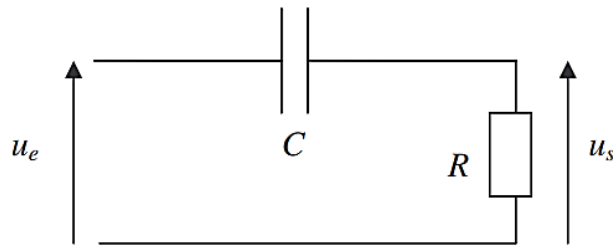


Forme générale de la fonction de transfert d'un filtre passe bas d'ordre 1

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{H_0}{1 + jx} \quad \text{II.9}$$

■ Filtre passe-haut d'ordre 1

Exemple de circuit réalisant un tel filtre



Fonction de transfert $\underline{H}(j\omega)$

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega} \quad \text{II.10}$$

Fonction de transfert $\underline{H}(jx)$

$$\underline{H}(jx) = \frac{jx}{1 + jx} \quad \text{II.11}$$

Argument de $\underline{H}(jx)$

$$\varphi(x) = \frac{\pi}{2} - \arg(1 + jx) = \arctan \frac{1}{x} \quad \text{II.12}$$

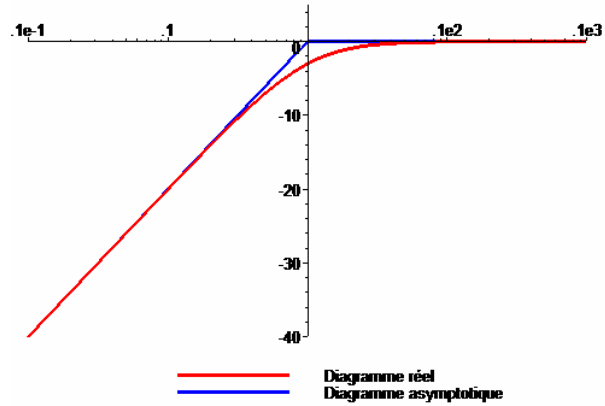
Pulsation de coupure

$$\omega_c = \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad \text{II.13}$$

Bande passante

$$[\omega_0; +\infty[\quad \text{II.14}$$

Allure du diagramme de Bode du gain en dB en fonction de $\log x$



Forme générale de la fonction de transfert d'un filtre passe-haut d'ordre 1

$$H(j\bar{\Gamma}^{\%00}) = H_0 \frac{j \bar{\Gamma}^{\%00}}{1 + j \bar{\Gamma}^{\%00}} = H_0 \frac{j_x}{1 + j_x} \quad \text{II.15}$$

Pour les filtres de 1^{er} ordre, On obtient le diagramme suivant :

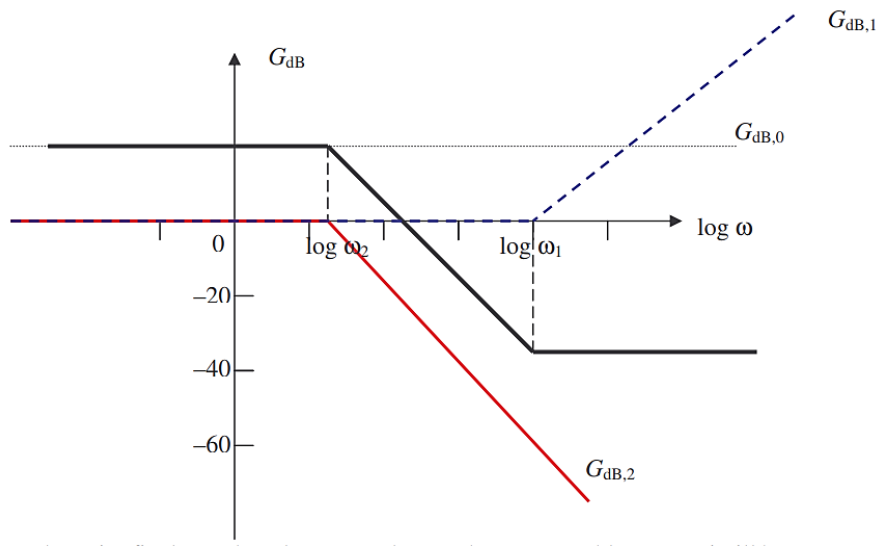


Figure I.7 - La courbe noire finale est donc la somme des courbes rouge et bleue en pointillés.

On procède de même pour le diagramme de Bode de la phase

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= \arg \underline{H} \\ &= \varphi_0(\omega) + \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) \\ &= \arg H_0 + \arg \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_1} \right) - \arg \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_2} \right) \end{aligned}$$

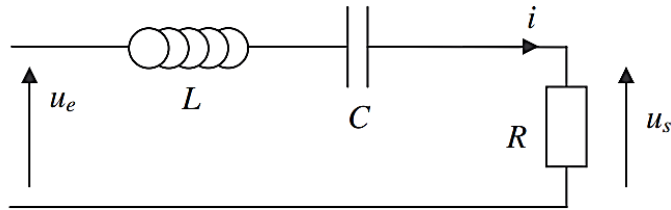
$$\begin{aligned} \forall \omega : \varphi_0(\omega) &= 0 \\ \omega \ll \omega_1 : \varphi_1(\omega) &= 0 \\ \omega \gg \omega_1 : \varphi_1(\omega) &= \frac{\pi}{2} \\ \omega \ll \omega_2 : \varphi_2(\omega) &= 0 \\ \omega \gg \omega_2 : \varphi_2(\omega) &= -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

avec

II.2.2.2. Filtres d'ordre 2

■ Filtre passe-bande

Exemple de circuit réalisant un tel filtre



Fonction de transfert $\underline{H}(j\omega)$

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 + j \left(\frac{L\omega}{R} - \frac{1}{RC\omega} \right)} \quad \text{II.16}$$

Fonction de transfert $\underline{H}(jx)$

$$\underline{H}(jx) = \frac{1}{1 + jQ \left(x - \frac{1}{x} \right)} \quad \text{avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; x = \frac{\omega}{\omega_0} \text{ et } Q = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{L\omega_0}{R} \quad \text{II.17}$$

Argument de $\underline{H}(jx)$

$$\varphi(x) = -\arctan \left[Q \left(x - \frac{1}{x} \right) \right] \quad \text{II.18}$$

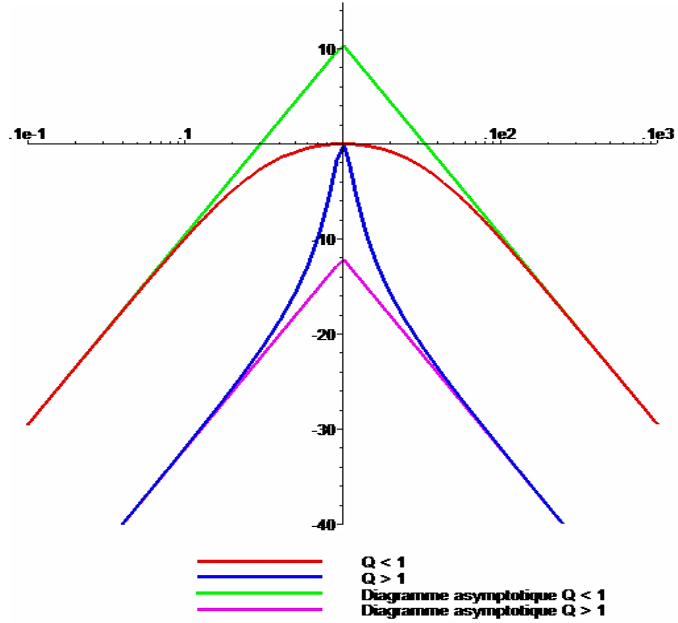
Pulsations de coupure

$$x_{2c} = \frac{1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{4Q^2} + 1} \quad \text{et} \quad x_{1c} = -\frac{1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{4Q^2} + 1} \quad \text{II.19}$$

Bande passante

$$\omega_{2c} - \omega_{1c} = (x_{2c} - x_{1c})\omega_0 = \frac{\omega_0}{Q} \quad \text{II.20}$$

Allure du diagramme de Bode du gain en dB en fonction de $\log x$

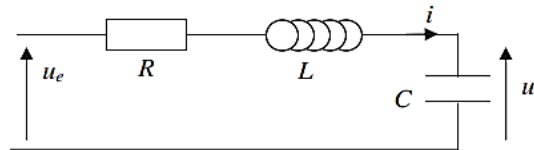


Forme générale de la fonction de transfert d'un filtre passe-bande

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = \frac{H_0}{1 + jQ\left(x - \frac{1}{x}\right)} \quad \text{II.21}$$

■ Filtre passe-bas d'ordre 2 :

Exemple de circuit réalisant un tel filtre



Fonction de transfert

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 - LC\omega^2 + jRC\omega} \quad \text{II.22}$$

