

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Système de Télécommunication

**Par** : OWDA Mohammed et OUGGAD Walid

### **Sujet**

**Conception de Dispositifs de Filtrage pour les Systèmes de  
Communication Modernes sans Fil 5G**

Soutenu publiquement, le 25 /06 / 2023. Devant le jury composé de :

Mr KARIM FETHALLAH

Univ. Tlemcen

Président

Mr BOUSAHLA MILOUD

Univ. Tlemcen

Encadreur

Mr CHIKH BLED MOHAMMED

Univ. Tlemcen

Examineur

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2022 / 2023**

# DÉDICACE

## Dédicaces 1

Je dédie ce modeste travail

Mon père **OWDA Aseem**

Qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A mes très chers parents Ma mère **OWDA Eman**

Qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A mes frères : **Laith, Ahmad**

Mes sœurs : **Athar, Simar**

A toute la famille :

A mes amies et collègues, tous ceux qui m'ont aidé. A mon encadreur

**BOUSAHLA Miloud**, A mon binôme **OUGGAD Walid**

et sa Famille.

*Mohammed*

## Dédicaces 2

Je dédie ce modeste travail

### **A mes parents :**

**Ma mère**, dont l'amour, le soutien, les sacrifices et les précieux conseils ont contribué à ma réussite,

je vous exprime mes sentiments de gratitude éternelle à travers ce travail humble.

**Mon père**, qui a sacrifié et privé longtemps pour m'aider à avancer dans la vie, puisse ce travail porter ses fruits. Merci pour l'éducation,

les valeurs nobles et le soutien permanent que vous m'avez accordé.

Je n'oublie pas mes frères et sœurs qui m'ont toujours donné l'exemple de la persévérance, du courage et de la générosité.

Un grand merci

à mon encadreur **BOUSAHLA Miloud**, à mon binôme **OWDA MOHAMMED** et à toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé tout au long de ma vie.

Mes aimables et proches amis qui ont toujours été à mes côtés,

je vous suis reconnaissant pour votre soutien indéfectible.

*Walid*

# REMERCIEMENTS

Le premier à remercier de nous avoir donné le pouvoir de faire ce travail est Allah

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude pour l'opportunité qui nous a été offerte de poursuivre nos études à l'Université Abou Bakr Belkaid à Tlemcen. Nous avons été honorés de faire partie de cette prestigieuse institution et avons bénéficié d'une expérience académique inestimable.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre encadreur, Monsieur BOUSAHLA MILOUD, qui a suivi notre parcours universitaire et nous a apporté un soutien constant tout au long de notre formation. Ses conseils, son expertise et sa perspicacité ont été d'une valeur inestimable pour notre développement personnel et professionnel.

Nous remercions Monsieur KARIM FETHALLAH pour avoir accepté de présider ce jury. Nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur CHIKH BLED MOHAMMED pour avoir accepté de faire partie de ce jury et d'évaluer ce mémoire.

Nous tenons également à remercier chaleureusement tous les professeurs de l'université qui nous ont enseigné, guidé et inspiré tout au long de nos études. Vos enseignements ont revêtu une grande importance à nos yeux et ont largement contribué à notre réussite universitaire. Nous sommes reconnaissants des compétences et des connaissances que nous avons acquises grâce à vous, et nous les mettrons à profit tout au long de notre carrière professionnelle.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers l'ensemble du personnel de l'université pour leur engagement en faveur de l'excellence académique et de la réussite des étudiants. Votre dévouement et votre passion pour l'enseignement ont créé un environnement de travail et d'études propice, où les étudiants peuvent s'épanouir et réaliser leur plein potentiel.

Une fois de plus, nous vous remercions du fond du cœur pour votre soutien et votre contribution à notre éducation. Nous sommes honorés d'avoir été diplômés de l'Université Abou Bakr Belkaid à Tlemcen, et nous sommes convaincus que nous serons en mesure de faire une différence positive dans le monde grâce à ce que nous avons appris ici.

Merci...

## **Résumé :**

La communication sans fil a connu une évolution rapide ces dernières décennies, passant de la simple transmission de la voix à des applications multimédias complexes. La cinquième génération de systèmes de communication sans fil (5G) promet des performances considérablement améliorées en termes de débit de données, de latence, de fiabilité et de densité de connexion.

Dans ce projet nous nous sommes intéressés à l'étude, à la simulation et à la conception de filtres micro-onde pour les systèmes de communication modernes sans fil 5G. Plusieurs filtres en technologie micro ruban, de type passe bas, passe bande et coupe bande sont conçus en utilisant le logiciel "CST".

Les filtres conçus répondent bien aux exigences spécifiées dans le cahier de charge et d'excellents résultats ont été obtenus lors de cette étude.

**Mots clés :** Filtres, conception, Réseau 5G, sans fil, filtre micro-onde.

## **Abstract:**

Wireless communication has undergone rapid evolution in recent decades, transitioning from simple voice transmission to complex multimedia applications. The fifth generation of wireless communication systems (5G) promises significantly improved performance in terms of data throughput, latency, reliability, and connection density.

In this project, we focused on the study, simulation, and design of microwave filters for modern 5G wireless communication systems. Several microstrip filters, including low-pass, bandpass, and band-stop filters, were designed using the "CST" software.

The designed filters meet the specified requirements in the design specification, and excellent results were achieved during this study.

**Keywords:** design, 5G network, wireless, microwave filter.

### الملخص:

يتطور مجال الاتصالات الحديثة باستمرار، مع انتشار التطبيقات اللاسلكية مثل الوصول إلى الإنترنت عالي السرعة ومحتوى الوسائط المتعددة. تمثل تقنية الجيل الخامس أحدث تطور في الاتصالات الشبكية، حيث توفر سرعات تنزيل تصل إلى 20 جيجا بت في الثانية. في هذا المشروع، يتم التركيز على تعديل الهيكل الأساسي لمرشحات الميكروويف من خلال تعديل أبعاد معينة من العناصر المكونة للمرشح لدراسة تأثيرها على التشغيل. يتم تصميم ومحاكاة الأنواع المختلفة لمرشحات الميكروويف باستخدام برنامج "السي اس تي". الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو التركيز على مرشحات الميكروويف. سيتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها وتحليلها.

الكلمات المفتاحية: تصميم، شبكة الجيل الخامس، لاسلكي، مرشح ميكروويف.

## **Table de matières :**

Résumé :.....	a
Abstract: .....	a
:الملخص .....	b
Table de matières :.....	i
Liste des Figures : .....	v
Liste des Tableaux : .....	viii
Liste des acronymes :.....	ix
Introduction Générale .....	1
Introduction Générale : .....	2
Chapitre I : Les systèmes de communication modernes sans fil 5G .....	4
I.1 . Introduction : .....	5
I.2 . Les générations précédentes de systèmes de communication sans fil : .....	5
I.2.1 . La deuxième génération (2G) : .....	6
I.2.2 . La troisième génération (3G) : .....	6
I.2.3 . La quatrième génération (4G) : .....	6
I.3 . Présentation de la cinquième génération : .....	7
I.3.1 . Historique de la 5G : .....	7
I.3.2 . Définition de la 5G : .....	7
I.3.3 . Architecture de Cinquième Génération : .....	7
I.3.4 . Les caractéristiques techniques de la 5G : .....	8
I.4 . Les technologies clés de la 5G : .....	8
I.4.1 . Les technologies de réseau : .....	9
I.4.1.1 . Massive MIMO : .....	9
I.4.1.2 . Beamforming : .....	9
I.4.1.3 . Le découpage de réseau : .....	10
I.4.2 . Les technologies de transmission : .....	11
I.4.2.1 . Ondes millimétriques : .....	12
I.4.2.2 . Les petites cellules : .....	12
I.4.2.3 . Li-Fi : .....	13
I.5 . Les applications de la 5G : .....	14
I.5.1 . Applications pour les consommateurs : .....	14

I.5.1.1 . Téléphonie mobile :.....	14
I.5.1.2 . Services de vidéo et de musique en streaming : .....	15
I.5.1.3 . Réalité augmentée et virtuelle :.....	15
<b>I.5.2 . Applications pour les entreprises :.....</b>	<b>16</b>
I.5.2.1 . Voitures autonomes : .....	16
I.5.2.2 . Industrie 4.0 : .....	16
I.5.2.3 . Internet des objets :.....	17
I.5.2.4 . Réseaux privés 5G :.....	18
<b>I.5.3 . Applications pour l'industrie :.....</b>	<b>18</b>
I.5.3.1 . Agriculture intelligente :.....	18
I.5.3.2 . Santé connectée : .....	19
I.5.3.3 . Ville intelligente : .....	19
<b>I.6 . Les enjeux de la mise en place de la 5G :.....</b>	<b>20</b>
<b>I.6.1 . Les défis techniques :.....</b>	<b>20</b>
I.6.1.1 . La couverture :.....	20
I.6.1.2 . La sécurité : .....	20
I.6.1.3 . L'interopérabilité :.....	21
<b>I.6.2 . Les enjeux économiques et environnementaux :.....</b>	<b>21</b>
I.6.2.1 . Coûts de déploiement et de maintenance :.....	21
I.6.2.2 . Impact environnemental : .....	22
I.6.2.3 . Répartition des bénéfices de la 5G :.....	22
<b>I.7 . Les perspectives d'avenir de la 5G :.....</b>	<b>22</b>
<b>I.7.1 . Évolutions futures de la 5G : .....</b>	<b>22</b>
I.7.1.1 . Normes et standards :.....	22
I.7.1.2 . Développement de nouvelles applications : .....	23
I.7.1.3 . Coexistence avec les technologies sans fil existantes : .....	23
<b>I.7.2 . Impacts sociaux et économiques de la 5G : .....</b>	<b>23</b>
I.7.2.1 . Transformation des modes de travail et de vie :.....	23
I.7.2.2 . Opportunités économiques :.....	23
I.7.2.3 . Questions de régulation et d'éthique : .....	24
<b>I.8 . Conclusion :.....</b>	<b>24</b>
<b>I.9 . Références: .....</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre II : Les Filtres Micro-Ondes .....</b>	<b>26</b>

<b>II.1 . Introduction :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.2 . Définition et rôle des filtres micro-ondes :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3 . Classification des filtres :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3.1 . Filtre passe-bas :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.3.2 . Filtre passe-haut :</b> .....	<b>29</b>
<b>II.3.3 . Filtre passe-bande :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.3.4 . Filtre coupe-bande :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.4 . Composants des filtres micro-ondes</b> .....	<b>31</b>
<b>II.4.1 . Circuits résonnants :</b> .....	<b>32</b>
<b>II.4.2 . Lignes de transmission :</b> .....	<b>32</b>
<b>II.5 . Caractéristiques des filtres micro-ondes :</b> .....	<b>33</b>
<b>II.5.1 . Perte d'insertion :</b> .....	<b>33</b>
<b>II.5.2 . Sélectivité :</b> .....	<b>33</b>
<b>II.5.3 . Bande passante :</b> .....	<b>34</b>
<b>II.5.4 . Les paramètres S :</b> .....	<b>34</b>
<b>II.5.5 . Impédance d'entrée et de sortie :</b> .....	<b>36</b>
<b>II.6 . Différents types de filtres micro-ondes :</b> .....	<b>36</b>
<b>II.6.1 . Filtres micro-ondes planaires :</b> .....	<b>36</b>
<b>II.6.2 . Filtres passifs volumiques :</b> .....	<b>37</b>
<b>II.6.2.1 . Filtres à guides d'ondes :</b> .....	<b>37</b>
<b>II.6.2.2 . Filtres à résonateurs diélectriques :</b> .....	<b>38</b>
<b>II.6.2.3 . Filtres à cavités métalliques :</b> .....	<b>39</b>
<b>II.6.3 . Filtres SIW :</b> .....	<b>39</b>
<b>II.7 . Conception de filtres micro-ondes :</b> .....	<b>40</b>
<b>II.7.1 . La méthode de Butterworth :</b> .....	<b>41</b>
<b>II.7.2 . La méthode de Tchebychev :</b> .....	<b>43</b>
<b>II.8 . La transformation des filtres à partir du prototype passe bas :</b> .....	<b>45</b>
<b>II.8.1 . Transformation passe bas-passe haut :</b> .....	<b>46</b>
<b>II.8.2 . Transformation passe bas-passe bande :</b> .....	<b>47</b>
<b>II.8.3 . Transformation passe bas-coupe bande :</b> .....	<b>49</b>
<b>II.9 . Besoins en filtrage pour les systèmes 5G :</b> .....	<b>50</b>

<b>II.10 . Applications des filtres micro-ondes dans les systèmes 5G :</b> .....	<b>51</b>
<b>II.10.1 . Filtrage des signaux radiofréquences (RF) :</b> .....	<b>51</b>
<b>II.10.2 . Filtrage des signaux fréquence intermédiaire (IF) :</b> .....	<b>51</b>
<b>II.10.3 . Filtrage des signaux de synchronisation :</b> .....	<b>51</b>
<b>II.11 . Conclusion :</b> .....	<b>51</b>
<b>II.12 . Références :</b> .....	<b>53</b>
<b>Chapitre III : Simulation et conception des filtres micro-ondes</b> .....	<b>54</b>
<b>III.1 . Introduction :</b> .....	<b>55</b>
<b>III.2 . Procédure de conception :</b> .....	<b>55</b>
<b>III.2.1 . Création du modèle :</b> .....	<b>55</b>
<b>III.2.2 . Définition des conditions aux limites :</b> .....	<b>55</b>
<b>III.2.3 . Simulation :</b> .....	<b>55</b>
<b>III.2.4 . Optimisation :</b> .....	<b>56</b>
<b>III.2.5 . Validation :</b> .....	<b>56</b>
<b>III.3 . Conception d'un filtre passe-bas :</b> .....	<b>56</b>
<b>III.3.1 . Conception d'un filtre passe-bas de type Butterworth sur substrat FR-4 :</b> .....	<b>57</b>
<b>III.3.2 . Conception d'un filtre passe-bas de type Butterworth sur substrat Preperm L900hf :</b> .....	<b>62</b>
<b>III.4 . Conception d'un filtre passe-bande :</b> .....	<b>66</b>
<b>III.4.1 . Conception d'un filtre passe-bande de type Tchebychev de premier ordre :</b> .....	<b>69</b>
<b>III.4.2 . Conception d'un filtre passe-bande de type Tchebychev de troisième ordre :</b> .....	<b>72</b>
<b>III.5 : Conception d'un filtre coupe-bande de type Tchebychev :</b> .....	<b>77</b>
<b>III.6 . Conclusion :</b> .....	<b>82</b>
<b>III.7 . References:</b> .....	<b>83</b>
<b>Conclusion Générale et Perspectives</b> .....	<b>83</b>
<b>Conclusion générale et perspectives :</b> .....	<b>85</b>
<b>Résumé :</b> .....	<b>86</b>
<b>Abstract:</b> .....	<b>86</b>

## Liste des Figures :

Figure I.1: Evolution des réseaux mobiles .....	5
Figure I.2: Architecture de 5G.....	8
Figure I.3: Architecture MIMO massive. ....	9
Figure I.4: Antennes de Beamforming .....	10
Figure I.5: Architecture de formation de faisceau adaptative.....	10
Figure I.6: Architecture système dans un seul domaine d'orchestration.....	11
Figure I.7: Les ondes millimétriques -mmWave .....	12
Figure I.8 : Les petites cellules. ....	13
Figure I.9: Système Li-Fi proposé pour l'accès à Internet. ....	14
Figure I.10: Le modèle de système de réalité virtuelle sans fil multi-utilisateurs comprenant un serveur VR et un certain nombre de clients VR.....	15
Figure I.11 : Illustration de l'interconnexion entre les voitures autonomes.....	16
Figure I.12: Opportunité de communication 5G pour l'industrie 4.0.....	17
Figure I.13: Internet des objets.....	17
Figure I.14: Une illustration de l'application IoT pour surveiller les conditions agricoles dans une serre.....	18
Figure I.15: Les éléments constitutifs de la ville intelligente.....	19
Figure I.16: Sécurité de bout en bout dans la 5G d'entreprise.....	21
Figure II.1 : Gabarit d'un filtre idéal : (a) passe-bas, (b) passe-haut, (c) passe-bande, (d) coupe-bande .....	28
Figure II.2 : Gabarit du filtre passe-bas idéal .....	28
Figure II.3 : Gabarit du filtre passe-haut idéal .....	29
Figure II.4 : Gabarit du filtre passe-bande idéal.....	30
Figure II.5 : Gabarit du filtre coupe-bande idéal.....	31
Figure II.6 : (a) Circuit résonnant série, (b) Circuit résonnant parallèle [12]. ....	32
Figure II.7 : Lignes de transmission [13]. ....	32
Figure II.8 : Gabarit d'un filtre passe-bande montrant la perte d'insertion [14]. ....	33
Figure II.9 : Bande passante du filtre entre 20 et 400 Hz et largeur de bande du signal EMG [15].....	34
Figure II.10 : Représentation quadripolaire d'un filtre .....	35

<b>Figure II.11 : Impédance d'entrée et de sortie d'un filtre [16].</b>	36
<b>Figure II.12 : Eléments semi-localisés : (a) inductance en spirale, (b) inductance en méandre, (c) capacité de découplage (d) capacité interdigité [16].</b>	37
<b>Figure II.13 : Filtre en guides d'ondes à nervures [17].</b>	38
<b>Figure II.14 : Filtre à résonateurs diélectriques [17].</b>	38
<b>Figure II.15 : Filtre à cavités métalliques cylindriques avec vis de réglage [17].</b>	39
<b>Figure II.16 : Filtre SIW (Substrate Integrated Waveguide) [18].</b>	40
<b>Figure II.17 : Prototype de filtre dans la topologie de Cauer, n représente l'ordre du filtre.</b>	41
<b>Figure II.18 : Réponse en transmission de la fonction de Butterworth pour différents ordres n [19].</b>	42
<b>Figure II.19 : Réponse en transmission de la fonction de Tchebychev pour différentes valeurs de n [19].</b>	44
<b>Figure II.20 : Transformation en impédance</b>	46
<b>Figure II.21 : Filtre passe-bas pratique basé sur la transformation.</b>	46
<b>Figure II.22 : Transformation passe bas-passe haut</b>	47
<b>Figure II.23 : filtre passe-haut pratique basé sur la transformation</b>	47
<b>Figure II.24 : Transformation en fréquence passe bas-passe bande.</b>	48
<b>Figure II.25 : filtre passe-bande pratique basé sur la transformation.</b>	48
<b>Figure II.26 : Transformation en fréquence passe bas-coupe bande</b>	49
<b>Figure II.27 : Filtre coupe-bande pratique basé sur la transformation.</b>	49
<b>Figure III.1 : Agencement en réseau échelonné pour un filtre prototype passe-bas.</b>	56
<b>Figure III.2 : Filtre passe-bas d'ordre 3.</b>	58
<b>Figure III.3 : Filtre passe-bas d'ordre 5.</b>	58
<b>Figure III.4 : Filtre passe-bas d'ordre 7.</b>	59
<b>Figure III.5 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 3.</b>	59
<b>Figure III.6 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 5.</b>	60
<b>Figure III.7 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 7.</b>	60
<b>Figure III.8 : (a) Représentation du paramètre <math>S_{21}</math> du filtre pour un ordre de 3, 5 et 7 .</b>	61
<b>Figure III.9 : Représentation des paramètres <math>S_{11}</math> et <math>S_{21}</math> du filtre pour un ordre de 3, 5 et 7</b>	61
<b>Figure III.10 : Filtre passe-bas d'ordre 3 sur substrat Preperm L900hf.</b>	63
<b>Figure III.11 : Filtre passe-bas d'ordre 5 sur substrat Preperm L900hf.</b>	63