Fonction de transfert

$$\underline{H}(jx) = \frac{1}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}} \quad \text{avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; x = \frac{\omega}{\omega_0} \text{ et } Q = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{L\omega_0}{R} \quad \text{II.23}$$

Argument de $\underline{H}(jx)$

$$\varphi(x) = -\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{Q(x^2 - 1)}{x} \quad \text{II.24}$$

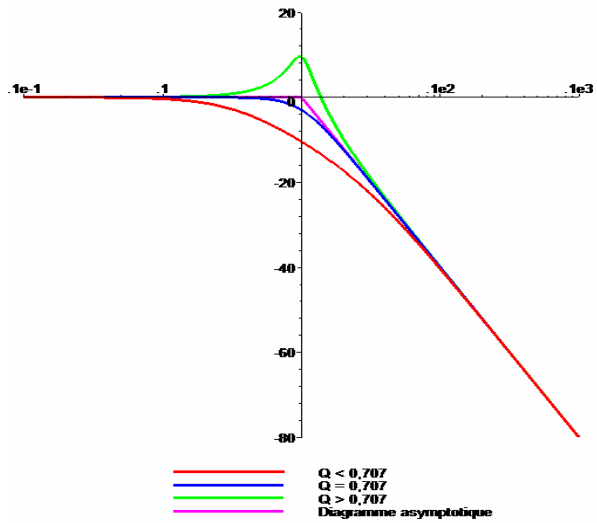
Argument de $\underline{H}(jx)$

$G_{dB}(x)$ présente un maximum en $x = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$ si $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$. On a alors

Variations de G_{dB}

$$G_{dB,max} = 10 \log \left(\frac{4Q^4}{4Q^2 - 1} \right). \text{ Si } Q < \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ alors } G_{dB}(x) \text{ est strictement décroissante.} \quad \text{II.25}$$

Allure du diagramme de Bode du gain en dB en fonction de $\log x$



Forme générale de la fonction de transfert d'un filtre passe bas d'ordre 2

$$H(j\omega) = \frac{H_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \frac{\omega}{Q\omega_0}} = \frac{H_0}{1 - x^2 + j \frac{x}{Q}}$$

II.26

■ Filtre coupe bande (ou rejecteur)

On donne, à titre documentaire, la forme de la fonction de transfert d'un tel filtre ainsi que l'allure du diagramme de Bode du gain en dB pour un filtre coupe bande.

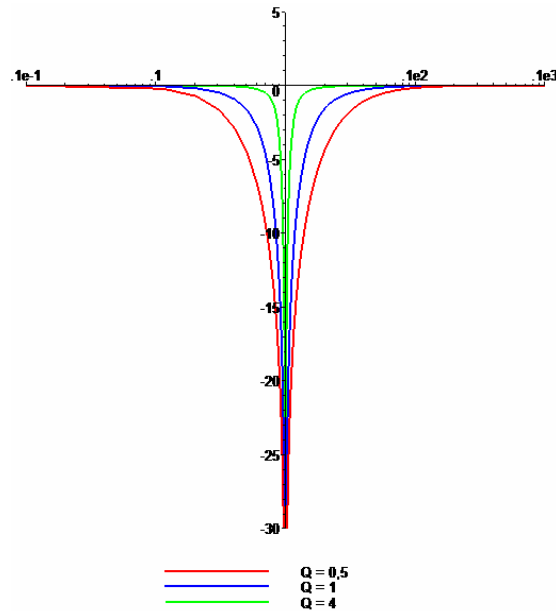
Fonction de transfert

$\underline{H}(jx)$

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \frac{\omega}{Q\omega_0}} = \frac{H_0}{1 - x^2 + j \frac{x}{Q}}$$

II.27

Allure du
diagramme
deBode du
gain en dB
en
fonction
de $\log x$



II.3. Transposition de fréquence

II.3.1. Notions nécessaires

• Canal de transmission

Une communication est, au sens large, un transfert d'information d'une source vers un destinataire, à travers un milieu appelé canal.

- Caractéristiques d'un canal de transmission

- **Support physique** : câble coaxial, paires torsadées, fibre optique, ondes hertziennes
- **Canal idéal** : le canal devrait être transparent (pas d'interférence sur l'information transmise)
- **Canal réel** : déformation des signaux (distorsions), perturbations indésirables (diaphonie, bruit), atténuations des signaux
- **Codage de canal** : pour se protéger des imperfections du canal (codage AMI, CMI, HDB3,...)
- **Capacité du canal** : débit binaire D en bits/s, ou M en bauds (rapidité de modulation)
- Canal permettant la transmission en simplex, ou en half-duplex, ou en duplex (à définir).

- **Transmission en bande de base** : La transmission est dite « en bande de base » si les signaux sont transmis tels qu'ils sortent du transducteur de la source, c'est-à-dire dans leur bande de fréquence originale. Exemples : voix, sons, signaux vidéo,...

II.3.2. Concept de transposition en fréquence [14]

La transposition de fréquences est une technique essentielle qui permet d'analyser n'importe quel type de filtre en se basant sur un modèle de référence appelé "prototype". Cette approche de transposition englobe à la fois les caractéristiques de réponse en fréquence, les fonctions de transfert et les composants constitutifs du filtre.

Lorsque nous parlons de transposition de fréquences, nous faisons référence à la possibilité de transférer les propriétés et les caractéristiques du filtre prototype vers d'autres configurations de filtres.

Cette technique est particulièrement utile car elle permet d'adapter un filtre de référence aux besoins spécifiques d'une application donnée.

Plus précisément, lorsqu'un filtre prototype est construit à partir d'éléments passifs tels que des résistances, des condensateurs et des bobines, les filtres résultants des transpositions sont obtenus en appliquant des transformations aux éléments dépendant de la fréquence.

Ces transformations sont cruciales pour ajuster les paramètres du filtre aux exigences de la conception tout en maintenant les caractéristiques fondamentales du filtre prototype.

La normalisation des grandeurs se fait par rapport à l'impédance de charge R_L , supposée identique pour le filtre et par rapport à la pulsation de coupure ω , pour le passe haut, ($\omega c1$, $\omega c2$) pour le passe bande et le coupe bande [12].

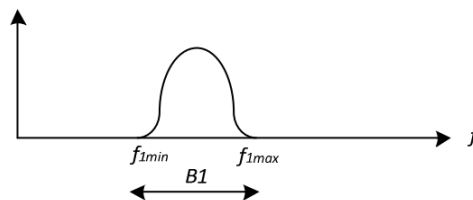


Figure II.1 - Transposition Spectrale : Exploration des Fréquences et Bande de Base

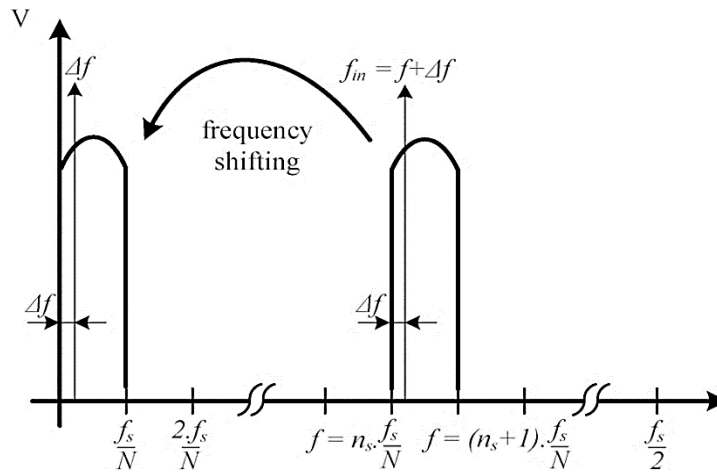


Figure II.2 - Déplacement de fréquence en bande de base.

II.3.2.1. Transposition passe bas - passe haut

Cette opération réalise une conversion entre les composants inductifs et capacitifs, inversant leurs rôles respectifs.

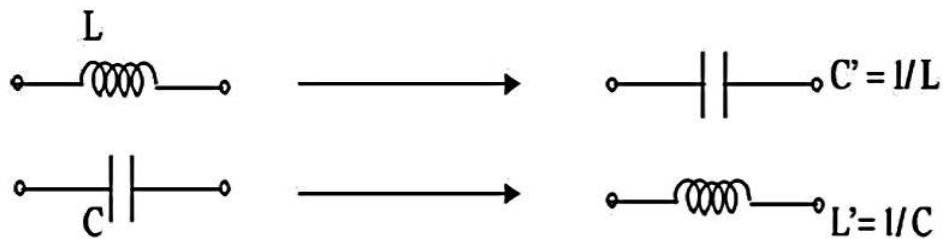


Figure II.3 - Transposition passe bas - passe haut [15]

II.3.2.2. Transposition passe bas-passe bande

Lorsqu'il est nécessaire de créer un filtre à bande passante limitée, ce dernier est défini par deux fréquences de coupure, à savoir ω_{c1} et ω_{c2} . Chacune des fréquences caractéristiques du filtre prototype entraîne la naissance de deux fréquences spécifiques dans la plage de bande passante.

En utilisant cette technique, une inductance est convertie en un circuit résonant, tandis qu'une capacité se métamorphose en un circuit résonant parallèle.

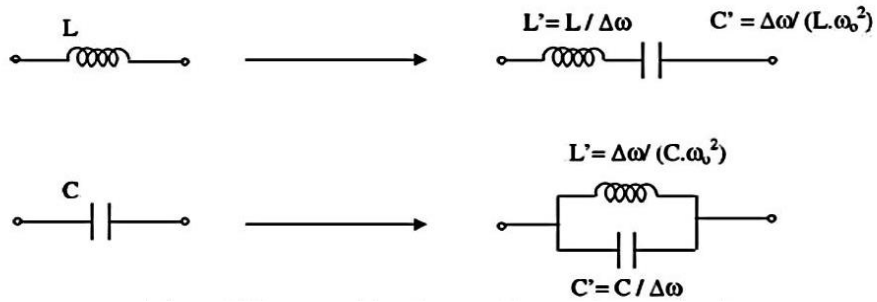


Figure II.4 - Transposition du passe bas vers le passe bande [15]

La transposition passe bas-passe bande transforme une inductance en un circuit résonnant et une capacité en un résonnant parallèle.

Où: $\Delta\omega = \omega_{c1} - \omega_{c2}$

et $\omega_0 = \sqrt{\omega_{c1} \cdot \omega_{c2}}$

II.3.2.3. Transposition passe bas-coupe bande

Cette transposition est analogue à la précédente. Le filtre souhaité a une bande infinie à l'exception d'une bande limitée par deux fréquences de coupures ω_{c1} et ω_{c2} .

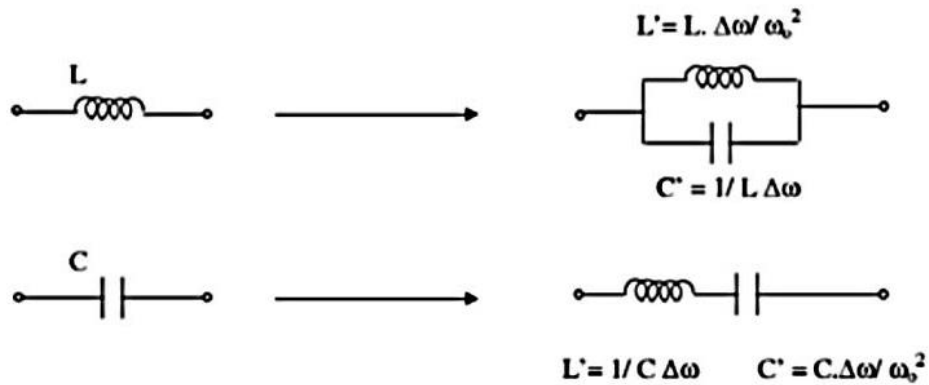


Figure II.5 - Transposition passe bas -coupe bande

A l'inverse de la précédente, cette transposition transforme une inductance et un circuit résonnant parallèle et une capacité en un circuit résonnant série.

II.4. Méthodes classiques de conception de filtres (approches analogique et numérique)

Les méthodes classiques de conception de filtres comprennent diverses approches utilisées dans le domaine de l'ingénierie électronique pour concevoir des filtres analogiques et numériques.

Ces méthodes sont essentielles pour créer des circuits qui peuvent sélectivement permettre le passage des signaux dans des gammes de fréquences particulières tout en atténuant les autres fréquences indésirables.

Cette partie fournira des détails sur les différentes approches de conception analogique et numérique des filtres, ainsi que des exemples de références fiables qui abordent ces sujets.

II.4.1. Approches de conception de filtres

- **Analogique**

Les approches de conception analogique de filtres sont basées sur la manipulation des signaux analogiques. Ces méthodes utilisent des composants électroniques tels que des résistances, des condensateurs et des inductances pour créer des filtres avec des caractéristiques spécifiques [16].

- **Numérique**

Les approches de conception numérique de filtres se concentrent sur la manipulation des signaux numériques et utilisent des algorithmes numériques pour réaliser des filtres [17]. Ces méthodes sont couramment utilisées dans le traitement numérique du signal et offrent une flexibilité et une précision accrues par rapport aux filtres analogiques [18].

- **Comparaison des approches analogique et numérique**

Une comparaison approfondie des approches de conception analogique et numérique des filtres permet de comprendre les avantages et les limitations de chaque méthode [19]. Cette comparaison porte sur des aspects tels que la complexité de conception, la précision du filtrage, la linéarité de la phase, la stabilité du filtre,... etc [20].

II.4.2. Méthodes classiques de conception de filtres (Butterworth, Chebyshev, etc.)

Les méthodes classiques de conception de filtres constituent une approche fondamentale utilisée dans le domaine du génie électronique pour concevoir des filtres analogiques et numériques. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées, on retrouve les filtres Butterworth et Chebyshev.

Ces deux méthodes permettent de spécifier et de réaliser des filtres répondant à des caractéristiques spécifiques telles que la pente de coupure, l'atténuation des fréquences indésirables et la linéarité de la phase.

II.4.2.1. Filtres Butterworth

Le filtre Butterworth, développé par l'ingénieur anglais Stephen Butterworth, est un type de filtre qui présente une réponse en fréquence maximale de plate (ou maximale de pente de coupure) avec une atténuation progressive à partir de la fréquence de coupure [21].

Il s'agit d'un filtre optimal en termes de réponse en fréquence plate dans la bande passante et d'atténuation régulière hors de la bande passante.

Les filtres Butterworth sont largement utilisés dans les applications audio, les communications sans fil et d'autres systèmes où une réponse en fréquence plate est souhaitée [20].

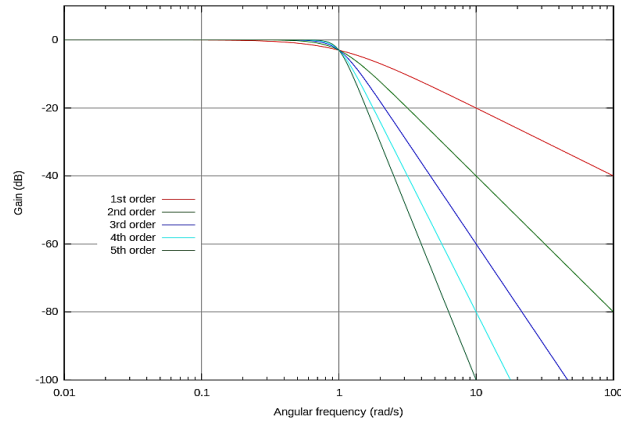


Figure II.6 - Gains de filtres de Butterworth passe-bas d'ordre 1 à 5 en fonction de la fréquence [22].

• Caractéristiques

Le gain d'un filtre de Butterworth est le plus constant possible dans la bande passante et tend vers 0 dB dans la bande de coupure.

Sur un diagramme de Bode logarithmique, cette réponse décroît linéairement vers $-\infty$, de -6 dB/octave (-20 dB/décade) pour un filtre de premier ordre, -12 dB/octave soit -40 dB/décade pour un filtre de second ordre, -18 dB/octave soit -60 dB/décade pour un filtre de troisième ordre, etc.

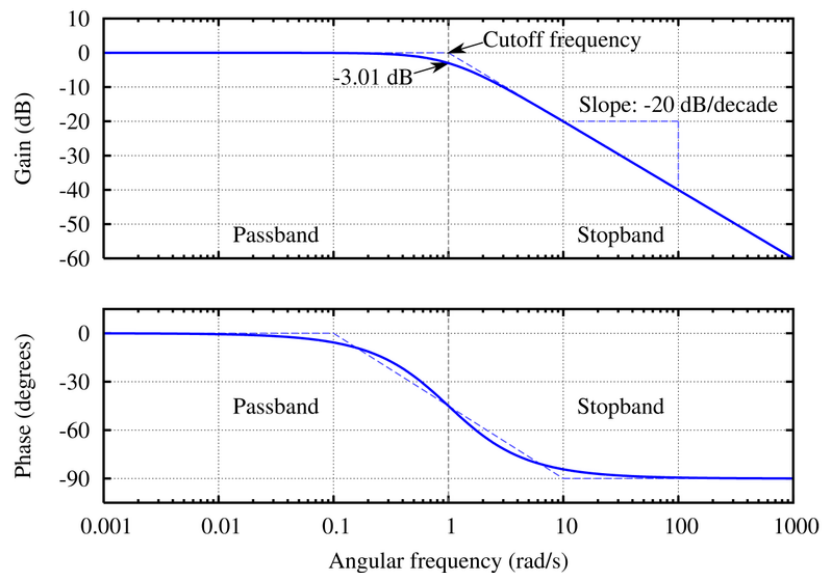


Figure II.7- Diagramme de Bode d'un filtre de Butterworth passe-bas du premier ordre [22].