<b>Figure III.12 : Filtre passe-bas d'ordre 7 sur substrat Preperm L900hf.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.13 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 3.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.14 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 5.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.15 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 7.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.16 : Configuration générale d'un filtre passe-bande couplé aux extrémités... </b>	<b>67</b>
<b>Figure III.17 : Géométrie du filtre passe-bande de premier ordre conçu. ....</b>	<b>71</b>
<b>Figure III.18 : Réponses fréquentielles du filtre passe bande de premier ordre.....</b>	<b>72</b>
<b>Figure III.19 : Géométrie du filtre passe bande d'ordre 3. ....</b>	<b>74</b>
<b>Figure III.20 : Réponse fréquentielle du filtre passe-bande d'ordre3.....</b>	<b>75</b>
<b>Figure III.21 : (a) Représentation du paramètre <math>S_{21}</math> du filtre pour un ordre de 1 et 3. ..</b>	<b>76</b>
<b>Figure III.22 : Représentation des paramètres <math>S_{11}</math> et <math>S_{21}</math> du filtre d'ordre 1 et 3.....</b>	<b>76</b>
<b>Figure III.23: Principales étapes de la transformation du filtre passe-bas prototype en un filtre coupe-bande.....</b>	<b>78</b>
<b>Figure III.24 : Géométrie du filtre coupe-bande conçu.....</b>	<b>81</b>
<b>Figure III.25 : Réponses fréquentielles du filtre coupe-bande conçu.....</b>	<b>82</b>

## Liste des Tableaux :

<b>Tableau II-1 : Transformation en fréquence à partir du prototype passe-bas. ....</b>	<b>50</b>
<b>Tableau III-1 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 3. ....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau III-2 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 5. ....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau III-3 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 7. ....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau III-4 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 3 sur substrat Preperm L900hf : .....</b>	<b>62</b>
<b>Tableau III-5 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 5 sur substrat Preperm L900hf : .....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau III-6 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 7 sur substrat Preperm L900hf : .....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau III-7 : Comparaison entre la longueur totale des filtres à base de FR-4 (<math>\epsilon_r=4.4</math>) et du Preperm L900HF (<math>\epsilon_r=9</math>) : .....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau III-8 [5] : Caractérisation des espaces entre résonateur micro-ondes de largeur de ligne <math>W = 1,1</math> mm sur un substrat de permittivité <math>\epsilon_r = 10.8</math> et d'épaisseur <math>h=1.27</math> mm : .....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau III-9 : Paramètres géométriques du filtre passe-bande. ....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau III-10: Paramètres optimisés de conception du filtre passe-bande conçu.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau III-11 : Paramètres géométriques du filtre passe-bande d'ordre 3. ....</b>	<b>74</b>
<b>Tableau III-12 : Paramètres optimisés de conception du filtre passe-bande d'ordre 3... </b>	<b>75</b>
<b>Tableau III-13 : Paramètres géométriques du filtre coupe-bande. ....</b>	<b>80</b>
<b>Tableau III-14: Paramètres optimisés de conception du filtre coupe-bande.....</b>	<b>81</b>

## Liste des acronymes :

- 2G : La deuxième génération de systèmes de communication sans fil.
- 3G : La troisième génération de systèmes de communication sans fil.
- 4G : La quatrième génération de systèmes de communication sans fil.
- 5G : La Cinquième génération de systèmes de communication sans fil.
- GSM: Global System for Mobile Communications.
- CDMA : Code Division Multiple Access.
- UMTS: Universal Mobile Telecommunication System.
- LTE: Long-Term Evolution.
- WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.
- HSPA: High Speed Packet Access.
- MIMO: Multiple Input Multiple Output massif.
- LI-FI: Light Fidelity.
- LoT : Internet of Things.
- 3GPP: The 3rd Generation Partnership Project.
- UIT : Union internationale des télécommunications.
- ETSI : European Telecommunications Standards Institute.
- $\omega$  : La pulsation de l'onde.
- K : La constante de propagation.
- $f_c$  : La fréquence de coupure.
- RF : Radio Frequency.
- IF : Intermediate Frequency.
- $Z_{in}$  : L'impédance d'entrée de ce circuit.
- $Z_i$  : L'impédance d'entrée.
- $Z_o$ : L'impédance de sortie.
- SIW: Substrate Integrated Waveguide.
- PCB: Printed Circuit Board.
- dB: Décibel.
- GHz: Gigahertz.
- $\epsilon_r$  : Permittivité relative.

## **Liste des acronymes :**

- $\Omega_c$  : Fréquence normalisée.
- $Z_h$  : high impedance.
- $Z_l$  : low impedance.
- $h$  : hauteur du substrate.
- $N$  : order du filter.
- $BW$  : Band Width.
- $FBW$  : Frequency Relative Band Width.
- $\tan(\delta)$  : Loss tangent of the substrate.
- $CST$  : Computer Simulation Technology.

## **Introduction Générale**

## **Introduction Générale :**

La communication sans fil a connu une évolution rapide ces dernières décennies, passant de la simple transmission de la voix à des applications multimédias complexes. La cinquième génération de systèmes de communication sans fil (5G) promet des performances considérablement améliorées en termes de débit de données, de latence, de fiabilité et de densité de connexion. Cette avancée technologique a conduit à une augmentation exponentielle du nombre d'appareils connectés et d'utilisation de l'internet des objets (IoT). Cependant, pour atteindre les performances attendues de la 5G, il est crucial de développer des dispositifs de filtrage adaptés pour minimiser les interférences et améliorer la qualité de la transmission du signal.

Ce mémoire se concentre sur l'étude, la simulation et la conception de filtres micro-ondes pour les systèmes de communication modernes sans fil 5G. Il est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre présentera la 5G, son historique, ses caractéristiques techniques et ses applications. Nous aborderons également les technologies clés de la 5G, notamment le massive MIMO, le beamforming, le découpage de réseau, les ondes millimétriques, les petites cellules et le Li-Fi. En outre, nous présenterons des défis liés à la mise en place de la 5G, notamment la couverture, la sécurité et l'interopérabilité, ainsi que des enjeux économiques et environnementaux tels que les coûts de déploiement et de maintenance, l'impact sur l'environnement et la répartition des bénéfices de la 5G.

Dans le deuxième chapitre intitulé "Les Filtres Micro-Ondes", nous aborderons la notion de filtrage. Nous présentons la définition, le rôle, les composants et les différents types de filtres micro-ondes, ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite nous passons aux différentes méthodes de conception de filtre et la transformation des filtres à partir du prototype passe bas. Enfin, nous donnons les applications des filtres micro-ondes dans les systèmes de communication 5G, notamment leur utilisation pour filtrer les signaux RF, les signaux IF et les signaux de synchronisation.

Le dernier chapitre se concentrera sur l'étude, la simulation et la conception de filtres micro-ondes à base de lignes micro-ruban. Nous mènerons des études sur plusieurs filtres de différents types et de différents ordres. Nous commencerons par un filtre passe bas de type Butterworth d'ordre 3,5 et 7 sur substrat FR-4. Ensuite nous présenterons le deuxième filtre

passé-bas conçu de type Butterworth, d'ordre 3,5 et 7 mais en utilisant Preperm L900HF comme matériel du substrat.

Après cela, nous passerons à l'étude et à la conception du filtre passe-bande de type Tchebychev de premier ordre et de troisième ordre, en utilisant le Rogers RO3210 comme matériel du substrat.

Enfin, nous aborderons l'étude et la conception du filtre coupe-bande de type Tchebychev de troisième ordre. Le substrat utilisé pour ce filtre est de permittivité relative de 6.15 et d'hauteur de  $h=1.27$  mm.

Les différents filtres seront simulés à l'aide du logiciel CST Microwave Studio qui est un logiciel conçu spécialement pour la modélisation tridimensionnelle des phénomènes électromagnétiques dans les composants à haute fréquence. Son principal domaine d'application concerne les micro-ondes et les radiofréquences, notamment dans le contexte des communications sans fil.

**Chapitre I : Les systèmes de communication  
modernes sans fil 5G**

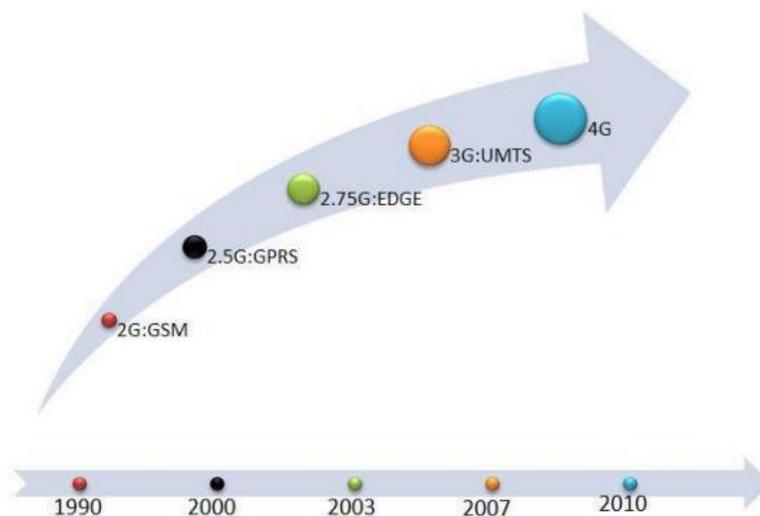
## **I.1. Introduction :**

La cinquième génération de systèmes de communication sans fil, ou 5G, est une technologie révolutionnaire qui représente la prochaine étape majeure dans l'évolution des technologies de communication mobile. La 5G est conçue pour offrir des vitesses de transmission de données ultra-rapides, une faible latence et une connectivité ultra-fiable, ce qui la rend essentielle pour répondre aux besoins croissants en matière de données et de connectivité de la société moderne.

Dans ce premier chapitre, nous allons explorer ce que la 5G implique, son historique, ses caractéristiques techniques et ses applications. Nous examinerons également les technologies clés de la 5G, notamment le massive MIMO, le beamforming, le découpage de réseau, les ondes millimétriques, les petites cellules et le Li-Fi. En outre, nous donnons des défis liés à la mise en place de la 5G, notamment la couverture, la sécurité et l'interopérabilité, ainsi que des enjeux économiques et environnementaux tels que les coûts de déploiement et de maintenance, l'impact sur l'environnement et la répartition des bénéfices de la 5G.

## **I.2. Les générations précédentes de systèmes de communication sans fil :**

La 5G n'est pas la première génération de technologie de communication mobile. Avant son arrivée, il y a eu plusieurs générations de technologies qui ont évolué au fil des ans pour offrir des performances de plus en plus améliorées comme on peut le voir sur la Figure I.1. Dans cette section, nous allons explorer brièvement les générations précédentes.



**Figure I.1:Evolution des réseaux mobiles**

**I.2.1. La deuxième génération (2G) :**

La deuxième génération de systèmes de communication sans fil, également connue sous le nom de 2G, a été introduite dans les années 1990 et a permis la transmission de données numériques. Les réseaux 2G utilisaient principalement la technologie de la commutation de circuits, qui réservait une bande passante dédiée pour chaque appel, ce qui limitait la capacité globale du réseau. Les normes de 2G les plus courantes incluent le GSM (Global System for Mobile Communications) et le CDMA (Code Division Multiple Access) [1].

**I.2.2. La troisième génération (3G) :**

La troisième génération de systèmes de communication sans fil, ou 3G, a été introduite dans les années 2000 et a permis des vitesses de transmission de données plus rapides et une meilleure qualité de voix. Les réseaux 3G utilisaient principalement la technologie de la commutation de paquets, qui permettait de partager la bande passante entre plusieurs utilisateurs simultanément. Les normes de 3G les plus courantes incluent le UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) et le CDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000) [1].

**I.2.3. La quatrième génération (4G) :**

La quatrième génération de systèmes de communication sans fil, également connue sous le nom de 4G, a été introduite à partir de 2008 et a permis des vitesses de transmission de données encore plus rapides, une latence plus faible et une meilleure qualité de voix. Les réseaux 4G utilisaient principalement la technologie de la commutation de paquets et ont introduit des innovations telles que la technologie LTE (Long-Term Evolution). Les normes de 4G les plus courantes incluent le LTE, le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) et le HSPA+ (High-Speed Packet Access Plus) [1].

### **I.3. Présentation de la cinquième génération :**

#### **I.3.1. Historique de la 5G :**

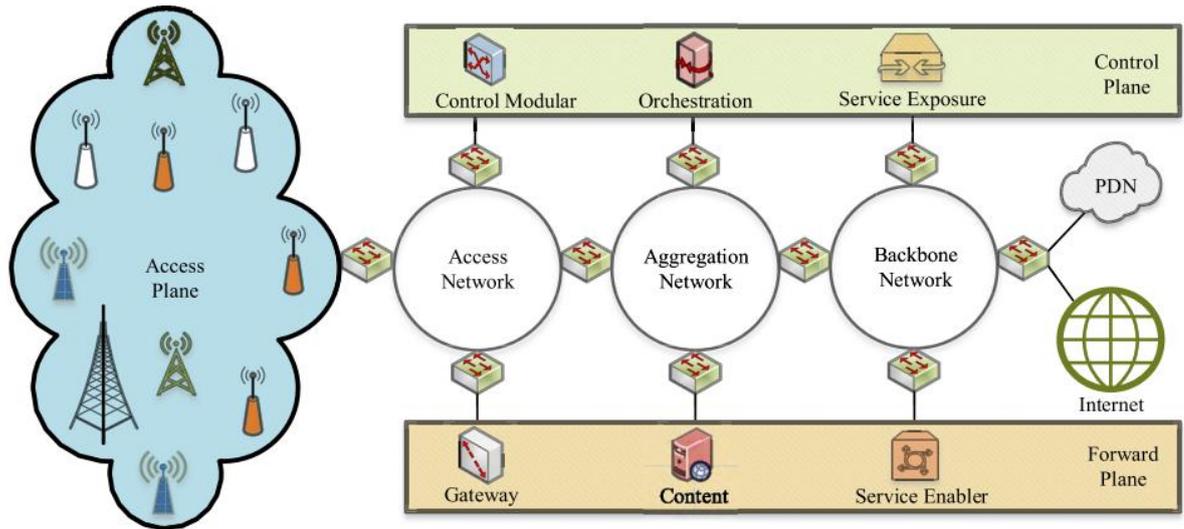
La 5G, ou cinquième génération de systèmes de communication sans fil, a été développée pour répondre aux besoins croissants de la connectivité mobile. Les travaux de recherche sur la 5G ont commencé dès le début des années 2010, avec des discussions sur les nouvelles exigences de la 5G, telles que des débits de données plus élevés, une latence plus faible, une densité de trafic plus élevée et une meilleure efficacité énergétique. Les premiers essais de la technologie 5G ont été lancés en 2018, suivis du lancement de services commerciaux 5G dans plusieurs pays en 2019 [1].

#### **I.3.2. Définition de la 5G :**

La 5G est définie comme une technologie de communication sans fil qui permet des débits de données très élevés, une faible latence, une connectivité ultra-fiable, une densité de trafic élevée et une meilleure efficacité énergétique par rapport aux générations précédentes. La 5G utilise une combinaison de technologies clés telles que la technologie de la commutation de paquets, la virtualisation de réseau, le réseau de tranches et le beamforming pour atteindre ces caractéristiques [2].

#### **I.3.3. Architecture de Cinquième Génération :**

La 5G utilise une architecture de réseau radicalement nouvelle par rapport aux générations précédentes. La 5G utilise un modèle de réseau de tranches qui permet de créer des réseaux virtuels dédiés pour différents cas d'utilisation, tels que la réalité augmentée, les voitures autonomes, les soins de santé et l'industrie. La 5G utilise également la virtualisation de réseau pour permettre une gestion plus flexible des ressources réseau [3]. Comme on peut le voir sur la Figure I.2.



**Figure I.2: Architecture de 5G.**

#### **I.3.4. Les caractéristiques techniques de la 5G :**

La 5G offre plusieurs caractéristiques techniques clés, telles que des débits de données très élevés allant jusqu'à plusieurs gigabits par seconde, une latence très faible de l'ordre de quelques millisecondes, une densité de trafic plus élevée, une connectivité ultra-fiable et une meilleure efficacité énergétique. La 5G utilise également des technologies clés telles que le beamforming, qui permet de concentrer le signal radio sur un utilisateur spécifique, et le massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), qui utilise de multiples antennes pour améliorer la capacité et la qualité du signal [3].

#### **I.4. Les technologies clés de la 5G :**

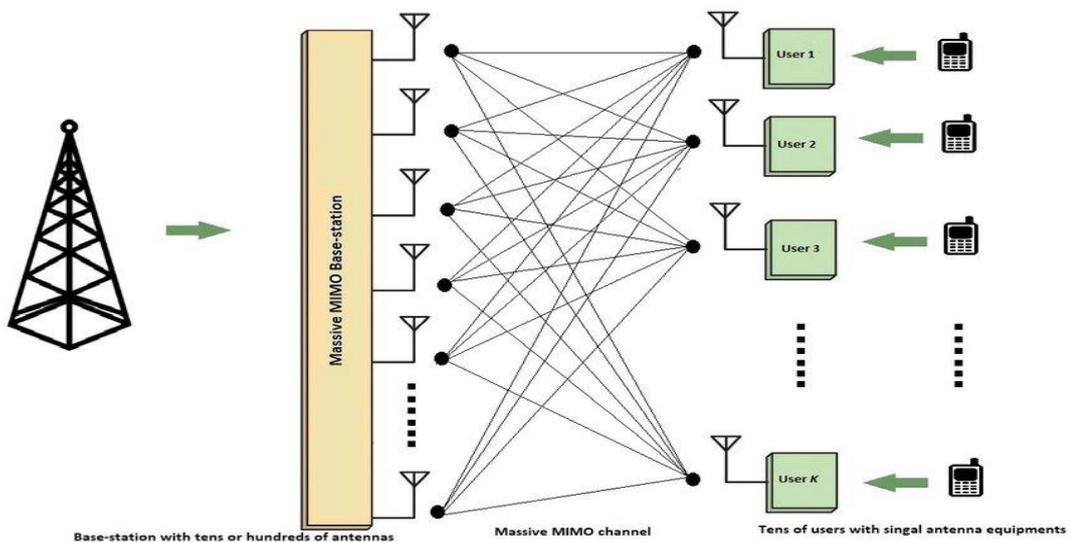
La 5G est la cinquième génération de systèmes de communication sans fil qui vise à fournir des services de communication plus rapides, plus fiables et plus avancés que les générations précédentes. Cette nouvelle technologie de réseau promet de révolutionner l'industrie des télécommunications, de stimuler la croissance économique et de transformer la manière dont nous interagissons avec le monde numérique. Dans cette section, nous examinerons les technologies clés qui permettent à la 5G d'atteindre ces objectifs ambitieux.

### I.4.1. Les technologies de réseau :

La 5G est conçue pour fournir des débits de données plus élevés, une faible latence et une plus grande capacité réseau pour répondre aux exigences croissantes des applications mobiles avancées. Les technologies clés qui sous-tendent ces capacités incluent :

#### I.4.1.1. Massive MIMO :

Le Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output massif) est une technologie de réseau de la 5G qui permet d'augmenter considérablement la capacité du réseau et d'améliorer la qualité du service. Cette technologie utilise un grand nombre d'antennes pour transmettre et recevoir des signaux simultanément, ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau et de réduire l'interférence. Contrairement aux technologies de réseau précédentes, qui utilisaient quelques antennes pour communiquer avec de nombreux utilisateurs, le Massive MIMO permet de communiquer avec un grand nombre d'utilisateurs simultanément en utilisant un grand nombre d'antennes comme on peut le voir sur la Figure I.3. Cette technologie est capable de prendre en charge des centaines de connexions simultanées, ce qui en fait une technologie de choix pour les applications de communication de masse, telles que les stades de sport, les centres commerciaux, les concerts et les aéroports [4].