Le gain d'un filtre de Butterworth passe-bas d'ordre n est :

$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad \text{II.28}$$

Où ; G_n est le gain du filtre

H_n sa fonction de transfert,

j l'unité imaginaire :

ω la fréquence angulaire (ou pulsation) du signal en radians par seconde (rad.s^{-1})

ω_c la fréquence de coupure (angulaire) du filtre (à -3 dB).

II.4.2.2. Filtres Chebyshev

Le filtre Chebyshev, développé par le mathématicien russe Pafnuty Chebyshev, est un autre type de filtre couramment utilisé dans la conception de filtres analogiques et numériques [23].

Les filtres Chebyshev offrent une atténuation plus raide dans la bande passante par rapport aux filtres Butterworth, mais présentent des anomalies de magnitude ou d'ondulation dans la bande de transition [24]. Ces anomalies peuvent être acceptables dans certaines applications où une atténuation plus élevée est requise.

• Filtres de Tchebychev de type 1

Le filtre de Tchebychev de type 1 troque, contre une meilleure sélectivité, la monotonie en bande passante du filtre de Butterworth ;

La courbe de réponse en bande passante présente un certain nombre d'ondulations. La valeur maximale de ces ondulations est un paramètre de conception du filtre. Plus elle est importante, à ordre constant, plus le filtre est sélectif (sa pente est plus raide hors bande passante).

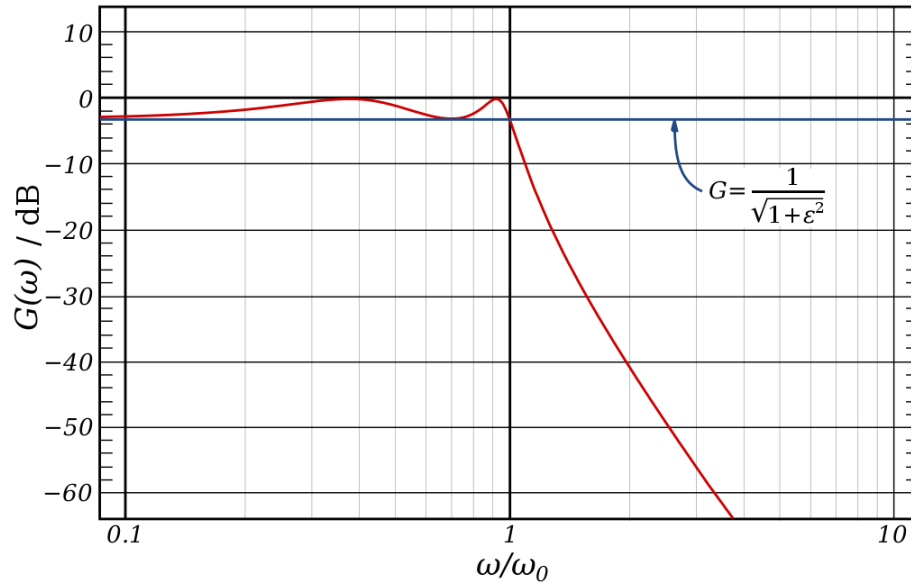


Figure II.8- Réponse fréquentielle d'un filtre passe-bas de Tchebychev de type 1 d'ordre 4 avec $\varepsilon = 1$ [25].

○ **Fonction de transfert :**

$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}} \quad \text{II.28}$$

Avec, ε est le facteur d'ondulation,

ω_0 la fréquence de coupure et T_n est le ne polynôme de Tchebychev du premier type

Le filtre de Tchebychev de type 1 est un filtre du type « tout pôle », ce qui signifie qu'il est réalisable par un procédé classique de synthèse en échelle. Seuls les filtres d'ordre impair possèdent une impédance d'entrée et de sortie égale, les filtres d'ordre pair ayant une impédance de sortie inférieure à l'impédance d'entrée.

• **Filtres de Tchebychev de type 2**

Le filtre de Tchebychev de type 2, également connu sous le nom de Tchebychev inverse, présente une atténuation monotone en bande passante, comme le filtre de Butterworth, mais son comportement en bande atténuée est différent : la courbe de réponse alterne entre une série de

maxima, dont la valeur est spécifiée lors de la conception du filtre, et de points où l'atténuation est totale (pôles).

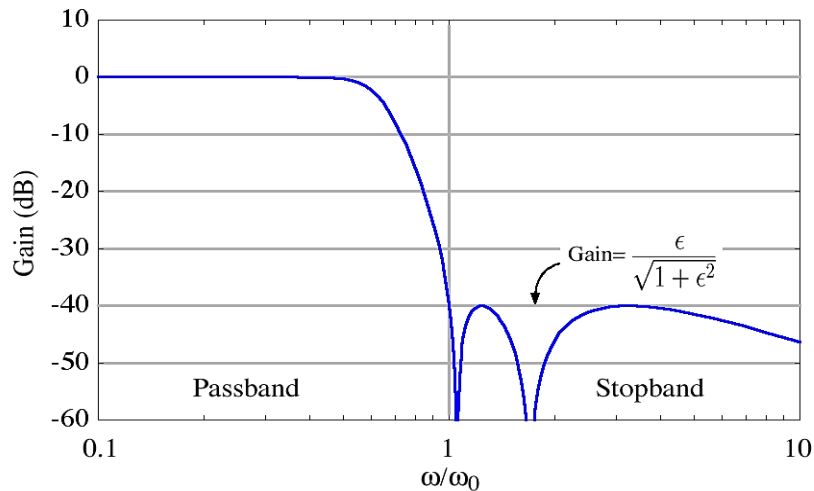


Figure II.9 - Réponse fréquentielle d'un filtre de Tchebychev inverse passe-bas avec $\epsilon = 0.01$ [25].

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)}}} = \frac{\epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)}} \quad \text{II.29}$$

Pour les ordres impairs, l'atténuation devient infinie lorsque la fréquence s'écarte indéfiniment (au sens logarithmique) de la fréquence de coupure. En revanche, pour les ordres pairs, l'atténuation tend vers la valeur limite du gabarit.

Cette particularité rend la synthèse des filtres de type 2 d'ordre pair impossible si l'on se limite à des capacités et des inductances : il faut au moins un transformateur et/ou un amplificateur.

Outre les filtres Butterworth et Chebyshev, il existe d'autres méthodes classiques de conception de filtres, telles que les filtres elliptiques, les filtres de Bessel et les filtres de Legendre [26].

Chacune de ces méthodes présente des caractéristiques spécifiques et est utilisée dans des applications particulières qui nécessitent des réponses en fréquence et des atténuations adaptées.

II.4.3. Techniques avancées de conception

Les techniques avancées de conception sont des méthodes utilisées dans l'ingénierie électronique pour réaliser des circuits plus sophistiqués et améliorer les performances des dispositifs électroniques, telles que le couplage en ligne et le couplage capacitif.

Ces techniques permettent de résoudre des problèmes spécifiques liés à la conception de circuits électroniques et offrent des avantages par rapport aux méthodes de conception traditionnelles.

- **Couplage en ligne**

Le couplage en ligne est une technique de conception qui permet de transférer des signaux entre des circuits voisins en utilisant des lignes de transmission. Cette technique est couramment utilisée pour réduire les interférences électromagnétiques et minimiser les pertes de signal [27].

- **Couplage capacitif**

Le couplage capacitif est une technique de conception qui consiste à utiliser des capacités pour transférer des signaux entre des circuits. Cette méthode permet de transmettre des signaux tout en isolant électriquement les circuits entre eux, réduisant ainsi les interférences et les perturbations indésirables [28].