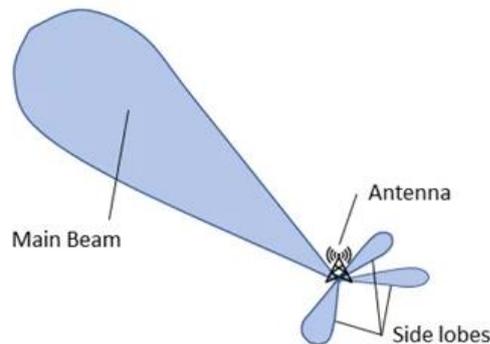


**Figure I.3: Architecture MIMO massive.**

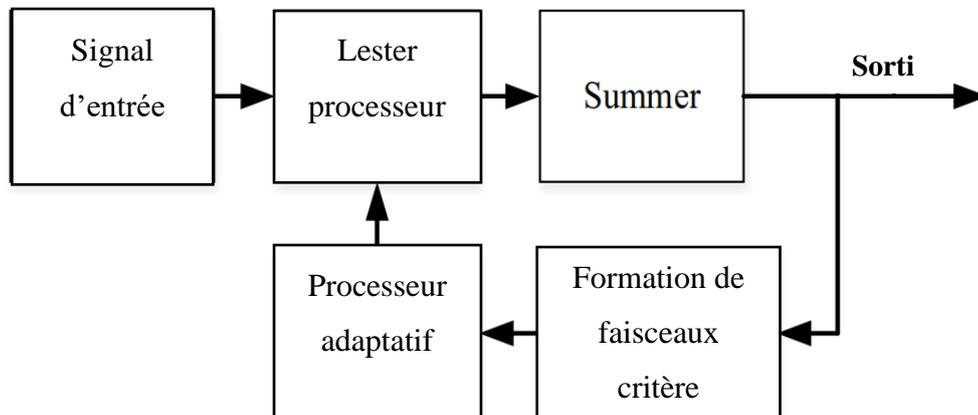
#### I.4.1.2. Beamforming :

Le Beamforming est une autre technologie de réseau de la 5G qui permet d'optimiser la transmission de données entre la station de base et l'utilisateur en dirigeant les signaux radio directement vers l'utilisateur. Cette technologie utilise un grand nombre d'antennes pour créer

un faisceau de signaux radio qui suit l'utilisateur à mesure qu'il se déplace. Cette approche permet d'améliorer la qualité de la connexion et de réduire l'interférence avec d'autres utilisateurs, ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau et d'améliorer la qualité du service. Le Beamforming est particulièrement utile dans les environnements à haute densité d'utilisateurs, tels que les centres urbains et les événements publics [5]. Comme on peut le voir sur la Figure I.5 : Architecture de formation de faisceau adaptative.



**Figure I.4: Antennes de Beamforming**

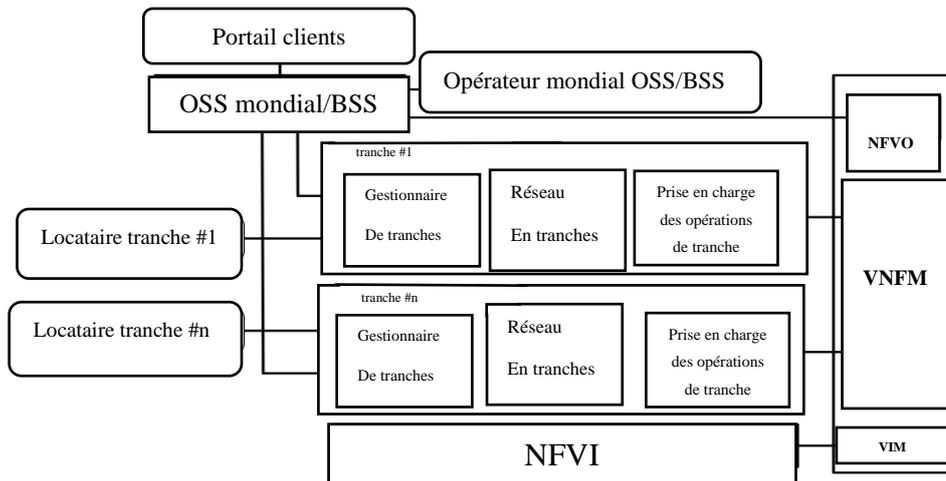


**Figure I.5: Architecture de formation de faisceau adaptative.**

### **I.4.1.3. Le découpage de réseau :**

Le Découpage de réseau (Network Slicing) est une technologie de réseau de la 5G qui permet de diviser le réseau en plusieurs segments virtuels, appelés tranches, pour répondre à différents besoins de l'entreprise. Chaque tranche est optimisée pour un ensemble spécifique

d'applications et de services, tels que la vidéo en streaming, les jeux en ligne, les voitures connectées et les objets connectés. Cette approche permet d'optimiser l'utilisation des ressources du réseau et d'offrir des services de qualité supérieure à des groupes spécifiques d'utilisateurs. Par exemple, une tranche de réseau pour les voitures connectées peut offrir une faible latence et une grande fiabilité, tandis qu'une tranche de réseau pour les services vidéo peut offrir une bande passante élevée et une qualité de diffusion en continu sans faille. Le Découpage de réseau est une technologie de réseau clé pour la 5G, car elle permet de répondre aux besoins diversifiés des utilisateurs et de fournir une expérience utilisateur personnalisée, tout en optimisant les ressources du réseau. Cela permet également de réduire les coûts d'investissement et de maintenance pour les opérateurs de réseaux [6]. Comme on peut le voir sur la Figure I.6.



**Figure I.6: Architecture système dans un seul domaine d'orchestration.**

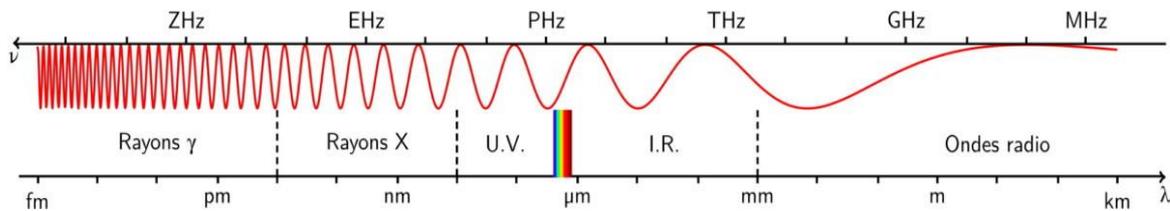
#### **I.4.2. Les technologies de transmission :**

La transmission des données est un aspect important des réseaux de communication sans fil. Dans le cas de la 5G, les technologies de transmission doivent être en mesure de fournir des débits de données élevés, une faible latence et une grande fiabilité. Dans cette section, nous examinons trois technologies clés de transmission de la 5G : les ondes millimétriques, les Small cells et la technologie Li-Fi.

**I.4.2.1. Ondes millimétriques :**

Les ondes millimétriques sont des ondes électromagnétiques de haute fréquence qui sont utilisées pour la transmission de données sans fil dans la 5G. Les ondes millimétriques ont une fréquence comprise entre 30 et 300 GHz, ce qui est beaucoup plus élevé que les fréquences utilisées dans les générations précédentes de réseaux sans fil comme on peut le voir sur la Figure I.

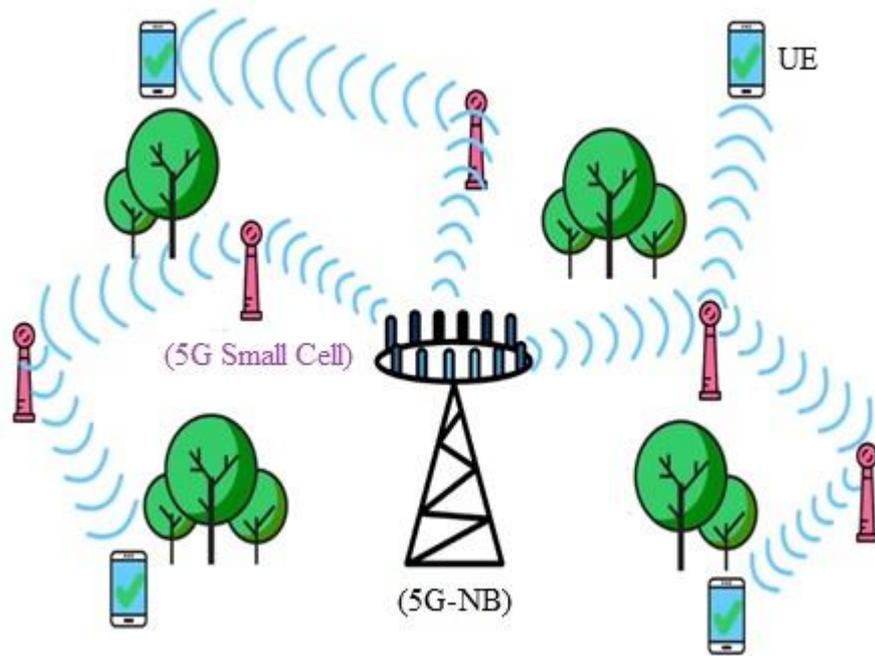
7. Les ondes millimétriques offrent des débits de données très élevés, car elles peuvent transporter des quantités importantes d'informations en peu de temps. Cependant, leur portée est limitée, car elles sont facilement absorbées par l'atmosphère et les obstacles physiques, tels que les murs et les bâtiments. Pour compenser cette limitation, la 5G utilise des antennes intelligentes et des petits répéteurs appelés Small cells pour améliorer la portée et la qualité de la connexion [7].



**Figure I.7: Les ondes millimétriques -mmWave**

**I.4.2.2. Les petites cellules :**

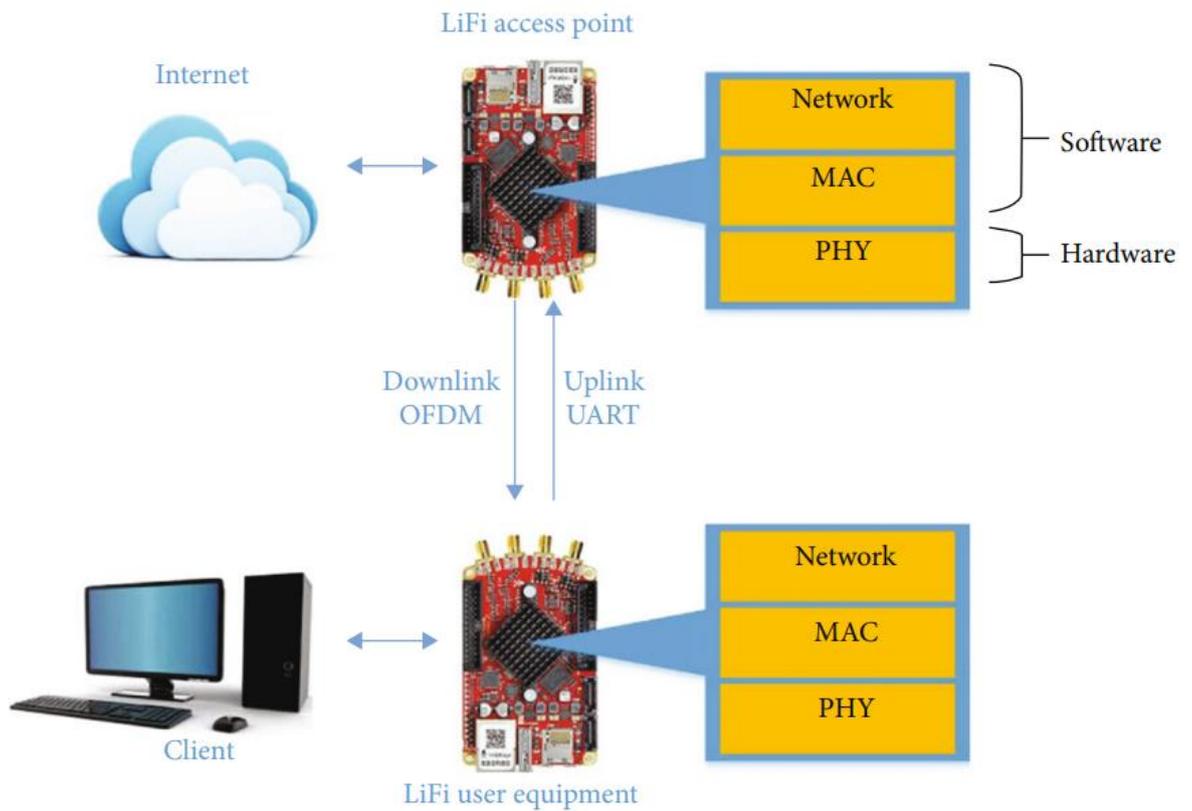
Les petites cellules (Small cells) sont des stations de base de petite taille qui sont utilisées pour améliorer la couverture et la qualité de la connexion dans la 5G. Contrairement aux grandes tours de transmission utilisées dans les générations précédentes de réseaux sans fil, sont conçus pour être installés dans des endroits densément peuplés, tels que les centres-villes, les stades et les centres commerciaux. Les Small cells peuvent être utilisés pour améliorer la couverture des zones à faible signal, réduire la congestion du réseau et améliorer la qualité de service en fournissant une connexion de haute qualité et une faible latence. En outre, les Small cells peuvent être utilisés pour fournir une connectivité de haute qualité à des objets connectés tels que les voitures autonomes et les capteurs IoT [7]. Comme on peut le voir sur la Figure I.8.



**Figure I.8 : Les petites cellules.**

#### **I.4.2.3. Li-Fi :**

Le Li-Fi est une technologie de communication sans fil qui utilise la lumière visible et infrarouge pour transmettre des données. Le Li-Fi utilise des LED pour transmettre des données à haute vitesse, en modulant l'intensité de la lumière à une fréquence très élevée. La technologie Li-Fi offre des débits de données élevés, une faible latence et une grande fiabilité, car la lumière visible ne traverse pas les murs et les obstacles physiques, réduisant ainsi les interférences avec d'autres appareils. Le Li-Fi peut être utilisé pour compléter les réseaux sans fil traditionnels dans les environnements intérieurs, tels que les bureaux, les hôpitaux et les centres commerciaux, où la disponibilité du spectre radio est limitée. Cependant, le Li-Fi présente également certaines limites, car la technologie ne fonctionne que dans des environnements bien éclairés et nécessite que les dispositifs doivent être équipés de récepteurs optiques pour recevoir les signaux Li-Fi [7]. Comme on peut le voir sur la Figure I.9.



**Figure I.9 : Système Li-Fi proposé pour l'accès à Internet.**

## **I.5. Les applications de la 5G :**

La 5G offre un potentiel énorme pour les applications destinées aux consommateurs. Voici quelques exemples :

### **I.5.1. Applications pour les consommateurs :**

#### **I.5.1.1. Téléphonie mobile :**

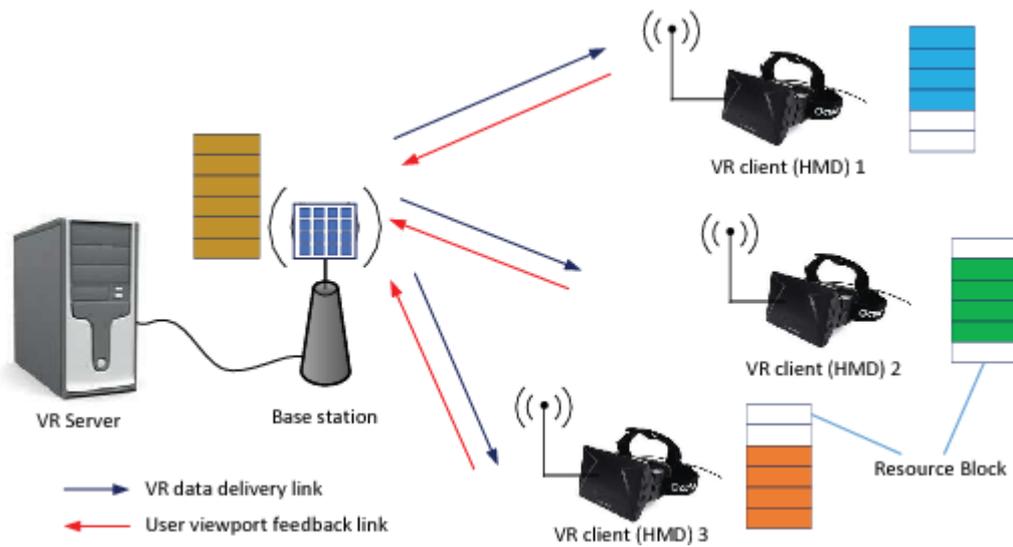
La 5G permettra une expérience de téléphonie mobile plus rapide et plus fiable pour les utilisateurs, avec des vitesses de téléchargement et de chargement plus rapides et une latence plus faible. Les appels vidéo en haute définition deviendront également plus accessibles grâce à la 5G [8].

**I.5.1.2. Services de vidéo et de musique en streaming :**

La 5G permettra des services de streaming vidéo et de musique plus rapides et plus fiables, avec des temps de chargement réduits et une qualité vidéo améliorée. Les utilisateurs pourront également profiter de la réalité virtuelle et augmentée en streaming grâce aux vitesses de données plus élevées de la 5G [8].

**I.5.1.3. Réalité augmentée et virtuelle :**

La 5G permettra des expériences de réalité augmentée et virtuelle plus avancées et plus immersives pour les utilisateurs comme on le voit sur la figure I.10. Les vitesses de données plus élevées et la latence plus faible permettront des temps de réponse plus rapides pour des applications telles que les jeux en réalité augmentée et les visites virtuelles [8].

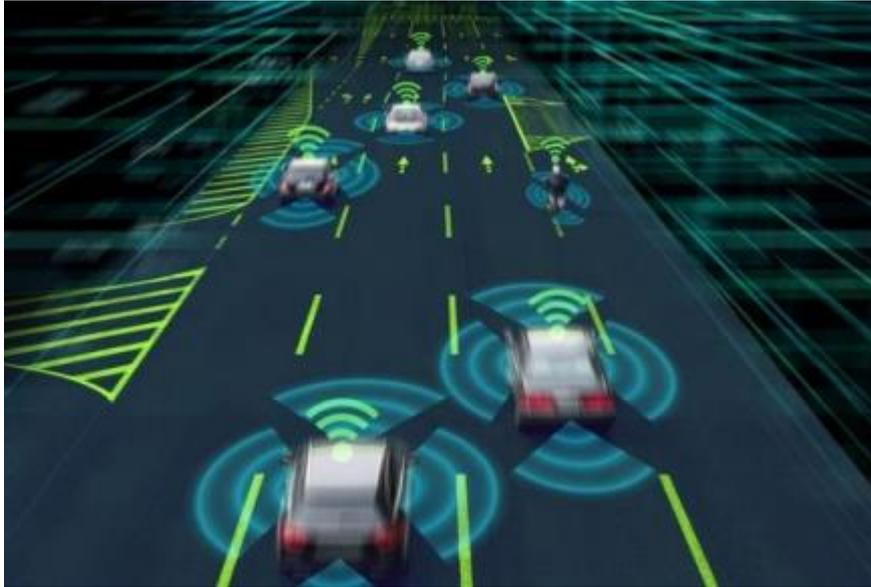


**Figure I.10 : Le modèle de système de réalité virtuelle sans fil multi-utilisateurs comprenant un serveur VR et un certain nombre de clients VR.**

## **I.5.2. Applications pour les entreprises :**

### **I.5.2.1. Voitures autonomes :**

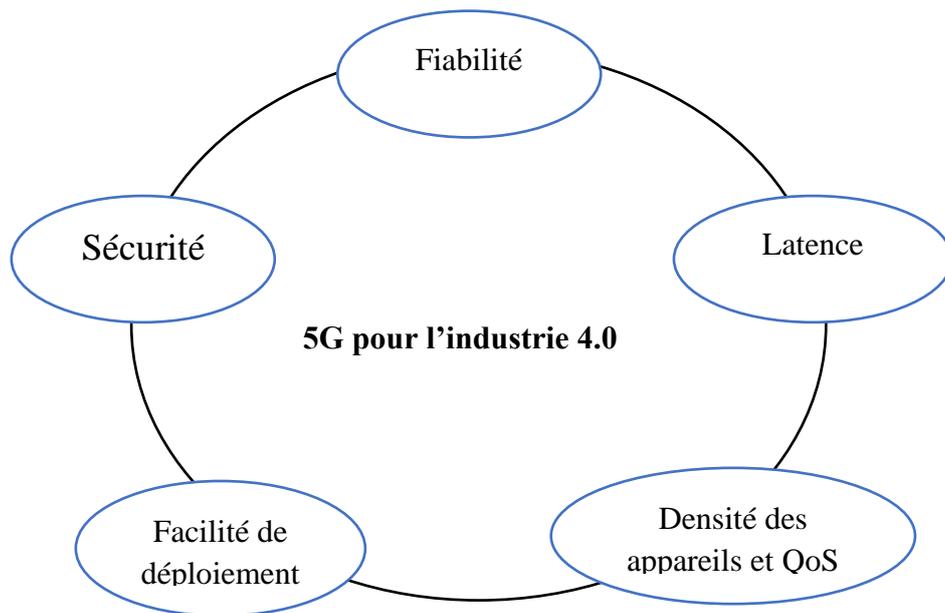
La 5G est essentielle pour les voitures autonomes, car elle permettra une communication en temps réel entre les véhicules, les infrastructures routières et les piétons. Cela permettra aux voitures autonomes de prendre des décisions en temps réel, d'éviter les collisions et de garantir la sécurité des passagers et des autres usagers de la route comme on le voit sur la figure I.11 [9].



**Figure I.11 : Illustration de l'interconnexion entre les voitures autonomes.**

### **I.5.2.2. Industrie 4.0 :**

La 5G est essentielle pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0, car elle permettra une communication en temps réel entre les machines et les usines comme on le voit sur la figure I.12. Cela permettra aux entreprises de surveiller et de contrôler leurs opérations à distance, de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la productivité [9].



**Figure I.12 : Opportunité de communication 5G pour l'industrie 4.0.**

### **I.5.2.3. Internet des objets :**

La 5G permettra la connectivité de milliards d'appareils IoT, permettant aux entreprises de surveiller et de contrôler leurs opérations à distance. La 5G permettra également une communication en temps réel entre les appareils, ce qui permettra une automatisation avancée et une prise de décision en temps réel [9], comme illustrée sur la figure I.13.



**Figure I.13 : Internet des objets.**

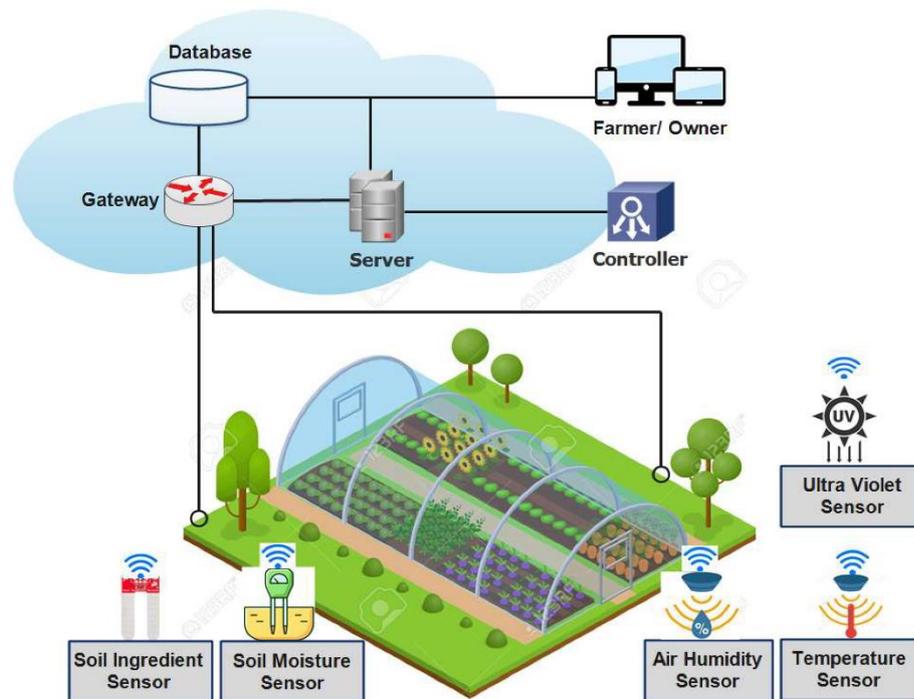
**I.5.2.4. Réseaux privés 5G :**

La 5G permettra aux entreprises de mettre en place des réseaux privés 5G pour leurs opérations critiques, tels que les opérations de fabrication ou les opérations de maintenance d'infrastructures. Les réseaux privés 5G offrent une sécurité et une fiabilité supérieures par rapport aux réseaux publics, tout en offrant des vitesses de données plus élevées et une latence plus faible [9].

**I.5.3. Applications pour l'industrie :**

**I.5.3.1. Agriculture intelligente :**

La 5G permettra aux agriculteurs d'utiliser des capteurs IoT pour surveiller les cultures en temps réel, permettant ainsi une surveillance et une maintenance plus efficaces comme on peut le voir sur la Figure I.14. Les capteurs peuvent fournir des informations sur l'humidité, la température, la qualité du sol et la croissance des plantes, permettant aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées sur la manière d'améliorer leurs cultures [10].



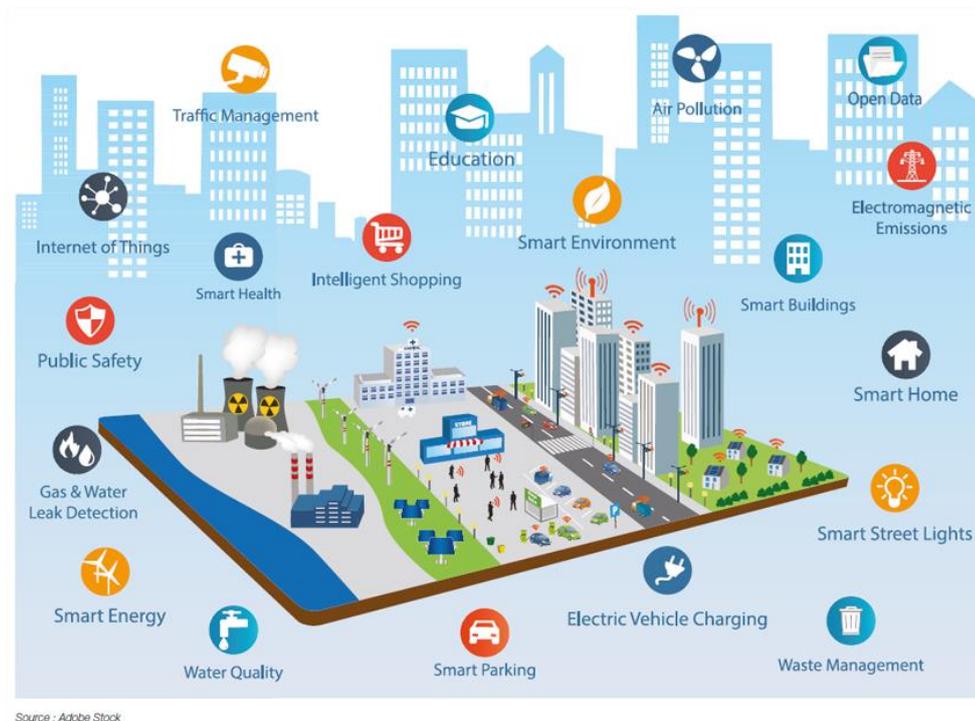
**Figure I.14 : Une illustration de l'application IoT pour surveiller les conditions agricoles dans une serre.**

**I.5.3.2. Santé connectée :**

La 5G permettra des avancées significatives dans la santé connectée, en permettant des diagnostics et des traitements plus rapides et plus précis. Les professionnels de la santé pourront utiliser des technologies telles que la télémédecine, la chirurgie à distance et les dispositifs médicaux IoT pour surveiller les patients à distance et fournir des soins plus efficaces [10].

**I.5.3.3. Ville intelligente :**

La 5G permettra la mise en place de villes intelligentes, avec des technologies de surveillance et de contrôle à distance permettant une utilisation plus efficace des ressources et une gestion plus intelligente des infrastructures urbaines. Les villes intelligentes pourront utiliser des capteurs IoT pour surveiller la circulation, l'éclairage public, la qualité de l'air et de l'eau, améliorant ainsi la qualité de vie des citoyens [10], comme on peut le voir sur la figure I.15.



**Figure I.15 : Les éléments constitutifs de la ville intelligente.**

## **I.6. Les enjeux de la mise en place de la 5G :**

La 5G est la prochaine génération de technologie sans fil qui permettra des vitesses de données plus élevées, une latence plus faible et une connectivité plus stable pour les utilisateurs. Cependant, sa mise en place présente des défis techniques ainsi que des enjeux économiques et environnementaux. Dans cette section, nous examinerons les défis techniques de la 5G, notamment la couverture, la sécurité et l'interopérabilité.

### **I.6.1. Les défis techniques :**

#### **I.6.1.1. La couverture :**

L'un des principaux défis techniques de la 5G est la couverture. La 5G utilise des fréquences plus élevées que les technologies sans fil précédentes, ce qui signifie que les signaux ne peuvent pas voyager aussi loin et sont plus facilement bloqués par les obstacles tels que les bâtiments et les arbres. Par conséquent, la densité des antennes sera plus élevée et le déploiement de la 5G nécessitera davantage d'infrastructures, de matériel et d'investissements. La 5G doit également être en mesure de fournir une couverture mondiale, y compris dans les régions rurales et éloignées, ce qui nécessite une planification et une coordination minutieuses des opérateurs de télécommunications [11].

#### **I.6.1.2. La sécurité :**

Un autre défi technique de la 5G est la sécurité. La 5G permettra une connectivité plus étroite entre les appareils, ce qui augmentera le risque de piratage et de cyberattaques. Les données échangées entre les appareils 5G doivent être protégées contre le vol, la corruption ou la falsification. Les opérateurs de télécommunications devront mettre en place des mesures de sécurité avancées telles que le chiffrement des données, l'authentification des utilisateurs et la surveillance des menaces pour garantir la sécurité du réseau [12], comme on peut le voir sur la figure I.16.

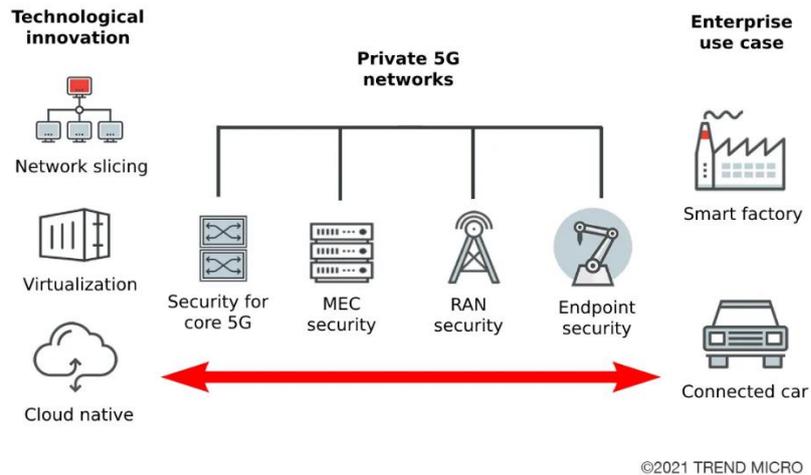


Figure I.16 : Sécurité de bout en bout dans la 5G d'entreprise.

### I.6.1.3. L'interopérabilité :

Enfin, un autre défi technique de la 5G est l'interopérabilité. La 5G doit être en mesure de fonctionner avec les réseaux 4G et les technologies sans fil précédentes pour permettre une transition en douceur vers la 5G. Les opérateurs de télécommunications devront garantir que les appareils 5G sont compatibles avec les réseaux existants, afin que les utilisateurs puissent continuer à utiliser leurs appareils et leurs services sans interruption. Les normes de l'industrie telles que 3GPP travaillent actuellement sur la définition des normes et des spécifications de la 5G pour garantir l'interopérabilité [13].

### I.6.2. Les enjeux économiques et environnementaux :

#### I.6.2.1. Coûts de déploiement et de maintenance :

La mise en place de la 5G nécessitera des investissements considérables de la part des opérateurs de télécommunications, notamment pour le déploiement de l'infrastructure, l'acquisition de spectre et la mise à niveau des équipements. Les coûts de déploiement de la 5G sont estimés à plusieurs milliards de dollars et varient d'un pays à l'autre en fonction des réglementations, des conditions géographiques et des coûts de main-d'œuvre [14]. Les opérateurs de télécommunications devront également trouver des moyens de rentabiliser ces investissements, ce qui peut impliquer l'augmentation des tarifs pour les consommateurs.

### **I.6.2.2. Impact environnemental :**

La mise en place de la 5G peut également avoir un impact environnemental, en particulier en termes de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre. La densité des antennes nécessaires pour assurer une couverture adéquate de la 5G peut augmenter la consommation d'énergie et entraîner une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Les opérateurs de télécommunications doivent prendre des mesures pour minimiser l'impact environnemental de la 5G, telles que l'utilisation de technologies d'énergie propre et l'amélioration de l'efficacité énergétique des réseaux [14].

### **I.6.2.3. Répartition des bénéfices de la 5G :**

La mise en place de la 5G aura également des implications économiques en termes de répartition des bénéfices. Les opérateurs de télécommunications devront investir des sommes considérables pour le déploiement de la 5G, mais ils devraient également bénéficier de revenus supplémentaires grâce à l'augmentation du nombre d'appareils connectés et des services associés. Cependant, il y a une question de savoir si les bénéfices de la 5G seront répartis de manière équitable entre les opérateurs de télécommunications et les consommateurs. Certains critiques ont mis en avant le risque de voir les opérateurs de télécommunications imposer des tarifs élevés pour l'accès à la 5G, ce qui pourrait limiter l'accès des consommateurs à cette technologie [14].

## **I.7. Les perspectives d'avenir de la 5G :**

La 5G est encore relativement récente et son déploiement se poursuit dans de nombreux pays. Cependant, déjà des évolutions futures sont envisagées pour cette technologie de communication sans fil.

### **I.7.1. Évolutions futures de la 5G :**

#### **I.7.1.1. Normes et standards :**

L'évolution de la 5G est étroitement liée à l'évolution des normes et des standards. Les normes techniques jouent un rôle crucial dans l'interopérabilité et l'harmonisation des réseaux de télécommunications à travers le monde. Les organismes de normalisation tels que l'Union internationale des télécommunications (UIT) et l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) travaillent sur les futures évolutions de la 5G, notamment la 5G évoluée (5G+) et la 6G. La 5G évoluée devrait offrir des améliorations significatives en termes de débit, de latence et de qualité de service [15].

**I.7.1.2. Développement de nouvelles applications :**

La 5G ouvre la voie à de nombreuses applications et services innovants tels que la réalité augmentée, la télémédecine, la conduite autonome, la réalité virtuelle, l'Internet des objets et la ville intelligente. Ces applications sont possibles grâce aux performances améliorées de la 5G, notamment la faible latence et la grande bande passante. Les fournisseurs de services de télécommunications, les fabricants de terminaux et les développeurs d'applications travaillent ensemble pour développer de nouveaux services et applications pour la 5G [15].

**I.7.1.3. Coexistence avec les technologies sans fil existantes :**

La 5G doit coexister avec les technologies sans fil existantes, telles que la 4G, le Wi-Fi et le Bluetooth. Cette coexistence peut poser des défis en matière d'interopérabilité, de sécurité et de qualité de service. Les réseaux de télécommunications devront être conçus de manière à prendre en compte cette coexistence. Des solutions telles que la virtualisation des réseaux et l'orchestration de services peuvent aider à résoudre ces problèmes [15].

**I.7.2. Impacts sociaux et économiques de la 5G :**

**I.7.2.1. Transformation des modes de travail et de vie :**

La 5G aura un impact significatif sur les modes de travail et de vie. Les travailleurs pourront travailler à distance avec des performances similaires à celles du bureau, les villes intelligentes pourront gérer plus efficacement les infrastructures et les services, et la santé sera améliorée grâce à des technologies telles que la télémédecine. Cependant, la 5G pourrait également entraîner une augmentation de la dépendance aux technologies, une diminution de la vie privée et une augmentation de la fracture numérique [16].

**I.7.2.2. Opportunités économiques :**

La 5G offre de nombreuses opportunités économiques, notamment dans les secteurs de la santé, de la fabrication, de l'agriculture et des transports. Les entreprises pourront utiliser la 5G pour augmenter leur efficacité et leur productivité, développer de nouveaux produits et services et accéder à de nouveaux marchés [16].

**I.7.2.3. Questions de régulation et d'éthique :**

La 5G soulève des questions de régulation et d'éthique. Les régulateurs doivent s'assurer que les fréquences utilisées par la 5G ne causent pas de perturbations préjudiciables aux autres utilisateurs des fréquences radioélectriques, tout en permettant une utilisation efficace et équitable des fréquences [40]. De plus, les préoccupations en matière de confidentialité et de sécurité des données ont été soulevées, car la 5G permet une collecte de données plus importante et plus rapide. Les régulateurs doivent travailler avec les fournisseurs de services de télécommunications pour garantir que les normes de sécurité et de confidentialité sont respectées [41]. Enfin, il y a des préoccupations quant aux effets potentiels sur la santé liée à l'exposition aux ondes électromagnétiques de la 5G. Les régulateurs doivent garantir que les niveaux d'exposition sont sûrs pour les êtres humains [16].

**I.8. Conclusion :**

En conclusion, le déploiement de la 5G est une étape importante dans l'évolution des technologies de communication sans fil. La 5G offre des avantages significatifs tels qu'une vitesse de données plus rapide, une latence plus faible et une connectivité plus stable pour les utilisateurs. Cependant, sa mise en place présente des défis techniques, économiques et environnementaux importants, notamment en ce qui concerne la couverture, la sécurité et l'interopérabilité.

Malgré ces défis, les perspectives d'avenir de la 5G sont prometteuses. Les normes et les standards continuent d'évoluer pour améliorer les performances de la 5G et faciliter sa mise en place.

**I.9. Références:**

- [1] E. Dahlman et al., 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Academic Press, 2013.
- [2] P. Rost et al., "Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 5, pp. 72-79, May 2017.
- [3] X. Foukas et al., "Network Slicing in 5G: Survey and Challenges," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 5, pp. 94-100, May 2017.
- [4] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. W. Heath Jr., "The massive MIMO: An overview," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 1, pp. 16-28, Jan. 2013.
- [5] Y. Li, Z. Li, and Y. Li, "Beamforming techniques for 5G wireless communications," IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 3, pp. 40-49, June 2016.
- [6] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, "On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 19, no. 3, pp. 1657-1681, third quarter 2017.
- [7] Haas, H. (2016) 'Li-Fi: Wireless Communication at the Speed of Light', IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 34(4), pp. 1-7.
- [8] 5G Technology: Revolutionizing Mobile Communication Standards. (2021). IEEE Xplore.
- [9] Zhang, W., & Yang, L. T. (2021). The 5G Autonomous Car: Vision and Challenges. IEEE Network, 35(3), 28-34.
- [10] Li, X., Chen, M., Wang, X., & Li, W. (2021). A survey of 5G applications in smart cities. IEEE Internet of Things Journal, 8(7), 5211-5232.
- [11] "5G Infrastructure Deployment: State of Play in Europe, USA, and Asia", ScienceDirect, 2020.
- [12] "5G Security: Analysis, Requirements, and Solutions", IEEE, 2020.
- [13] "5G Standardization: The 3GPP Perspective", IEEE Communications Magazine, 2020.
- [14] Brouillard, P., & Aïssaoui, M. (2018). Les enjeux économiques de la 5G. In Réseaux et télécommunications (pp. 197-211). ISTE Editions.
- [15] "Coexistence of 5G with legacy wireless technologies", IEEE Communications Magazine, 2020.
- [16] "5G and Data Protection", European Data Protection Supervisor, 2020.