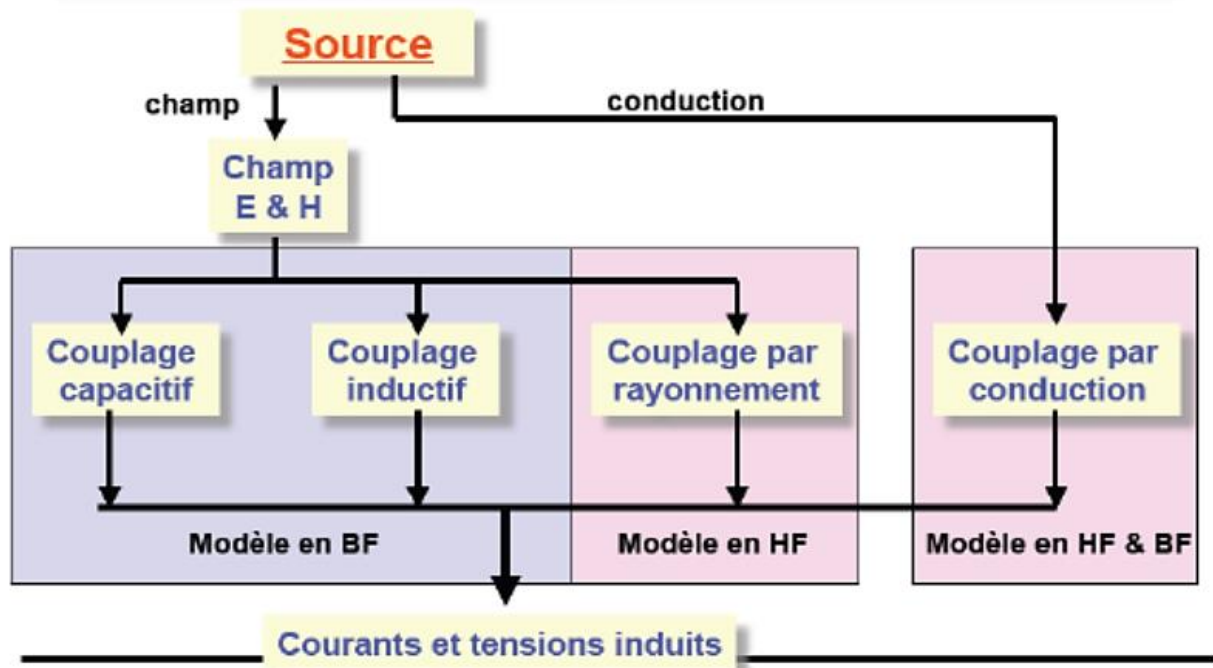


Figure I.10- Modes de couplages en résumé [29].

En plus du couplage en ligne et du couplage capacitif, d'autres méthodes de conception de pointe sont employées dans le domaine de l'ingénierie électronique. Parmi ces techniques, on peut évoquer le filtrage adaptatif, l'amplification différentielle et la rectification de l'égalisation [30].

II.5. Conclusion

Ce chapitre a couvert en profondeur la transposition et le décalage de fréquence, mettant en lumière les applications en télécommunication.

Nous avons exploré les méthodes de conception de filtres, des classiques comme Butterworth et Chebyshev aux approches numériques et analogiques.

Ce chapitre constitue une étude de base essentielle pour la compréhension et l'exploration des filtres hyperfréquence.

Chapitre III

Résultats des simulations

III.1. Introduction :

Dans le dernier chapitre, nous avons appris comment différents facteurs affectent les performances d'un type particulier de filtre électronique. Dans ce chapitre, nous allons utiliser un logiciel de simulation Ansoft HFSS pour concevoir un filtre qui peut être modifié pour fonctionner de différentes manières. La première conception sera faite pour un filtre passe bas.

Remarque : dans notre conception des filtres on utilise les dimensions comme suit :
Selon x : w (longueur de bande)

Selon y/z : l (largeur de bande)

III.2. Filtre Passe Bas Stepped impedance

III.2.1. Structure

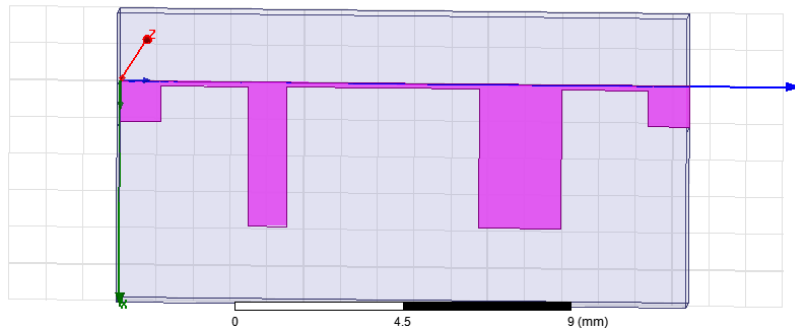
Le filtre est simulé sur un substrat avec une constante diélectrique relative de 10.8 et d'une épaisseur de 1.27mm. L'impédance caractéristique haute et basse des lignes de transmission sont choisies comme $Z_{0L} = 100 \Omega$ et $Z_{0C} = 24 \Omega$. de transmission sont :

III.2.2. Cahier de charge

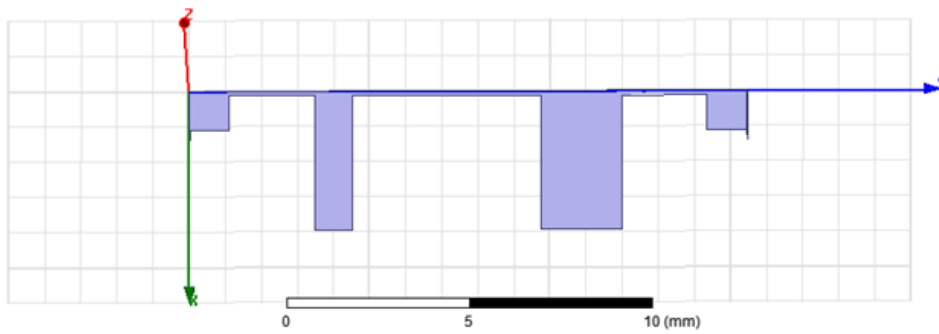
Les paramètres de conception des lignes microrubans et de la longueur physique de la haute et basse impédance des lignes

$$\begin{cases} Z_{0C} = 24 \text{ ohms} \\ Z_0 = 50 \text{ ohms} \\ Z_{0L} = 100 \text{ ohms} \end{cases} \begin{cases} \lambda_{gC} = 26.3452 \text{ mm} \\ \lambda_0 = 28.0779 \text{ mm} \\ \lambda_{gL} = 29.4150 \text{ mm} \end{cases} \begin{cases} W_C = 3.9370 \text{ mm} \\ W_0 = 1.1176 \text{ mm} \\ W_L = 0.1397 \text{ mm} \end{cases} \begin{cases} l_{C1} = 1.0538 \text{ mm} \\ l_{e2} = 2.2289 \text{ mm} \\ l_{L1} = l_{L3} = 2.3615 \text{ mm} \\ l_{L2} = 5.2145 \text{ mm} \end{cases}$$

La conception du filtre avec les dimensions des tronçons de lignes avec le substrat diélectrique sont montrés dans la Figure 1.a. La partie métallique de la structure est présentée dans la Figure 1.b.



(a)



(b)

Figure III. 1. Implémentation de filtre passe bas par la méthode stepped impedance.

(a). Vue en perspective. (b). Vue de dessus sur la partie métallique.

III.2.3. Résultats

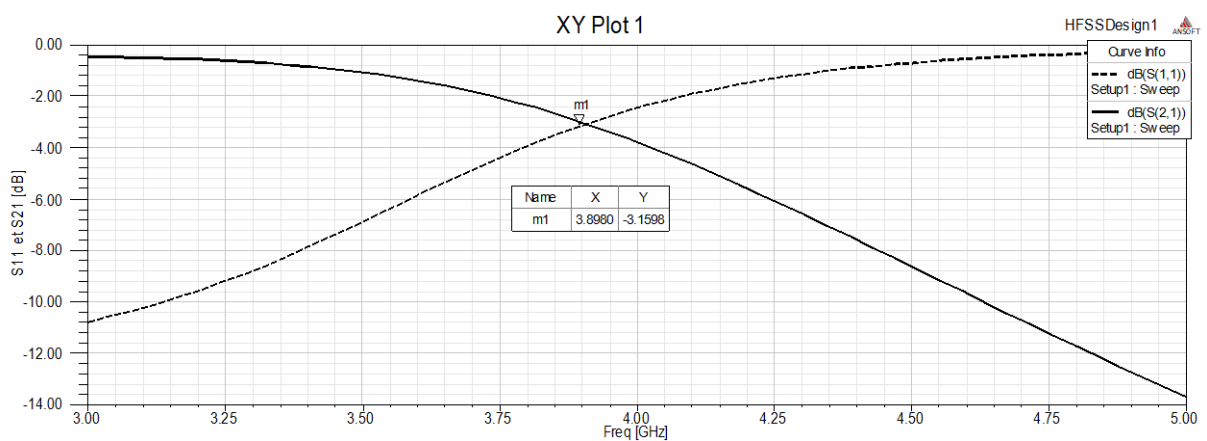


Figure III. 2. Résultats simulés sous hfss 3.5 de la réponse en fréquence de S_{11} (dB) et S_{21} (dB) du prototype de filtre passe bas simulé par stepped impedance.

La Figure III.2 montre les paramètres $S_{11}(\text{dB})$ et $S_{21}(\text{dB})$ du filtre passe bas de Chebyshev de l'exemple précédent (figure III.1). La fréquence de coupure est calculée pour $S_{21}(\text{dB}) = -3 \text{ dB}$ ce qui correspond à $f_c = 4.3 \text{ GHz}$. Dans la passe bande $[0, f_c]$, $S_{21}(\text{dB})$ est au-dessous de -3 dB donc très faible, pour les fréquence très basses.