## **Chapitre II : Les Filtres Micro-Ondes**

### **II.1. Introduction :**

Les filtres micro-ondes sont des composants essentiels des systèmes de communication modernes. Ils sont utilisés pour améliorer la qualité de la transmission de données dans différents types de systèmes de communication tels que les téléphones mobiles, les radars, les satellites, les réseaux sans fil, etc. Ils sont également utilisés dans d'autres domaines tels que l'industrie spatiale, la médecine, la métrologie, etc.

Ce chapitre est destiné à donner une vue d'ensemble sur les filtres micro-ondes. Nous allons présenter la définition, le rôle ainsi que les types de filtres micro-ondes. Nous allons également présenter les composants des filtres micro-ondes, leurs caractéristiques et leurs techniques de conception ainsi que la transformation des filtres à partir du prototype passe bas. Enfin, nous présentons l'utilisation des filtres micro-ondes dans les systèmes de communication 5G.

### **II.2. Définition et rôle des filtres micro-ondes :**

Les filtres micro-ondes sont des dispositifs électroniques essentiels dans les systèmes de communication moderne car ils permettent de filtrer les signaux indésirables et de réduire les interférences, ce qui permet d'améliorer la qualité de la transmission des données. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines.

### **II.3. Classification des filtres :**

Les filtres sont généralement classés en quatre catégories en fonction des fréquences qu'ils transmettent et des fréquences qu'ils atténuent : les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande, comme illustré à la figure II.1. Ces filtres peuvent être réalisés avec une variété de structures, en utilisant des résistances, des condensateurs et des inductances [1].

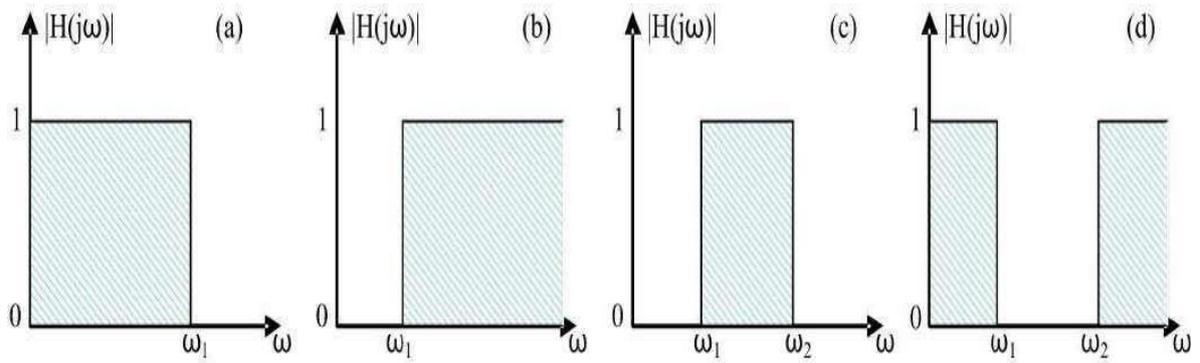


Figure II.1 : Gabarit d'un filtre idéal : (a) passe-bas, (b) passe-haut, (c) passe-bande, (d) coupe-bande

$H(j\omega)$  : est la fonction de transfert du filtre.

### II.3.1. Filtre passe-bas :

Un filtre passe-bas permet le passage des signaux de basse fréquence tout en atténuant les signaux de haute fréquence comme le montre la figure II.2.

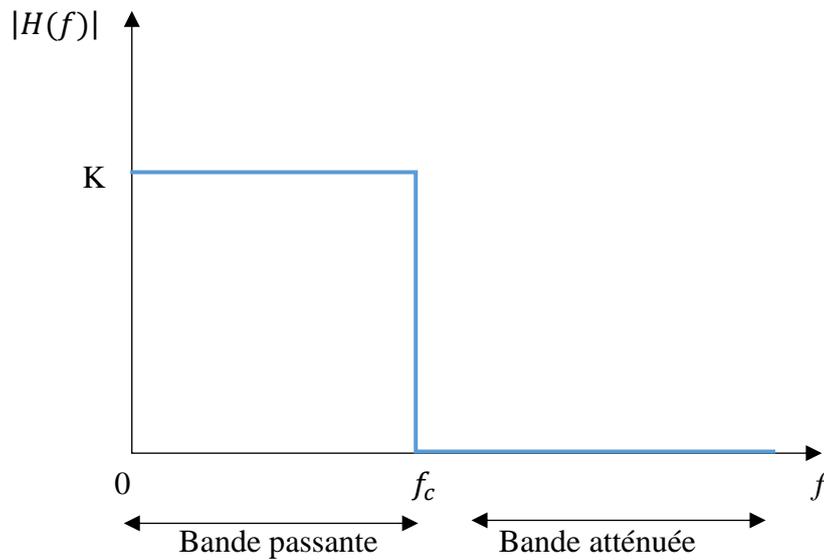


Figure II.2 : Gabarit du filtre passe-bas idéal

Les filtres passe-bas sont couramment utilisés pour les applications telles que la suppression de bruit et la protection des circuits électroniques contre les signaux de haute fréquence indésirables.

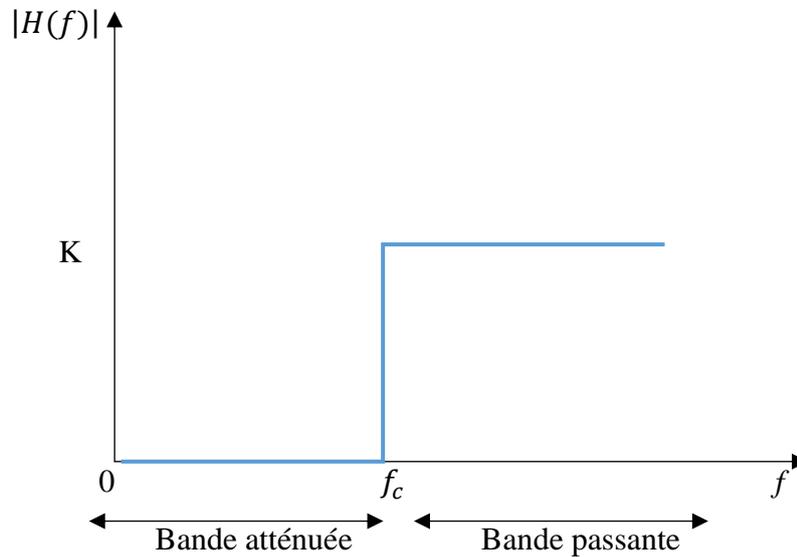
La réponse fréquentielle d'un filtre passe-bas s'écrit sous la forme (II.1) :

$$H(f) = \begin{cases} Ke^{-j2\pi f a} & \text{si } |f| \leq f_c, \\ 0 & \text{si } |f| > f_c \end{cases} \quad (II.1)$$

K et  $f_a$  sont deux paramètres du filtre et  $f_c$  est la « fréquence de coupure » (cutoff frequency).

### II.3.2. Filtre passe-haut :

Un filtre passe-haut permet le passage des signaux de haute fréquence tout en atténuant les signaux de basse fréquence comme le montre la figure II.3.



**Figure II.3 : Gabarit du filtre passe-haut idéal**

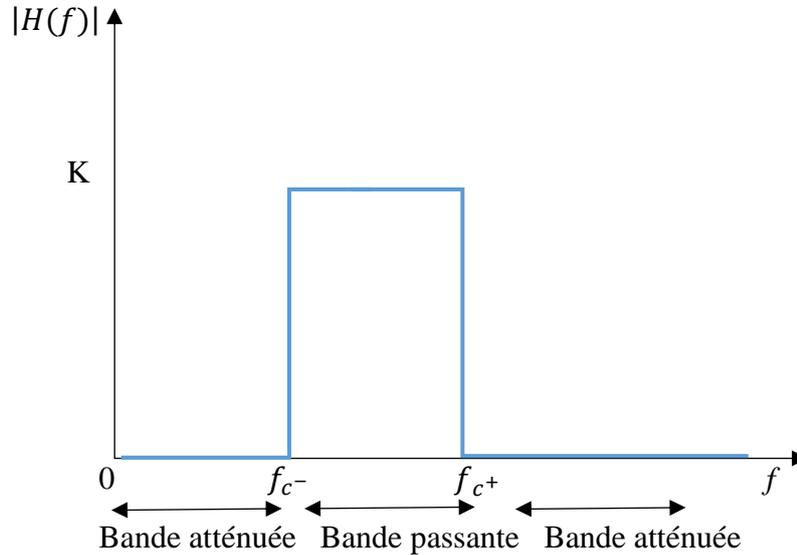
Les filtres passe-haut sont couramment utilisés dans les applications telles que la suppression de bruit et l'élimination de signaux de basse fréquence indésirables.

La réponse fréquentielle d'un filtre passe-haut s'écrit sous la forme (II.2) :

$$H(f) = \begin{cases} Ke^{-j2\pi f a} & \text{si } |f| \geq f_c, \\ 0 & \text{si } |f| < f_c \end{cases} \quad (II.2)$$

**II.3.3. Filtre passe-bande :**

Un filtre passe-bande permet le passage des signaux dans une plage de fréquence spécifique tout en atténuant les signaux en dehors de cette plage comme le montre la figure II.4.



**Figure II.4 : Gabarit du filtre passe-bande idéal**

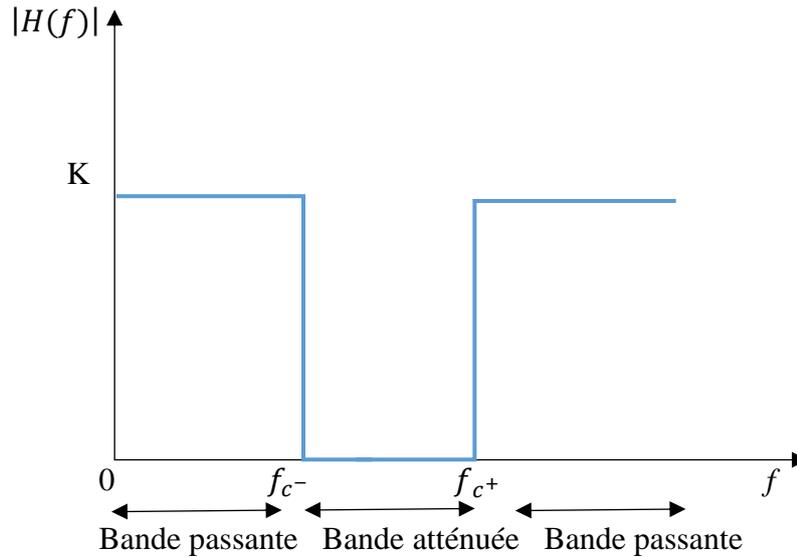
Les filtres passe-bande sont couramment utilisés dans les applications telles que la séparation des signaux et la réjection des interférences.

La réponse fréquentielle d'un filtre passe-bande s'écrit sous la forme (II.3) :

$$H(f) = \begin{cases} Ke^{-j2\pi f_a} & \text{si } f_{c-} \leq |f_c| \leq f_{c+}, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

**II.3.4. Filtre coupe-bande :**

Un filtre coupe-bande atténue les signaux dans une plage de fréquence spécifique tout en permettant le passage des signaux en dehors de cette plage comme le montre la figure II.5.



**Figure II.5 : Gabarit du filtre coupe-bande idéal**

Les filtres coupe-bande sont couramment utilisés dans les applications telles que la suppression de signaux parasites et l'élimination des interférences.

La réponse fréquentielle d'un filtre coupe-bande s'écrit sous la forme (II.4) :

$$H(f) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_{c-} \leq |f_c| \leq f_{c+}, \\ Ke^{-j2\pi f_a} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

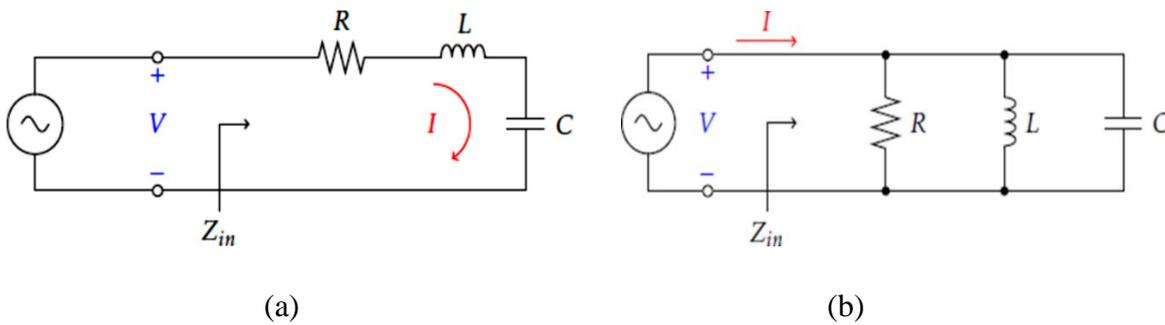
#### **II.4. Composants des filtres micro-ondes**

Les filtres micro-ondes sont principalement construits à partir de composants tels que des circuits résonnants, des lignes de transmission, des résonateurs diélectriques, des cavités métalliques, etc. Ces composants sont choisis en fonction des caractéristiques du filtre désiré, telles que la bande passante, la sélectivité, la réjection de bande, l'impédance d'entrée et de sortie, etc.

**II.4.1. Circuits résonnants :**

Les circuits résonnants sont des éléments clés dans la réalisation de filtres micro-ondes. Ce sont des circuits qui résonnent à une fréquence spécifique en raison de la capacité et de l'inductance présentes dans le circuit.

Les circuits résonnants sont utilisés dans les filtres micro-ondes pour créer une résonance à une fréquence particulière qui permet de sélectionner ou rejeter les signaux à cette fréquence. Les circuits résonnants peuvent être réalisés sous différentes formes [2], telles que les résonateurs piézoélectriques, les résonateurs diélectriques, les résonateurs à cavité, etc. La figure II.6 montrent un circuit résonnant série et un circuit résonnant parallèle.



**Figure II.6 : (a) Circuit résonnant série, (b) Circuit résonnant parallèle [12].**

**II.4.2. Lignes de transmission :**

Les lignes de transmission sont des conducteurs utilisés pour transmettre des signaux micro-ondes d'un point à un autre. Les types courants de lignes de transmission comprennent les lignes coaxiales et les lignes à microruban comme le montre la figure II-7.

Les lignes de transmission sont importantes dans la conception de filtres micro-ondes car elles déterminent la bande passante et la réjection de bande du filtre [2].



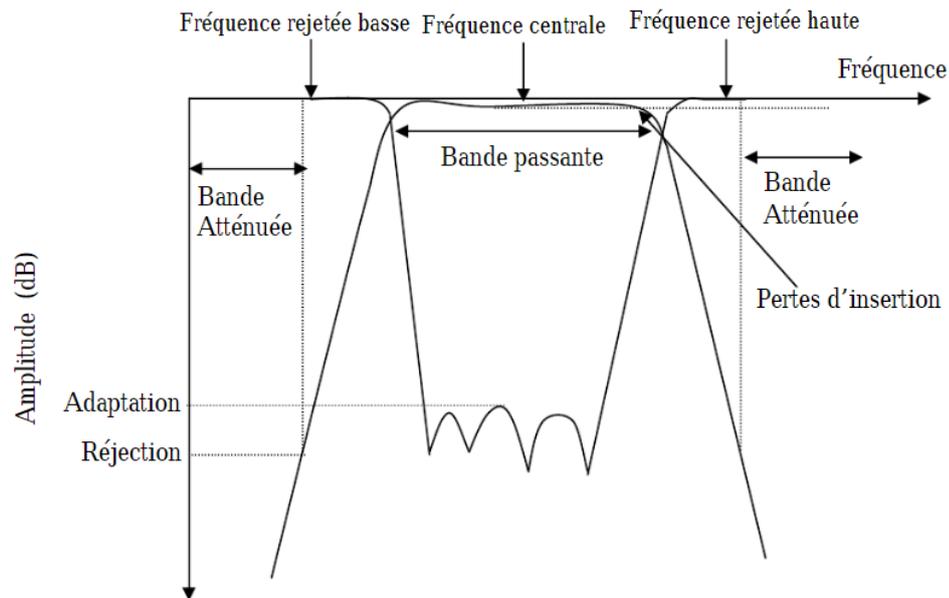
**Figure II.7 : Lignes de transmission [13].**

## **II.5. Caractéristiques des filtres micro-ondes :**

Les filtres micro-ondes sont caractérisés par différentes propriétés qui déterminent leurs performances et leurs efficacités dans le domaine des micro-ondes. Les principales caractéristiques des filtres micro-ondes sont les suivantes :

### **II.5.1. Perte d'insertion :**

La perte d'insertion est une mesure de la quantité de puissance qui est perdue lorsqu'un signal passe à travers un filtre. Les filtres idéaux ne devraient pas avoir de perte d'insertion, mais dans la pratique, il y a toujours une certaine quantité de perte de puissance. La perte d'insertion peut être mesurée en décibels (dB), et elle dépend de la fréquence du signal, ainsi que de la conception et de la qualité du filtre [2] [3] comme la montre la figure II.8.



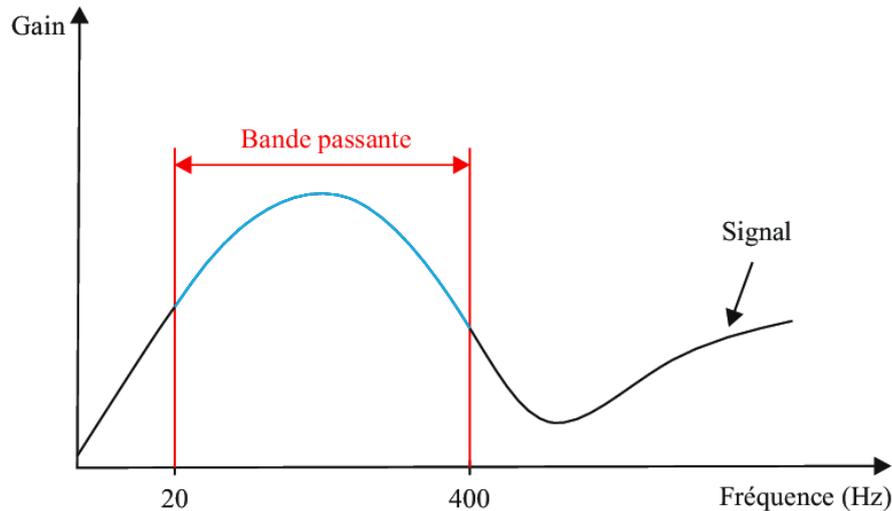
**Figure II.8 : Gabarit d'un filtre passe-bande montrant la perte d'insertion [14].**

### **II.5.2. Sélectivité :**

La sélectivité est une mesure de la capacité d'un filtre à rejeter les signaux indésirables en dehors de la bande passante du filtre. Les filtres sélectifs ont une capacité de rejet élevée et sont utilisés pour séparer les signaux dans des applications telles que la communication par satellite. La sélectivité d'un filtre dépend de la conception du filtre et de la bande passante du filtre [3]

### **II.5.3. Bande passante :**

La bande passante est la plage de fréquences à travers laquelle un filtre permet le passage des signaux. La bande passante est déterminée par la conception du filtre et peut varier en fonction de la fréquence. Les filtres à bande passante étroite sont utilisés pour isoler les signaux à des fréquences spécifiques, tandis que les filtres à bande passante large sont utilisés pour transmettre un large éventail de signaux [3] comme le montre la figure II.9.