$S_{21}(\text{dB})$ est presque 0 dB donc une transmission totale de la puissance incidente vers le port 2. Au-delà de la fréquence de coupure $\omega > \omega_c$ une réflexion presque totale de la puissance incidente. La transition est relativement large ceci est un inconvénient.

La forme de la réponse en fréquence du prototype du filtre passe bas de notre exemple est en accord avec la littérature. Les modèles analytiques développés pour ces filtres constituent bien une assez bonne approximation pour la conception de filtre passe bas par la méthode stepped impédance. Cependant, pour une conception plus rigoureuse le prototype de filtre ainsi conçue doit être simulé sous hfss Designer 3.5 et ajusté pour répondre aux spécifications.[31]

III.3. Filtre Passe bande Stepped impedance

III.3.1. Structure

Pour l'implémentation du filtre passe bande par des microrubans nous utilisons un substrat diélectrique d'épaisseur 1.57 mm et une constante diélectrique relative de 2.2. En appliquant l'algorithme précédent en MATLAB, nous pouvons déterminer les caractéristiques de la conception comme suit :

III.3.2. Cahier de charge

\mathbf{Y} = admittances

$$\begin{cases} Y_{1a} = Y_{1b} = 0.01460 \Omega^{-1} \\ Y_{2a} = Y_{2b} = 0.02873 \Omega^{-1} \\ Y_{3a} = Y_{3b} = 0.02826 \Omega^{-1} \\ Y_{4a} = Y_{4b} = 0.02873 \Omega^{-1} \\ Y_{5a} = Y_{5b} = 0.01460 \Omega^{-1} \end{cases} \quad \begin{cases} Y_{1,2} = 0.02587 \Omega^{-1} \\ Y_{2,3} = 0.02787 \Omega^{-1} \\ Y_{3,4} = 0.02787 \Omega^{-1} \\ Y_{4,5} = 0.02587 \Omega^{-1} \end{cases}$$

En utilisant les équations de la ligne microruban, on obtenons les résultats suivants En utilisant le matlab

- Pour les stubs :

$$\bullet \begin{cases} W_1 = W_5 = 0.28 \text{ mm} \\ W_2 = W_4 = 1.16 \text{ mm} \\ W_3 = 1.13 \text{ mm} \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_{g01}/4 = \lambda_{g05}/4 = 14.73 \text{ mm} \\ \lambda_{g02}/4 = \lambda_{g04}/4 = 13.91 \text{ mm} \\ \lambda_{g03}/4 = 13.92 \text{ mm} \end{cases}$$

- Pour les lignes de raccordement :

$$\begin{cases} W_{1,2} = W_{4,5} = 0.97 \text{ mm} \\ W_{2,3} = W_{3,4} = 1.10 \text{ mm} \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_{g0(1,2)}/4 = \lambda_{g0(4,5)}/4 = 14.03 \text{ mm} \\ \lambda_{g0(2,3)}/4 = \lambda_{g0(3,4)}/4 = 13.97 \text{ mm} \end{cases}$$

Les résultats obtenus sont utilisés dans un projet HFSS pour implémenter le filtre correspondant. La vue en perspective de ce filtre est présentée dans la Figure 3. Les performances en terme de réponse en S_{11} (dB) et S_{21} (dB) sont représentées dans la Figure III.4.

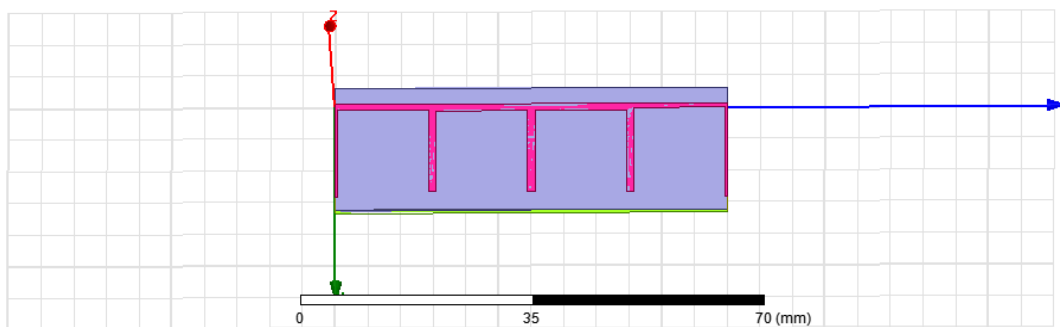


Figure III.3 Structure d'un filtre passe bande.

III.3.3. Résultats

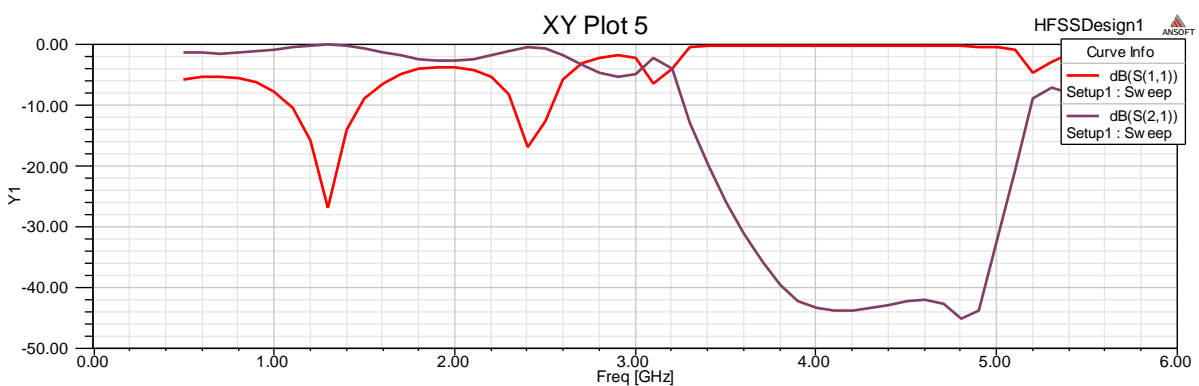


Figure III.4. Résultats simulés sous Ansoft Designer 3.5 de la réponse en fréquence de S_{11} (dB) et S_{21} (dB) du prototype de filtre passe bande utilisant les stubs circuit ouvert.

La Figure III 4 montre les paramètres S_{11} (dB) et S_{21} (dB) du filtre passe bande de Chebyshev par les stubs circuit ouvert demi-onde et les lignes de raccordement. Les deux fréquences de coupure f_l et f_u sont calculées pour S_{21} (dB) = -3 dB, ce qui correspond à $f_l = 2.7$ GHz et $f_u = 3.05$ GHz.

- Dans la passe bande $[f_l, f_u]$, S_{21} (dB) est maximum donc le maximum d'énergie incidente est transmise vers le port 2.
- Au-delà de la fréquence de la passe bande $f < f_l$ et $f > f_u$ le paramètre S_{11} (dB) est maximum donc une réflexion presque totale de la puissance incidente vers le port 1.
- Des pôles d'atténuation périodiques aux fréquences $f_0/2$ et $3f_0/2$ avec f_0 est la moyenne géométrique de f_l et f_u .

III.4. Filtre Passe-haut Stepped impedance

III.4.1. Structure

Pour l'implémentation du filtre passe haut par les microrubans, nous utilisons un substrat diélectrique d'épaisseur de 1.57 mm et une constante diélectrique relative de 2.2. En appliquant les relations pour déterminerons les caractéristiques de la conception [31] :

III.4.2 Cahier de charge

$$\begin{cases} Y_1 = Y_6 = 0.44909 \Omega^{-1} \\ Y_2 = Y_5 = 0.63221 \Omega^{-1} \\ Y_3 = Y_4 = 0.71313 \Omega^{-1} \end{cases} \quad \begin{cases} Y_{1,2} = Y_{5,6} = 1.03446 \Omega^{-1} \\ Y_{2,3} = Y_{4,5} = 1.00443 \Omega^{-1} \\ Y_{3,4} = 0.99734 \Omega^{-1} \end{cases}$$

En utilisant les équations de la ligne microstrip [31], nous obtenons les résultats suivants :

- Pour les stubs court-circuit :

$$\begin{cases} W_1 = W_6 = 1.0990 \text{ mm} \\ W_2 = W_5 = 2.2608 \text{ mm} \\ W_3 = W_4 = 2.8103 \text{ mm} \end{cases} \quad \begin{cases} l_1 = l_6 = 14.1814 \text{ mm} \\ l_2 = l_5 = 13.9640 \text{ mm} \\ l_3 = l_4 = 13.8847 \text{ mm} \end{cases}$$

- Pour les lignes de raccordement :

$$\begin{cases} W_{1,2} = W_{5,6} = 5.0868 \text{ mm} \\ W_{2,3} = W_{4,5} = 4.8827 \text{ mm} \\ W_{3,4} = 4.8199 \text{ mm} \end{cases} \quad \left(\begin{matrix} l_{1,2} = l_{5,6} = 27.3438 \text{ mm} \\ l_{2,3} = l_{4,5} = 27.3332 \text{ mm} \\ l_{3,4} = 27.2998 \text{ mm} \end{matrix} \right) \quad 59$$

La conception du filtre passe-haut optimum distribué avec les dimensions des stubs et des lignes de raccordement et le substrat diélectrique sont montrés dans la Figure III.5.

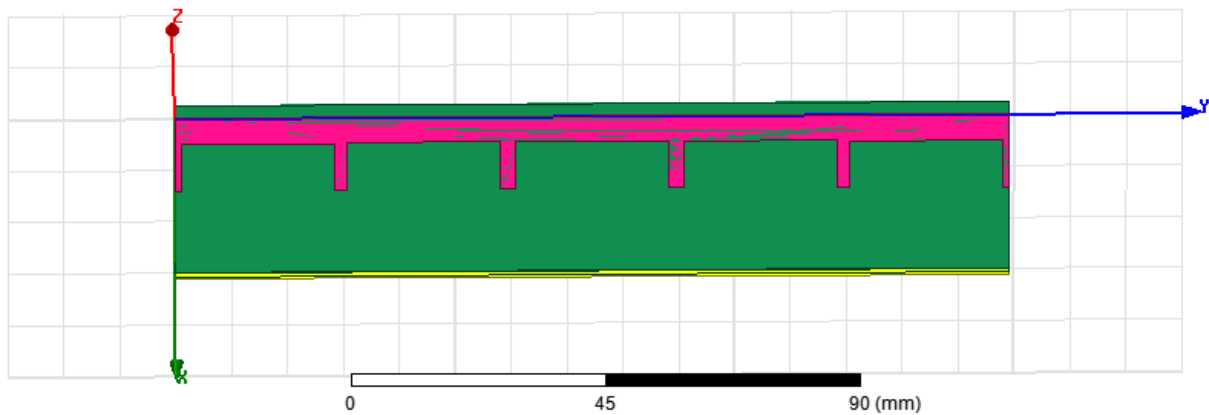


Figure III.5 Implémentation de filtre passe haut optimum distribué

III.4.3. Résultats

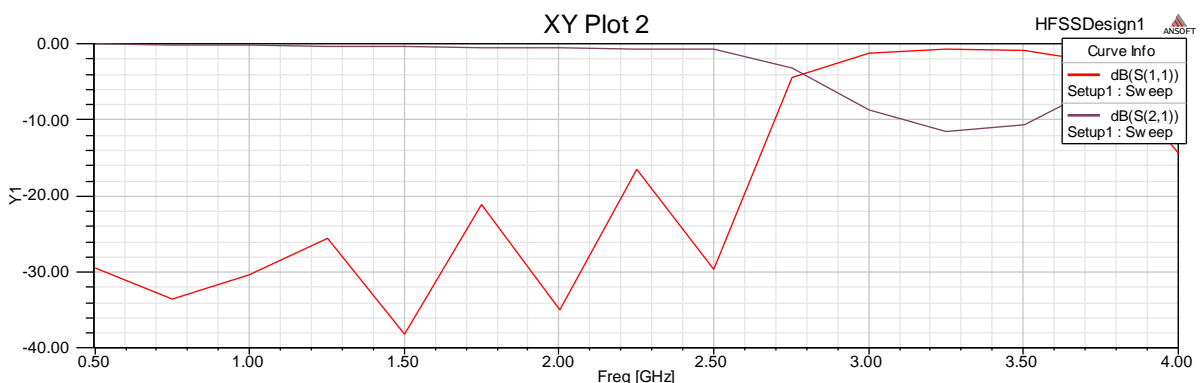


Figure III. 6. Réponses en fréquences simulés par hfss de S_{11} (dB) et S_{21} (dB) du filtre (Figure 5).

La Figure III.6. montre les paramètres S_{11} (dB) et S_{21} (dB) du filtre passe haut optimum distribué utilisant des stubs court-circuit. Nous constatons le suivant :

- La fréquence de coupure pour S_{21} (dB) = -3 dB est $f_c = 2.78$ GHz.
- Dans la coupe-bande $[0, f_c]$, S_{11} (dB) est(-38) très faible (qui montre une transmission presque nulle ou une réflexion presque totale de la puissance incidente.
- Au-delà de la fréquence de coupure $\omega > \omega_c$, S_{21} (dB) est maximum donc une transmission presque totale de la puissance incidente.

III.5. Filtre Passe bande Stepped impedance

III.5.1. Structure

Pour montrer comment concevoir ce type de filtre coupe bande, nous proposons la conception d'un filtre coupe bande d'ordre trois ayant une fréquence centrale $f_0 = 2$ GHz et des ondulations de la passe band de **0.5 dB** et une largeur de bande de 50%.

Pour l'implémentation du filtre coupe bande en microruban, nous employons un substrat diélectrique d'épaisseur de 1.57 mm et une constante diélectrique relative de 2.2. Nous pouvons déterminer les caractéristiques de la conception comme suit :

III.5.2. Cahier de charge

- Pour les stubs :

$$\begin{cases} l_1 = l_3 = 27.9378 \text{ mm} \\ l_2 = 28.4122 \text{ mm} \end{cases}$$

- Pour les lignes de raccordement :

$$\{W = 4.8513 \text{ mm} \quad \{l = 27.3385 \text{ mm}$$

Une implémentation en 3D de cette conception de filtre coupe bande microstrip est illustrée dans la Figure III.7

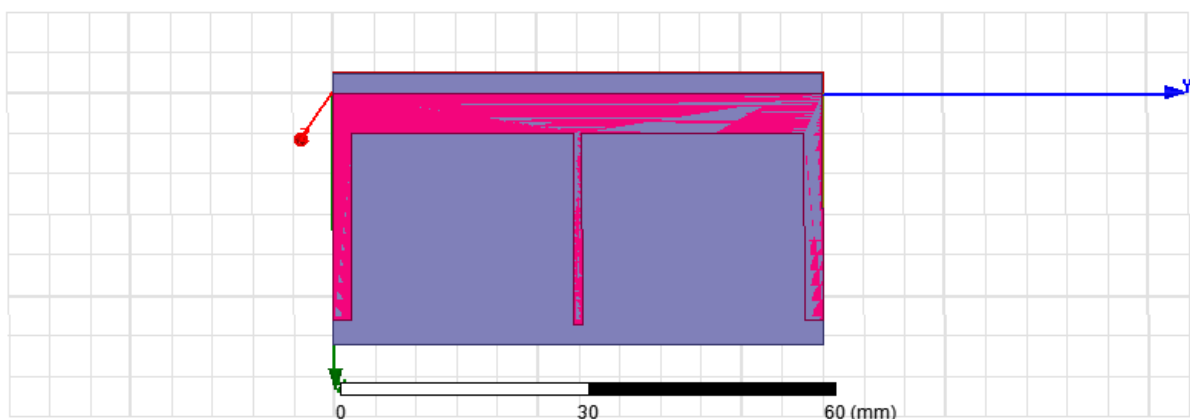


Figure III.7 .Structure d'un filtre coupe bande optimum d'ordre trois.

III.5.3. Résultats

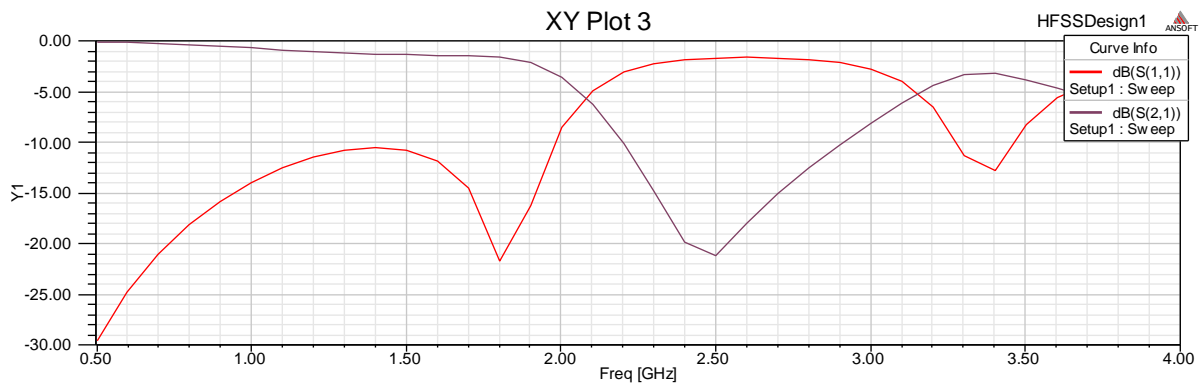


Figure III .8. Résultats simulés sous hfss 3.5 de la conception d'un filtre coupe bande de la figure 7.