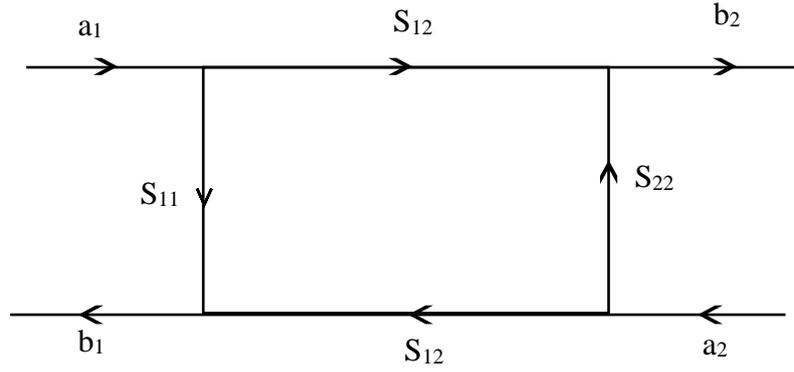
**Figure II.9 : Bande passante du filtre entre 20 et 400 Hz et largeur de bande du signal EMG [15].**

### **II.5.4. Les paramètres S :**

Les paramètres S (ou scattering parameters) sont une mesure importante des performances des filtres micro-ondes. Ils sont utilisés pour caractériser la capacité d'un filtre à transmettre et à réfléchir les signaux à des fréquences spécifiques.

Les paramètres S sont généralement exprimés sous forme de matrices de coefficients complexes qui décrivent les relations entre les signaux d'entrée et de sortie du filtre comme illustré sur la figure II.10.

Les paramètres S permettent de déterminer la perte d'insertion, la sélectivité, la bande passante et la réjection de bande d'un filtre micro-ondes, ainsi que les propriétés de dispersion et d'atténuation [3].



**Figure II.10 : Représentation quadripolaire d'un filtre**

À partir de la figure II.10 nous pouvons déduire les équations suivantes :

$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12} \quad (\text{II.5})$$

$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22} \quad (\text{II.6})$$

$$[a] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{Z_{01}}}{V_1^+} \\ \frac{\sqrt{Z_{02}}}{V_1^+} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{Z_{01}}}{V_1^-} \\ \frac{\sqrt{Z_{02}}}{V_1^-} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

La matrice S est donnée par l'équation II.9 :

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les paramètres S sont donnés par les équations suivantes :

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \text{ lorsque } a_2 = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \text{ lorsque } a_1 = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \text{ lorsque } a_2 = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \text{ lorsque } a_1 = 0 \quad (\text{II.13})$$

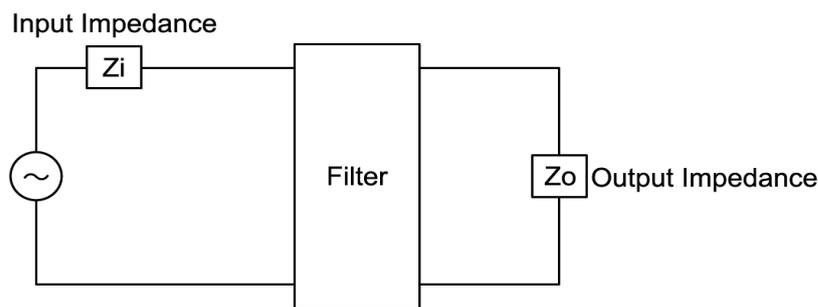
En résumé :

- $S_{11}$  : Le coefficient de réflexion à l'entrée lorsqu'il y a adaptation de la sortie.
- $S_{12}$  : Le coefficient de transmission lorsqu'il y a adaptation de l'entrée.
- $S_{21}$  : Le coefficient de transmission lorsqu'il y a adaptation de la sortie.
- $S_{22}$  : Le coefficient de réflexion lorsqu'il y a adaptation de la sortie.

### II.5.5. Impédance d'entrée et de sortie :

L'impédance d'entrée et de sortie d'un filtre est l'impédance qu'un filtre offre au flux de courant alternatif qui le traverse. L'impédance d'entrée et de sortie est importante car elle affecte la manière dont le filtre interagit avec d'autres composants du système comme illustré sur la figure II-11.

Les filtres micro-ondes sont conçus pour fonctionner à des impédances spécifiques, qui peuvent varier en fonction de la conception et de l'application du filtre [3].



**Figure II.11 : Impédance d'entrée et de sortie d'un filtre [16].**

$Z_i$  : L'impédance d'entrée.

$Z_o$  : L'impédance de sortie.

### II.6. Différents types de filtres micro-ondes :

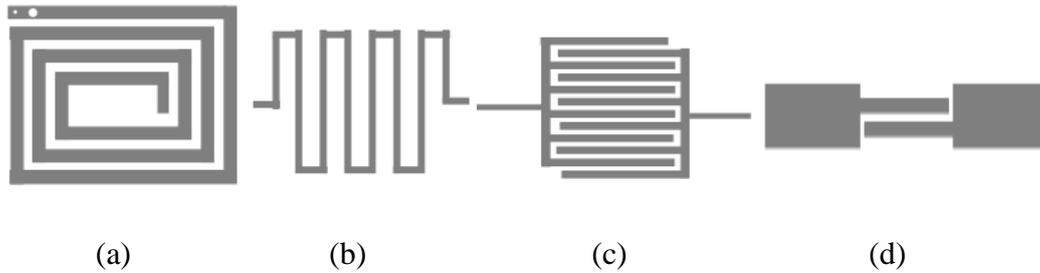
Il existe plusieurs types de filtres micro-ondes, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages.

#### II.6.1. Filtres micro-ondes planaires :

Les filtres planaires sont des filtres micro-ondes qui utilisent des lignes de transmission imprimées sur un substrat planaire. Ils offrent de nombreux avantages, tels qu'une faible perte

d'insertion, une miniaturisation, une intégration avec d'autres circuits planaires, et une fabrication à faible coût, comme le montre la figure II-12.

Les filtres planaires peuvent être classés en filtres passifs et actifs. Les filtres planaires passifs comprennent les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande, tandis que les filtres planaires actifs sont utilisés pour amplifier ou atténuer le signal [4].



**Figure II.12 : Éléments semi-localisés : (a) inductance en spirale, (b) inductance en méandre, (c) capacité de découplage (d) capacité interdiguée [16].**

### **II.6.2. Filtres passifs volumiques :**

Les filtres passifs volumiques sont des filtres micro-ondes qui utilisent des composants en trois dimensions, tels que les guides d'ondes, les cavités métalliques et les résonateurs diélectriques.

Les filtres passifs volumiques offrent des caractéristiques de filtrage supérieures à celles des filtres planaires, notamment une meilleure sélectivité et une meilleure réjection de bande. Ils sont généralement plus grands et plus coûteux à fabriquer que les filtres planaires.

Les filtres passifs volumiques peuvent être classés en filtres à guides d'ondes, filtres à résonateurs diélectriques et filtres à cavités métalliques.

#### **II.6.2.1. Filtres à guides d'ondes :**

Les filtres à guides d'ondes sont des filtres micro-ondes qui utilisent des structures de guide d'ondes pour créer des résonances à des fréquences spécifiques. La figure II-13 montre un filtre en guides d'ondes à nervures.

Les filtres à guides d'ondes offrent une haute sélectivité et une bande passante étroite, mais sont plus encombrants que les filtres planaires. Ils sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une grande puissance ou une bande passante étroite, telle que les systèmes de communication par satellite [5].



**Figure II.13 : Filtre en guides d'ondes à nervures [17]**

#### **II.6.2.2. Filtres à résonateurs diélectriques :**

Les filtres à résonateurs diélectriques sont des filtres micro-ondes qui utilisent des résonateurs diélectriques pour créer des résonances à des fréquences spécifiques. Ils sont plus petits et moins coûteux à fabriquer que les filtres à guides d'ondes, mais offrent une sélectivité inférieure.

Les filtres à résonateurs diélectriques sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une miniaturisation, telle que les téléphones mobiles et les systèmes de communication sans fil [5]. La figure II-14 montre un filtre à résonateurs diélectriques.

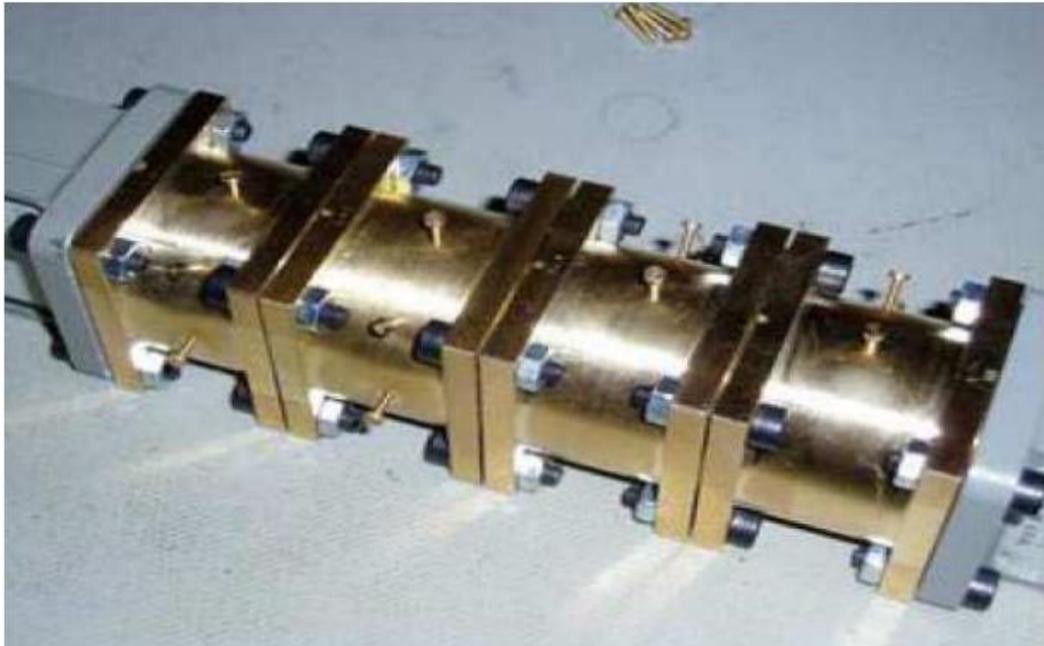


**Figure II.14 : Filtre à résonateurs diélectriques [17].**

**II.6.2.3. Filtres à cavités métalliques :**

Les filtres à cavités métalliques sont des filtres qui utilisent des cavités métalliques résonantes pour filtrer les signaux micro-ondes. Les cavités métalliques sont des cavités fermées avec des parois métalliques, qui agissent comme des résonateurs pour certaines fréquences de signaux micro-ondes. La figure II-15 montre un filtre à cavités métalliques cylindriques avec vis de réglage.

Les filtres à cavités métalliques présentent des avantages tels qu'une excellente sélectivité, une faible perte d'insertion et une bonne capacité à gérer des niveaux de puissance élevés. Cependant, ils sont plus volumineux et plus coûteux que les autres types de filtres micro-ondes [4].



**Figure II.15 : Filtre à cavités métalliques cylindriques avec vis de réglage [17].**

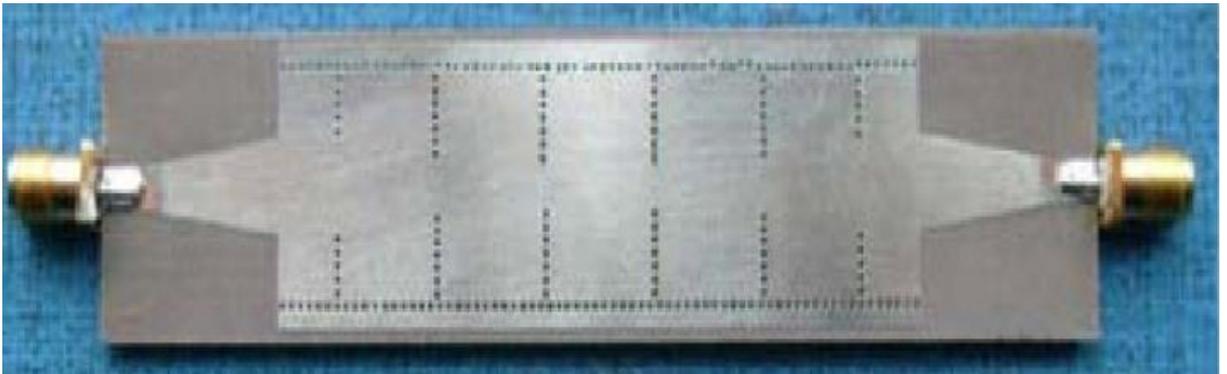
**II.6.3. Filtres SIW :**

Les filtres SIW (Substrate Integrated Waveguide) sont des filtres micro-ondes qui combinent les avantages des filtres planaires et des filtres volumiques en utilisant des structures planaires intégrées avec des guides d'ondes en trois dimensions. La figure II-16 montre un filtre SIW.

Les filtres SIW offrent une bonne sélectivité, une faible perte d'insertion, une miniaturisation et une intégration avec d'autres circuits planaires. Ils sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une haute sélectivité et une bande passante étroite, telles que les systèmes radar et de communication [5]. Ils ont une taille compacte et une conception simple, ce qui les rend facilement intégrables dans des circuits et des systèmes. De plus, ils peuvent être adaptés pour fonctionner dans une large gamme de fréquences, ce qui les rend polyvalents dans de nombreuses applications.

Les filtres SIW peuvent également être utilisés en conjonction avec d'autres éléments ou dispositifs passifs pour former des dispositifs plus complexes tels que des duplexeurs, des multiplexeurs ou des filtres à balayage.

Les duplexeurs SIW sont particulièrement courants dans les applications de télécommunications, où ils permettent la transmission et la réception simultanées sur une même antenne [6].



**Figure II.16 : Filtre SIW (Substrate Integrated Waveguide) [18].**

### **II.7. Conception de filtres micro-ondes :**

La conception de filtres micro-ondes est une étape cruciale dans le développement de systèmes de communication et de nombreux autres dispositifs.

Pour concevoir un filtre, la première étape consiste à déterminer le type de filtre requis et à choisir une méthode de connexion des condensateurs et bobines du filtre. Il existe deux méthodes de connexion des composants, comme illustré dans la figure II-17.

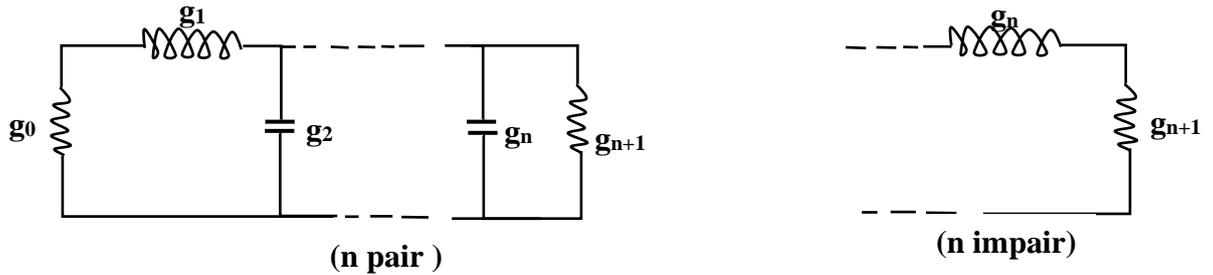


Figure II.17 : Prototype de filtre dans la topologie de Cauer, n représente l'ordre du filtre.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour concevoir des filtres en fonction des spécifications requises. Trois méthodes couramment utilisées sont la méthode de Butterworth, la méthode de Tchebychev et la méthode elliptique.

### II.7.1. La méthode de Butterworth :

La méthode de Butterworth est une technique qui vise à obtenir une réponse de fréquence plate dans la bande passante du filtre. Cette méthode donne une réponse en amplitude maximale pour la bande passante donnée et une pente de réponse régulière à l'extérieur de la bande passante.

La méthode de Butterworth est largement utilisée pour la conception de filtres passe-bas et passe-haut [7].

La fonction d'atténuation (en dB) qui définit la méthode de Butterworth peut être exprimée de la manière suivante :

$$\alpha_{dB} = 10 \log_{10} \left( 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right) \quad (\text{II.14})$$

Cela fait référence à l'amplitude de la réponse du coefficient de transmission :

$$|S_{12}(j\omega)|^2 = \left( 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right)^{-1} \quad (\text{II.15})$$

Avec  $\omega_c = 2\pi f_c$  la pulsation de coupure.

à  $\omega = \omega_c$  on a une atténuation de 3 dB ( $\alpha = 3 \text{ dB}$ ), ou  $S_{12dB} = -3 \text{ dB}$  (puisque  $S_{12dB} = 20 \log_{10} |S_{12}|$ )

La réponse de la fonction de Butterworth en transmission pour diverses valeurs de n est illustrée dans la figure II.28 présentée ci-dessous.

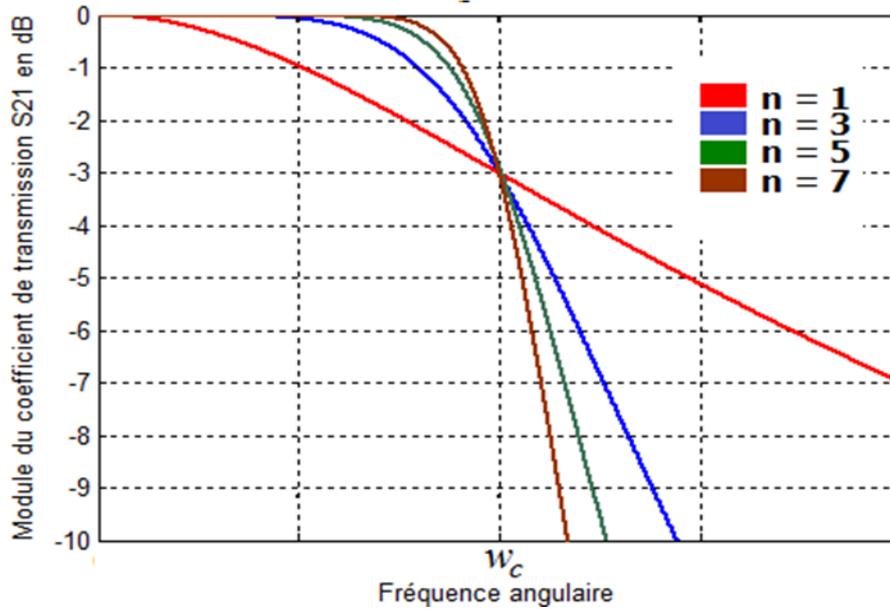


Figure II.18 : Réponse en transmission de la fonction de Butterworth pour différents ordres n [19].

Un exemple concret serait la création d'un filtre passe-bas, qui doit répondre à des spécifications données dans la figure II.17.

$$\text{à } \omega = \omega_1 : \quad \left(\frac{\omega_1}{\omega_c}\right)^{2n} = 10^{\frac{\alpha_1}{10}} - 1 \quad (\text{II.16})$$

$$\text{à } \omega = \omega_2 : \quad \left(\frac{\omega_2}{\omega_c}\right)^{2n} = 10^{\frac{\alpha_2}{10}} - 1 \quad (\text{II.17})$$

$$\text{d'où :} \quad \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^{2n} = \frac{10^{\frac{\alpha_1}{10}} - 1}{10^{\frac{\alpha_2}{10}} - 1} \quad (\text{II.18})$$

L'ordre n requis est donné par :

$$n \geq \frac{\log\left(\frac{10^{0.1\alpha_1} - 1}{10^{0.1\alpha_2} - 1}\right)}{2\log\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)} \quad (\text{II.19})$$

$\omega_0$  : Sa pulsation centrale, .

$\omega_1$  : Sa pulsation de coupure basse .

$\omega_2$  : Sa pulsation de coupure haute .

Nous obtenons une valeur réelle, alors nous prendrons l'entier supérieur ou égal à cette valeur comme ordre du filtre.