La Figure III.8. montre les paramètres $S_{11}(\text{dB})$ et $S_{21}(\text{dB})$ du filtre coupe bande de Chebyshev par les stubs circuit ouvert et les lignes de raccordement. La courbe en noire représente le paramètre $S_{21}(\text{dB})$. Les deux fréquence de coupure f_l et f_u sont calculées pour $S_{21}(\text{dB}) = -3 \text{ dB}$ ce qui correspond à $f_l = 1.63 \text{ GHz}$ et $f_u = 2.23 \text{ GHz}$.

- Dans la coupe-bande $[f_l, f_u]$, $S_{21}(\text{dB})$ est très faible donc le maximum d'énergie incidente est réfléchi vers le port 1.
- Au-delà de la fréquence de la coupe bande $f < f_l$ et $f > f_u$ le paramètre $S_{21}(\text{dB})$ est maximum donc une transmission presque totale de la puissance incidente vers le port 2.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous concentrons notre attention sur les quatre types des filtres, leur conception et les variables qui affectent positivement les résultats. L'étude a montré que la longueur des ports, et la hauteur du substrat, ont un effet positif sur S_{21} et S_{11} , à leur plus grande valeur. Nous mentionnons également que pour une conception plus rigoureuse le prototype de filtre ainsi conçu on la l'asimulé sous hfss3.5 et ajusté pour répondre aux spécifications.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons présenté la conception des filtres hyperfréquence dans ces différents types : passe bas, passe haut, passe bande et coupe bande. La conception utilise la méthode Chebyshev, dont le principe consiste essentiellement en l'optimisation de la réponse en fréquence du filtre. Par conséquent, le filtre considéré comme un réseau bi-port est caractérisé par sa fonction de transfert et ses paramètres de dispersion ; la perte par retour et par insertion.

Puisque la procédure de conception consiste en quatre étapes à savoir : la spécification, l'implémentation du passe bas, le scaling en impédance et en fréquence et finalement l'implémentation, le types de réponses est étudiée: Chebyshev

La conception étant ainsi simplifiée en commençant par des prototypes de filtres passe bas qui sont normalisés en termes d'impédance et de fréquence. Des transformations (scaling) sont ensuite appliquées pour convertir les conceptions de prototypes En l'intervalle de fréquence et en niveau d'impédance désirés. Le filtre ainsi obtenu consiste en des éléments localisés. Pour des applications microondes, de telles conceptions doivent être modifiées pour utiliser les éléments distribués qui consistent en des sections de lignes de transmission. L'implémentation du prototype final est rendue facile par la technologie microstrip dont les modèles de conception analytiques de celle-ci ainsi que la facilité de sa fabrication font d'elle le candidat préféré pour ces implémentations. Afin de valider la procédure de conception basée sur la théorie ci-mentionnée, des projets de filtres ayant les mêmes paramètres estimés ont été créés et analysés sous HFSS. Ce solveur utilisant la méthode des moments full-wave dispose d'un ensemble d'outils performants pour l'analyse et la conception de filtres et par conséquent, nous l'avons adopté dans cette étude.

Références Bibliographiques

- [1] Résumé de la méthode de synthèse de filtre, (2007-2008), Méthode de synthèse de filtre (résumé), 4RT INSA Toulouse , lien : <https://fr.scribd.com/document/369443542/synthesefiltre-pdf>.
- [2] Terabee. (s.d.). Une introduction à la détection par temps de vol - Partie 1. Récupéré de <https://www.terabee.com/une-introduction-a-la-detection-par-temps-de-vol-partie-1/>
- [3] Marie Frénéa , (2003), Filtrage Analogique, Notes de cours ENS Cachan – Antenne de Bretagne (version2).
- [4] R.Duperray, Fonction De Transfert des Quadripoles Lineaires : Filtres Passifs et Actifs, Lycée F.BUISSON PTSI. 2013
- [5] Andreas Antoniou, (2006), Digital signal processing, Signals Systems and Filters, University of Victoria – BC, Canada
- [06] M. T. Benhabiles, Télécommunications Fondamentales - EF 2.2.1, Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2016 Lien : <https://www.umc.edu.dz/images/UEF2.2.1.pdf>.
- [7] Alexandre Alles ,PCSI, 2019–2020, Chapitre 11- Filtrage linéaire, Lycée Lalande, Bourg-en-Bresse.
- [8] Filali Kosseila et Bekhtaoui Sofiane, 2018 , Etudes et simulation d'un filtre passe bande pour des applications radiofréquences , Mémoire de MASTER Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [9] Collin, R. E. (2006). Foundations for Microwave Engineering. Wiley. Lien : https://radfiz.org.ua/share/sheva_s8_DEK/SECONDARY/%E4%C5%D2%D6/%E4%C5%D2%D6/%CE%D7%DE%20%D4%C5%C8%CE%A6%CB%C1/%CC%A6%D4/Collin.%20Foundations%20for%20Microwave%20Engineering.pdf
- [10] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2019). Digital Communications. McGraw-Hill Education. Lien: <https://ds.amu.edu.et/xmlui/bitstream/handle/123456789/17525/Digital%20Communications%20J.%20Proakis%205th%20Edition%202007.pdf>
- [11] Hugues GARNIER , 2020 , Conception ,de filtres numériques, Université de Lorraine
- [12] EuMA High-frequency Technologies Series. (2015). In V. Crnojević-Bengin (Ed.), Advances in Multi-Band Microstrip Filters . Université Cambridge.
- [13] Matthaei, G. L., Young, L., & Jones, E. M. T. (1980). Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. Lien : <https://ia803103.us.archive.org/15/items/MicrowaveFiltersImpedanceMatchingNetworksAndCouplingStructures/Microwave%20Filters%2C%20Impedance-Matching%20Networks%2C%20and%20Coupling%20Structures.pdf>
- [14] Sylvain Traverso. Transposition de fréquence et compensation du déséquilibre IQ pour des systèmes multiporteuses sur canal sélectif en fréquence. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Cergy Pontoise, 2007. Français. ffnNT

- [15] S. Seghier, 2013, These de doctorat, Genie Electrique, Caractérisation de nouvelles structures de filtres micro-ondes pour des applications en télécommunications", Université de Tlemcen.
- [16] Flandre, D. (2003). Cours de Conception de Filtres Analogiques. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [17] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R. (2014). Digital Signal Processing Using MATLAB. Pearson.
- [18] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2013). Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. Pearson.
- [19] Mitra, S. K. (2010). Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach. McGraw-Hill.
- [20] Cheng, K. C. (2014). Digital Filter Design Solutions. Wiley.
- [21] Smith, R. N. (1997). Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists. Wiley.
- [22] Filtre de Butterworth. (2023, mars 7). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Lien d'article : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtre_de_Butterworth&oldid=202062746.
- [23] Chen, W., & Zhang, Z. (2003). Digital Signal and Image Processing: Theory and Applications. Springer.
- [24] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R. (2010). Discrete-Time Signal Processing. Pearson.
- [25] Filtre de Tchebychev. (2023, mars 7). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Lien d'article : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtre_de_Tchebychev&oldid=202071907.
- [26] Rabiner, L. R., & Gold, B. (1975). Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice Hall.
- [27] Delfino, R., & Mariño, P. (2010). Techniques d'ingénierie et de conception pour systèmes couplés en ligne. Revue Française d'Electro-Acoustique, 23(3), 13-20.
- [28] Kim, S., & Kountouris, A. (2019). Analyse du couplage capacitif dans les circuits intégrés rapides. Journal de l'Association du traitement du signal, 48(8), 1245-1258.
- [29] Guettafi Amor, 2020, Cours de Compatibilité électromagnétique, Université de Batna, http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/guettafi_amor/files/compatibilite_electromagnetique.pdf
- [30] Benjamin POTELON , 2007 , Etude et Conception de Filtres Hyperfréquences Hybrides Planaires– Volumiques, Thèses de doctorat en Électronique, Université de Bretagne Occidentale.
- [31] **David M. Pozar. , Microwave Engineering Fourth Edition, University of Massachusetts at Amherst**

Résumé

L'objectif de ce travail est de faire l'étude et la simulation des quatre types de filtres pour des applications hyperfréquences. En partant d'un cahier de charge donné, la synthèse du filtre est faite avec l'approximation de Chebyshev, puis nous nous sommes intéressés à la structure micro-ruban que nous avons utilisé pour la simulation de notre filtre.

Mots clés

Conception, filtres, hyperfréquences, micro-ruban.

Summary

The objective of this work is to study and simulate the four types of filters for microwave applications. Starting from a given specification, the synthesis of the filter is made with Chebyshev approximation, and then we looked at the micro-ribbon structure that we used for the simulation of our filter.

Keywords

Design, filters, microwaves, micro-strip.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة الأنواع الأربعة من المرشحات تطبيقات الموجات الدقيقة. بدءاً من مواصفات ، ثم نظرنا إلى هيكل الشريط الدقيق الذي استخدمناه في محاكاة Chebyshev معينة، توليف يتم تصنيع المرشح بتقريب مرشحنا.

الكلمات المفتاحية

التصميم، المرشحات ، الميكروويف ، الشرائط الدقيق