Les composants  $g_K$  d'un filtre passe-bas peuvent être facilement calculés en utilisant la formule de récurrence ci-dessous :

$$g_K = 2 \sin\left(\frac{(2K-1)\pi}{2n}\right) \quad K = 1 \text{ à } n \quad (\text{II.20})$$

$g_K$  : Coefficients du filtre prototype passe-bas.

### II.7.2. La méthode de Tchebychev :

La méthode de Tchebychev est une autre technique de conception de filtres qui permet d'obtenir une réponse en fréquence de pente plus abrupte en échange d'ondulations dans la bande passante du filtre [7].

La fonction d'atténuation est donnée par l'équation suivante :

$$\alpha_{dB} = 10 \log_{10} \left[ 1 + \xi^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right] \quad (\text{II.21})$$

Le coefficient de transmission est donné par :

$$|S_{12(j\omega)}|^2 = \left( 1 + \xi^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right)^{-1} \quad (\text{II.22})$$

$T_n(\omega)$  désigne la fonction de Tchebychev qui est défini comme suit :

$$T_n(\omega) = \begin{cases} \cos(n \cos^{-1}(\omega)), & |\omega| \leq 1 \\ \cosh(n \cosh^{-1}(\omega)), & |\omega| \geq 1 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

La relation entre la valeur du coefficient d'ondulation  $\xi$  et l'amplitude de l'ondulation dans la bande passante  $A_m$  en décibels, est donnée par :

$$\xi = \sqrt{10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1} \quad (\text{II.24})$$

La réponse en transmission de la fonction de Tchebychev pour différentes valeurs de  $n$  est représentée dans la figure II.19. Cette réponse présente une fluctuation d'amplitude à l'intérieur de la bande passante.

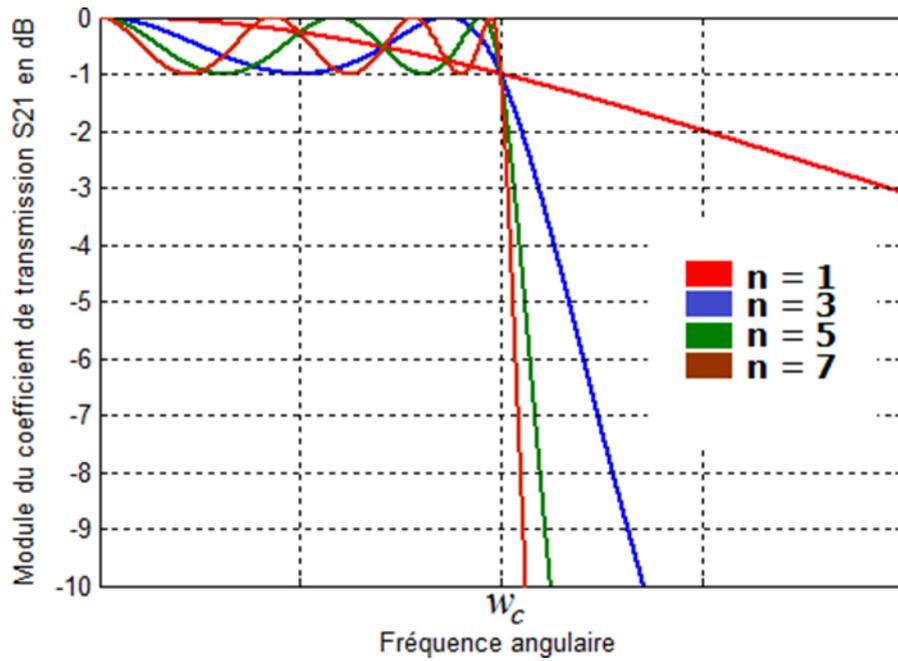


Figure II.19 : Réponse en transmission de la fonction de Tchebychev pour différentes valeurs de n [19].

Pour déterminer l'ordre n du filtre en fonction de certaines spécifications après avoir fixé l'ondulation  $A_m$ , il est nécessaire de trouver les valeurs de  $\xi$  et  $\alpha_1$ . Sachant que  $\omega_2 > \omega_1 = \omega_c$ , nous pouvons utiliser l'équation (II.25) :

$$\alpha_1 = 10 \log_{10} \left[ 1 + \xi^2 T_n^2 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right] \quad (\text{II.25})$$

$$\rightarrow T_n \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) = \frac{\sqrt{10^{0.1\alpha_1} - 1}}{\xi} = \cosh \left( n \cosh^{-1} \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right) \quad (\text{II.26})$$

L'ordre du filtre est l'entier n qui est le plus petit entier supérieur ou égal à la valeur obtenue par l'équation (II.27).

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1L_{AS}} - 1}{10^{0.1L_{AR}} - 1}}}{\cosh^{-1} \frac{\omega_2}{\omega_1}} \quad (\text{II.27})$$

$L_{AS}$  : différentes variations de l'amplitude de la bande passante.

$L_{AR}$  : l'ondulation de bande passante requise.

Après avoir déterminé l'ordre  $n$  du filtre en fonction des spécifications données, on peut appliquer les équations des paramètres du prototype passe-bas de Tchebychev pour trouver les paramètres  $g_K$  :

$$g_0 = 1 \quad (\text{II.28})$$

$$g_1 = \frac{2a_1}{\gamma} \quad (\text{II.29})$$

$$g_K = \frac{4a_{K-1} a_K}{b_{K-1} g_{K-1}}, \quad K = 2, 3, \dots, n \quad (\text{II.30})$$

$$\begin{cases} g_{N+1} = 1, & \text{pour } n \text{ impair} \\ g_{N+1} = \coth^2\left(\frac{\beta}{4}\right), & \text{pour } n \text{ pair} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Où

$$a_K = \sin\left[\frac{(2K-1)\pi}{2N}\right], \quad K = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.32})$$

$$b_K = \gamma^2 + \sin^2\left(\frac{K\pi}{N}\right), \quad K = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.33})$$

$$\beta = \ln\left[\coth\left(\frac{A_m}{17.372}\right)\right] \quad (\text{II.34})$$

$$\gamma = \sinh\left(\frac{\beta}{2N}\right) \quad (\text{II.35})$$

### II.8. La transformation des filtres à partir du prototype passe bas :

Le processus de conversion des filtres à partir du prototype passe-bas implique une étape de dénormalisation des éléments du prototype. Puisque le prototype est normalisé en termes d'impédance et de fréquence pour tous ses composants  $g_k$ , il est nécessaire de dénormaliser ces éléments.

Pour dénormaliser l'impédance, il suffit de multiplier les  $g_k$  représentant des selfs en série par la résistance de charge  $R_0$  et de diviser les  $g_k$  représentant des capacités en parallèle par  $R_0$ . Cette méthode de dénormalisation est présentée dans la figure II.20 et la figure II.21.

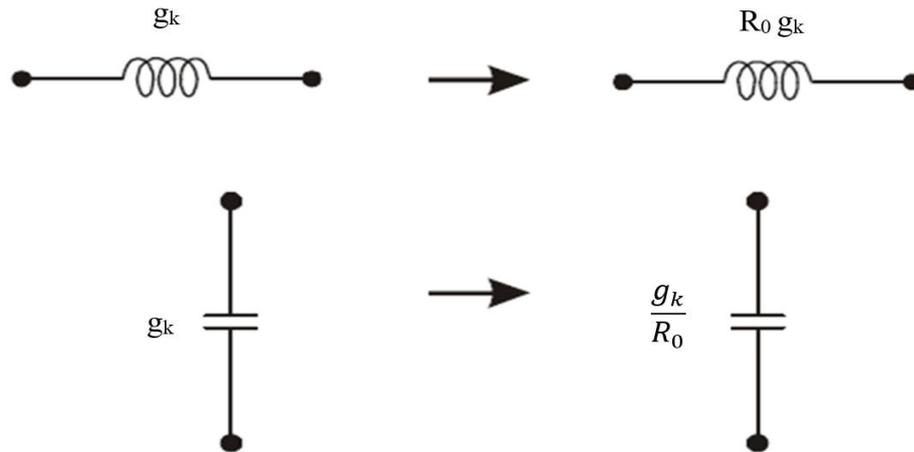


Figure II.20 : Transformation en impédance

Des transformations de fréquence sont nécessaires pour produire des filtres passe haut, passe bande ou coupe bande à partir d'un prototype passe bas.

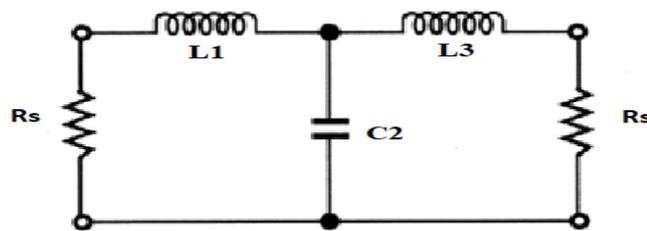


Figure II.21 : Filtre passe-bas pratique basé sur la transformation.

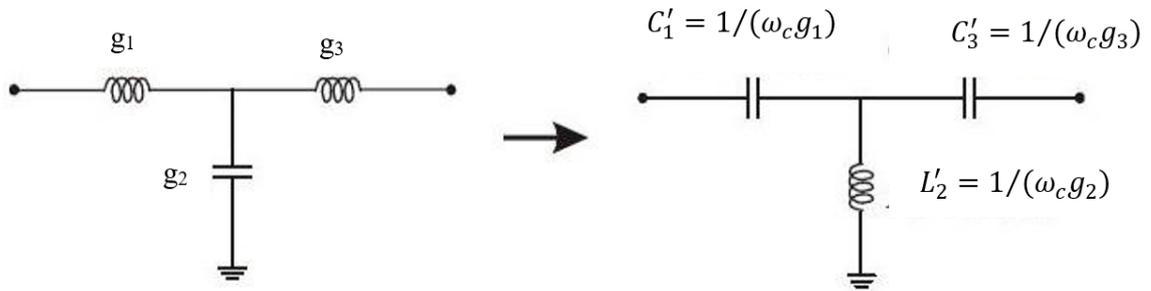
### II.8.1. Transformation passe bas-passe haut :

Le passage d'un filtre passe-bas (pulsation notée  $\omega$ ) à un filtre passe-haut (pulsation notée  $\omega'$ ) en termes de fréquence est défini par :  $\omega \rightarrow \omega_0/\omega$ . ( $\omega_0=1$ ).

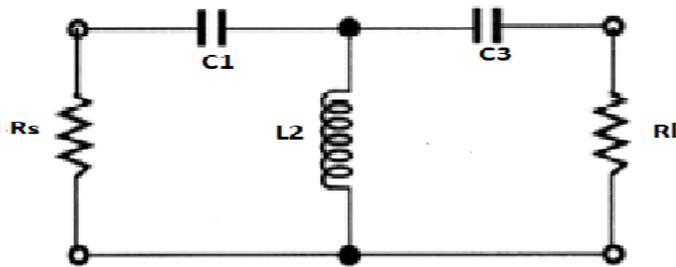
Dans ces circonstances, il est facile de déduire le prototype passe-haut à partir du prototype passe-bas en remplaçant chaque self par une capacité et vice versa. Si les capacités  $C_k$  et les inductances  $L_k$  du prototype passe-bas sont données, alors les valeurs normalisées en fréquence des capacités  $C'_k$  et des inductances  $L'_k$  du filtre passe-haut sont calculées en utilisant la formule suivante :

$$C'_k = \frac{1}{\omega_c L_k} = \frac{1}{\omega_c g_k} \quad (\text{II.36})$$

$$L'_k = \frac{1}{\omega_c C_k} = \frac{1}{\omega_c g_k} \quad (\text{II.37})$$



**Figure II.22 : Transformation passe bas-passe haut**



**Figure II.23 : filtre passe-haut pratique basé sur la transformation**

**II.8.2. Transformation passe bas-passe bande :**

Le filtre passe bande est caractérisé par trois paramètres :

- La pulsation centrale  $\omega_0$  de la bande passante,
- La pulsation  $\omega_1$  de coupure basse,
- La pulsation  $\omega_2$  de coupure haute.
- $\Delta$  la largeur relative de la bande passante.

Avec :

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad \text{(II.38)}$$

$$\Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \quad \text{II.39}$$

Le filtre passe-bande (pulsation notée  $\omega'$ ) dérive du filtre passe-bas (pulsation notée  $\omega$ ) en effectuant une transformation de fréquence selon la formule :  $\omega \rightarrow \frac{1}{\Delta} \left( \frac{\omega_0}{\omega'} - \frac{\omega'}{\omega_0} \right)$

Pour obtenir un filtre passe-bande à partir d'un prototype passe-bas, il est nécessaire de suivre deux étapes. Tout d'abord, les inductances en série doivent être remplacées par un circuit résonant LC en série, où les valeurs des éléments sont définies comme suit :

$$C'_K = \frac{\Delta}{\omega_0 + L_k} = \frac{\Delta}{\omega_0 + g_k} \quad (\text{II.40})$$

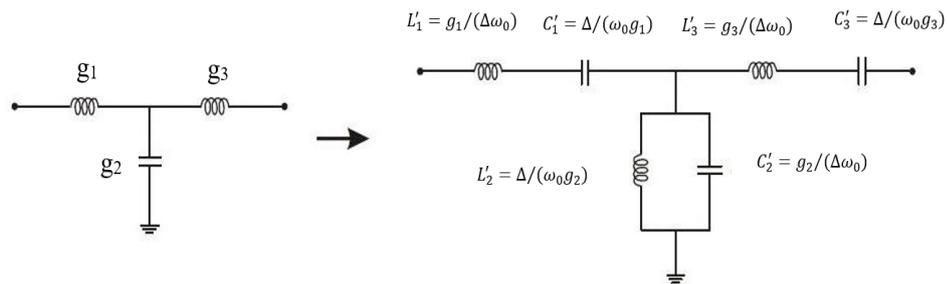
$$L'_k = \frac{\Delta}{\Delta\omega_0} = \frac{g}{\Delta\omega_0} \quad (\text{II.41})$$

La prochaine phase implique la substitution des capacités en parallèle avec un circuit LC en parallèle résonant, avec les valeurs ci-dessous :

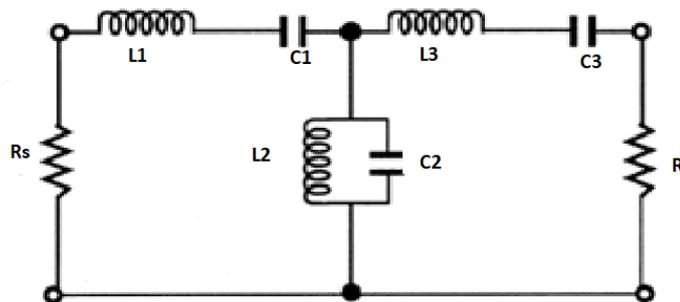
$$C'_k = \frac{C_k}{\Delta\omega_0} = \frac{g_k}{\Delta\omega_0} \quad (\text{II.42})$$

$$L'_k = \frac{\Delta}{\omega_0 C_k} = \frac{\Delta}{\omega_0 g_k} \quad (\text{II.43})$$

La figure II.24 et la figure II.25 illustrent la conversion d'un filtre passe-bas en un filtre passe-bande d'ordre 3, à travers une transformation de fréquence.



**Figure II.24 : Transformation en fréquence passe bas-passe bande.**



**Figure II.25 : filtre passe-bande pratique basé sur la transformation.**

**II.8.3. Transformation passe bas-coupe bande :**

La méthode employée pour effectuer la transformation de fréquence dans le cadre du filtre passe-bande consiste en :

$$\omega \rightarrow \Delta \left( \frac{\omega'}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega'} \right) \quad (\text{II.44})$$

Pour obtenir un filtre coupe-bande, la méthode inverse du filtre passe-bande peut être utilisée. Cela implique le remplacement des circuits LC en série utilisés dans le filtre passe-bande par un circuit LC parallèle défini comme le montre les figures II.26 et II.27.

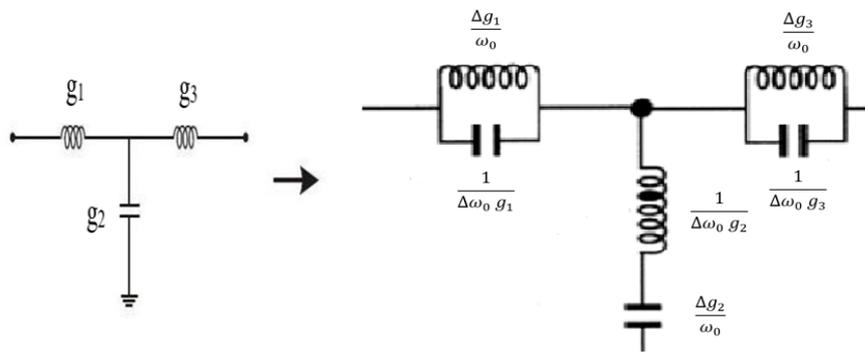
$$C'_k = \frac{1}{\Delta\omega_0 L_k} = \frac{1}{\Delta\omega_0 g_k} \quad (\text{II.45})$$

$$L'_k = \frac{\Delta k}{\omega_0} = \frac{\Delta g}{\omega_0} \quad (\text{II.46})$$

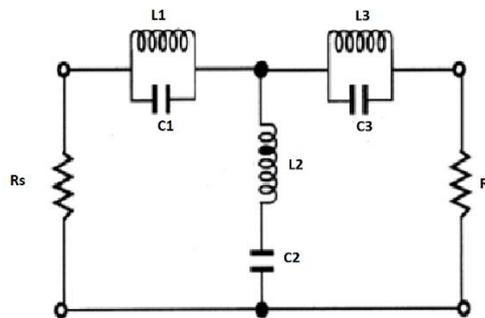
Le circuit LC série défini peut être utilisé en remplacement des capacités :

$$C'_k = \frac{\Delta C_k}{\omega_0} = \frac{\Delta g_k}{\omega_0} \quad (\text{II.47})$$

$$L'_k = \frac{1}{\Delta\omega_0 C_k} = \frac{1}{\Delta\omega_0 g_k} \quad (\text{II.48})$$



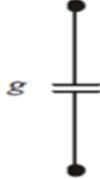
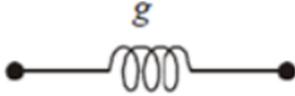
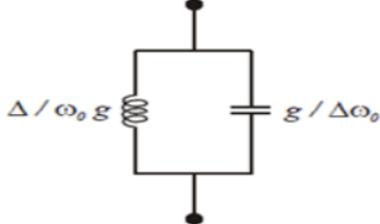
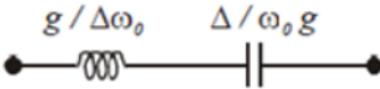
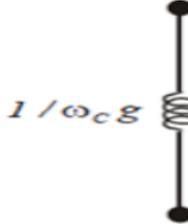
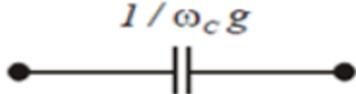
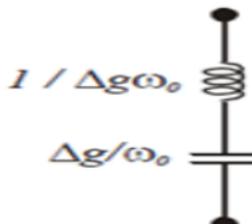
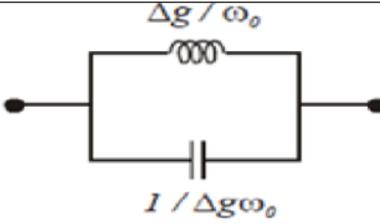
**Figure II.26 : Transformation en fréquence passe bas-coupe bande**



**Figure II.27 : Filtre coupe-bande pratique basé sur la transformation.**

Le tableau II-1 résume l'ensemble des opérations de conversion en fréquence décrites.

**Tableau II-1 : Transformation en fréquence à partir du prototype passe-bas.**

Passe bas		
Passe bande		
Passe haut		
Coupe bande		

### II.9. Besoins en filtrage pour les systèmes 5G :

Les systèmes de communication 5G nécessitent des filtres micro-ondes pour répondre à différents besoins de filtrage, notamment pour assurer la qualité du signal, la pureté spectrale, la stabilité des oscillateurs, la suppression du bruit, la réjection des interférences, la séparation des signaux et la protection des amplificateurs. Les filtres micro-ondes sont essentiels pour la mise en œuvre de ces fonctions dans les systèmes 5G. Ils permettent également de répondre aux exigences de large bande passante et de haute sélectivité requises pour les systèmes de communication 5G [10].

## **II.10. Applications des filtres micro-ondes dans les systèmes 5G :**

Les filtres micro-ondes ont de nombreuses applications dans les systèmes de communication 5G, notamment :

### **II.10.1. Filtrage des signaux radiofréquences (RF) :**

Les filtres micro-ondes sont utilisés pour filtrer les signaux RF dans les systèmes 5G. Ces filtres permettent de réduire le bruit et d'éviter l'interférence avec d'autres signaux RF. Les filtres micro-ondes utilisés pour le filtrage des signaux RF dans les systèmes 5G doivent avoir une large bande passante, une perte d'insertion faible et une pente de réponse raide [11].

### **II.10.2. Filtrage des signaux fréquence intermédiaire (IF) :**

Les filtres micro-ondes sont également utilisés pour filtrer les signaux IF dans les systèmes 5G. Ces filtres permettent de séparer les signaux IF des signaux RF et de réduire le bruit et l'interférence dans les signaux IF.

### **II.10.3. Filtrage des signaux de synchronisation :**

Les filtres micro-ondes sont également utilisés pour filtrer les signaux de synchronisation dans les systèmes 5G. Ces filtres permettent de synchroniser les différents composants du système de communication 5G. Les filtres micro-ondes utilisés pour le filtrage des signaux de synchronisation dans les systèmes 5G doivent avoir une réponse en phase régulière et une perte d'insertion faible [11].

## **II.11. Conclusion :**

Les filtres micro-ondes sont indispensables dans les systèmes de communication modernes tel que les systèmes 5G en raison de leur capacité à fournir une réponse en fréquence précise et à rejeter les signaux indésirables.

Ce chapitre a présenté en détail les filtres micro-ondes, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques de réponse en fréquence ainsi que les différents types de filtres, notamment les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande. Nous avons également présenté les

différentes techniques de conception de filtres micro-ondes, notamment la méthode de Butterworth et la méthode de Tchebychev ainsi que les méthodes de transformation des filtres à partir du prototype passe bas.

Enfin, nous avons présenté les applications des filtres micro-ondes dans les systèmes de communication 5G, notamment leur utilisation pour filtrer les signaux RF, les signaux IF et les signaux de synchronisation.

**II.12. Références :**

- [1] R. Ludwig and P. Bretchko, RF Circuit Design: Theory and Applications, Prentice Hall PTR, 2000.
- [2] Pozar, D. M. (2011). Microwave Engineering (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [3] Gupta, K. C., Garg, R., Bahl, I. J., & Bhartia, P. (2010). Microstrip Lines and Slotlines (2nd ed.). Artech House.
- [4] H. Li, K. Wu, and Y. Xie, "Planar microwave and millimeter-wave filters based on substrate integrated waveguide structure," Progress in Electromagnetics Research, Vol. 70, 2017, pp. 23-36.
- [5] D. W. Carr, Foundations of Microwave Engineering, 2nd ed. McGraw-Hill Education, 2006.
- [6] S. AMARI, J. BORNEMANN, W. MENZEL and F. ALESSANDRI "Diplexer design using pre-synthesized waveguide filters with strongly dispersive inverters" IEEE MTT-S Digest, pp. 1627-11630, 2001.
- [7] Z.C. HAO, W. HONG, X.P. CHEN, J.X. CHEN and K. WU "A single-layer folded substrate integrated waveguide (SIW) filter" APMC Proceedings, 2005.
- [8] Williams, C. (2007). Microwave Filter Design. CRC Press.
- [9] Knapp, J., Zeratsky, J., & Kowitz, B. (2016). Sprint: How to Solve Big Problems and Test New Ideas in Just Five Days. Simon and Schuster.
- [10] Y. Liu, H. Zhang, and Y. Sun, "Microwave Filters for 5G Communication Systems: A Review," IEEE Access, vol. 5, pp. 15840-15850, 2017.
- [11] L. Wu, X. Liu, X. Liu, and W. Zhang, "Design of Microwave Filters for 5G Wireless Communication Systems," in 2018 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2018, pp. 1-3.
- [12] L. Weiping, Z. Tang, X. Cao. (2017). Design of a SIW Bandpass Filter Using Defected Ground Structure with CSRRs. Active and Passive Electronic Components.
- [16] D. Mehdi "Conception et optimisation des composants passifs microondes en technologie SIW Application aux filtres passe-bandes," Ph.D dissertation, université de Tlemcen, 2018.
- [17] J. Garreau "Étude de filtres hyperfréquence SIW hybride-planaire SIW en technologie LTCC," Ph.D dissertation, Université de Bretagne occidentale - Brest, 2012.
- [18] Z.C. Hao, W. Hong, X.P. Chen, J.X. Chen and K. Wu. (2005). A single-layer folded substrate integrated waveguide (SIW) filter. APMC Proceedings.
- [19] O. Glubokov, "Development Of Waveguide Filter Structures For Wireless And Satellite Communications," Ph.d dissertation, University of Westminster. 2011.

# **Chapitre III : Simulation et conception des filtres micro-ondes**

### **III.1. Introduction :**

La technologie 5G fonctionne dans des fréquences élevées, permettant un transfert de débit de données plus rapide et une meilleure capacité de réseau. Les filtres micro-ondes jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des réseaux 5G en atténuant les interférences et en améliorant la qualité du signal.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'étude, la simulation et la conception de quelques structures de filtres à base de lignes micro-ruban, en utilisant le logiciel CST qui permet la simulation électromagnétique et la conception des composants micro-ondes avant leur fabrication.

Nous commencerons par la conception d'un filtre passe-bas de type Butterworth. Nous présentons les résultats de simulation de ce filtre pour un ordre égal 3, 5 et 7. Ensuite, nous présentons la conception d'un filtre passe-bande de type Tchebychev de premier et troisième ordre. Nous terminons par la présentation d'un filtre coupe-bande de type Tchebychev.

### **III.2. Procédure de conception :**

Dans notre travail on s'est intéressé à la conception de filtres micro-ondes pour les applications 5G. Ces filtres doivent avoir une taille compacte, une perte d'insertion minimale et une forte capacité de rejet, etc. [1].

Pour l'étude et la conception de nos filtres micro-ondes, nous avons utilisé le logiciel CST et nous avons suivi les étapes suivantes :

#### **III.2.1. Création du modèle :**

Nous commençons par créer un nouveau modèle sur CST en définissant les dimensions et les matériaux des différents composants tels que le substrat et les couches métalliques.

#### **III.2.2. Définition des conditions aux limites :**

Ensuite nous fixons les conditions aux limites appropriées pour notre modèle.

#### **III.2.3. Simulation :**

Enfin, nous pouvons lancer la simulation et analyser les résultats tels que la réponse en fréquence, la perte d'insertion, la réjection de bande et la sélectivité.

### III.2.4. Optimisation :

Si les résultats ne répondent pas aux spécifications de conception, nous pouvons optimiser les paramètres de conception tels que les dimensions des composants et l'emplacement des couches.

### III.2.5. Validation :

Finalement pour valider les résultats de simulation il faut les comparer avec les résultats de mesure.

### III.3. Conception d'un filtre passe-bas :

Les spécifications requises pour la conception de ce filtre sont les suivantes :

- Fréquence de coupure = 1.3 GHz
- Impédance source / charge  $Z_0 = 50 \text{ ohms}$
- Fréquence normalisée  $\Omega_c = 1$
- Impédance  $Z_L = 17\Omega$
- Impédance  $Z_h = 93\Omega$
- Perte d'insertion  $L_{Ar}=3.01\text{dB}$ .

La figure III.1 montre le filtre passe-bas micro-onde d'impédance en escalier de type échelle LC et son agencement général.

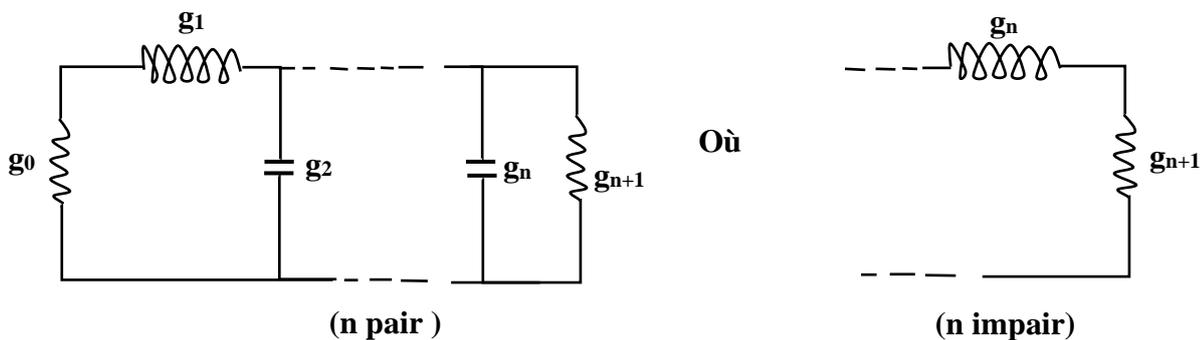


Figure III.1 : Agencement en réseau échelonné pour un filtre prototype passe-bas.

Les valeurs des éléments peuvent être calculées en utilisant les équations suivantes :

$$\begin{cases} g_0 = 1.0 \\ g_i = 2 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \\ g_{n+1} = 1.0 \end{cases} \quad i = 1 \dots n \quad (\text{III.1})$$

Les éléments normalisés sont ensuite convertis en composants L-C, pour la fréquence de coupure  $f_c$  donnée, en utilisant les équations suivantes [2][3] :

$$L_1 = L_3 = \left(\frac{Z_0}{g_0}\right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c}\right) g_1 \quad (\text{III.2})$$

$$C_2 = \left(\frac{g_0}{Z_0}\right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c}\right) g_2 \quad (\text{III.3})$$

### III.3.1. Conception d'un filtre passe-bas de type Butterworth sur substrat FR-4 :

La première structure de filtrage simulée et conçue est un filtre passe bas de type Butterworth [1]. Le substrat utilisé pour la conception de ce filtre micro-onde est le FR-4 de permittivité relative  $\epsilon_r = 4.4$ , de tangente de perte 0.002 et de hauteur  $h = 1.6\text{mm}$ .

Les tableaux III.1, III.2 et III.3 montrent les paramètres de conception de ce filtre pour un ordre égal 3, 5 et 7 respectivement.

**Tableau III-1 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 3.**

i	Z	$g_i$	$\beta l$	L(mm)	W(mm)
1	$Z_h = 93\Omega$	1	$\beta l_1 = \frac{g_1}{Z_h} \times z_0 = 31.81$	11.67	0.86
2	$Z_l = 17\Omega$	2	$\beta l_2 = \frac{g_2}{Z_0} \times z_l = 27.13$	8.87	16
3	$Z_h = 93\Omega$	1	$\beta l_3 = \beta l_1 = 31.81$	11.67	0.86

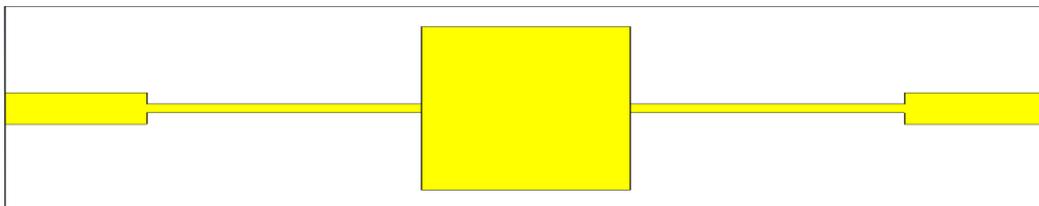
**Tableau III-2 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 5.**

i	Z	$g_i$	$\beta l$	L(mm)	W(mm)
1	$Z_h = 101\Omega$	0.6180	$\beta l_1 = 18.73$	6.982	0.7
2	$Z_L = 21\Omega$	1.6180	$\beta l_2 = 30.35$	10.21	10.539
3	$Z_h = 101\Omega$	2	$\beta l_3 = 60.65$	22.60	0.7
4	$Z_L = 21\Omega$	1.6180	$\beta l_4 = \beta l_1 = 30.35$	10.21	10.539
5	$Z_h = 101\Omega$	0.6180	$\beta l_5 = \beta l_1 = 18.73$	6.982	0.7

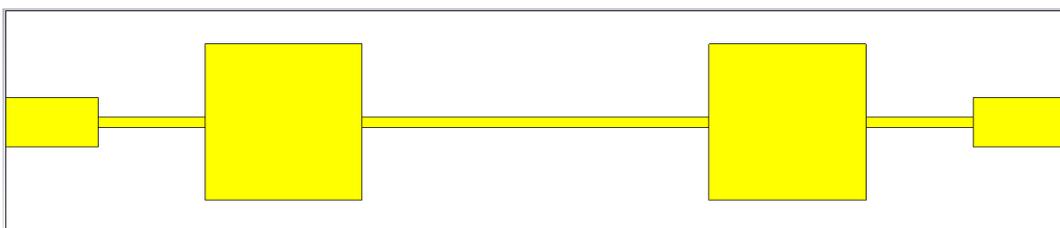
**Tableau III-3 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 7.**

i	Z	$g_i$	$\beta l$	L(mm)	W(mm)
1	$Z_h = 94\Omega$	0.4450	$\beta l_1 = 13.70$	5.02	0.84
2	$Z_L = 22\Omega$	1.2470	$\beta l_2 = 24.29$	7.99	9.9
3	$Z_h = 94\Omega$	1.8019	$\beta l_3 = 55.5$	20.36	0.84
4	$Z_L = 22\Omega$	2	$\beta l_4 = 38.96$	12.82	9.9
5	$Z_h = 94\Omega$	1.8019	$\beta l_5 = \beta l_3 = 55.5$	20.36	0.84
6	$Z_L = 22\Omega$	1.2470	$\beta l_6 = \beta l_2 = 24.29$	7.99	9.9
7	$Z_h = 94\Omega$	0.4450	$\beta l_7 = \beta l_1 = 13.70$	5.02	0.84

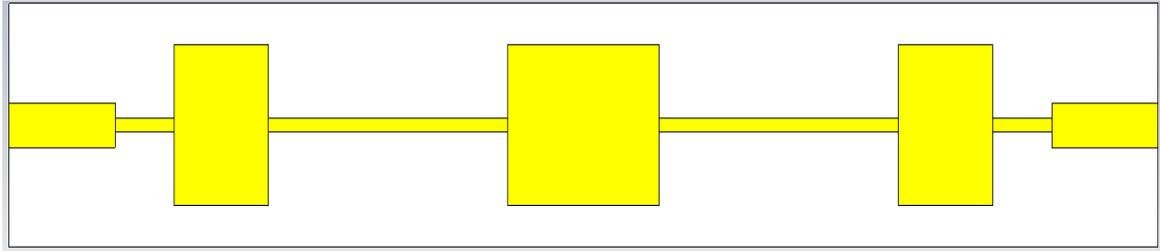
Les figures III.2, III.3 et III.4 illustrent la géométrie des filtres passe-bas simulés avec le logiciel CST, d'ordre 3, 5 et 7 respectivement. En augmentant l'ordre du filtre, sa taille augmente et donc il va prendre beaucoup d'espace.



**Figure III.2 : Filtre passe-bas d'ordre 3.**

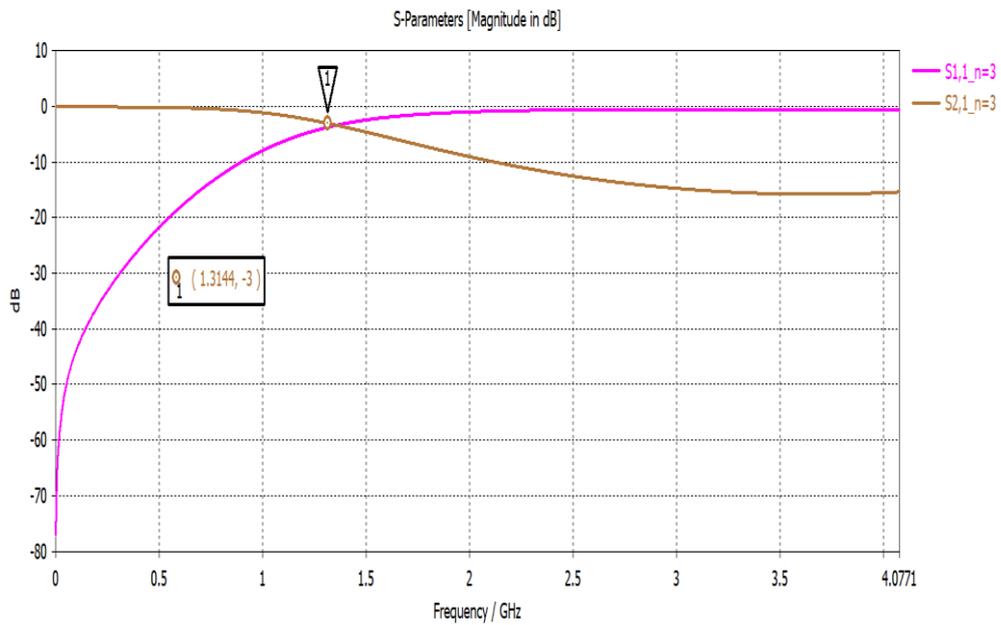


**Figure III.3 : Filtre passe-bas d'ordre 5.**



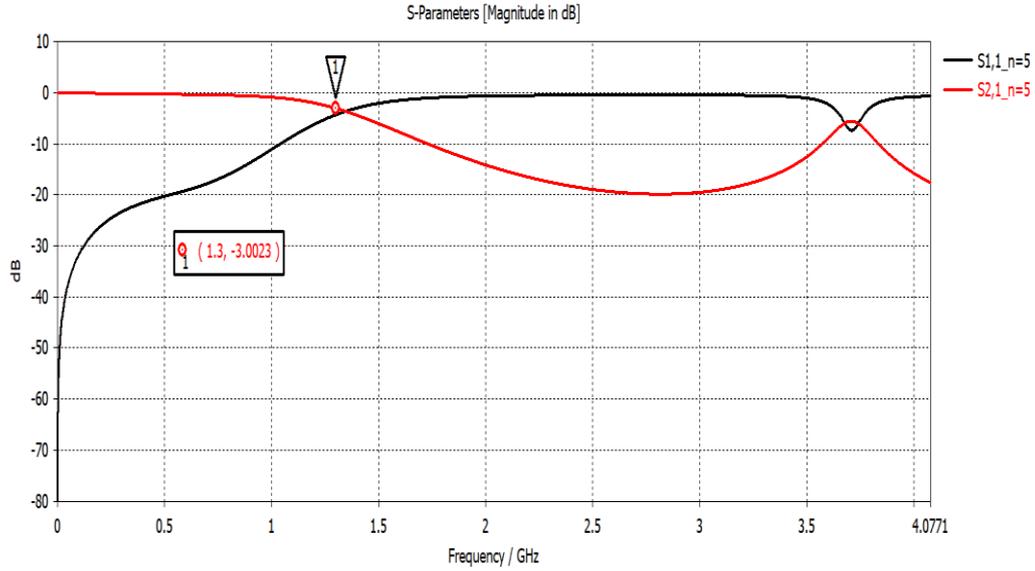
**Figure III.4 : Filtre passe-bas d'ordre 7.**

Les figures III.5, III.6 et III.7 représentent les résultats de simulation des filtres passe-bas de type Butterworth d'ordre 3, 5 et 7 respectivement.



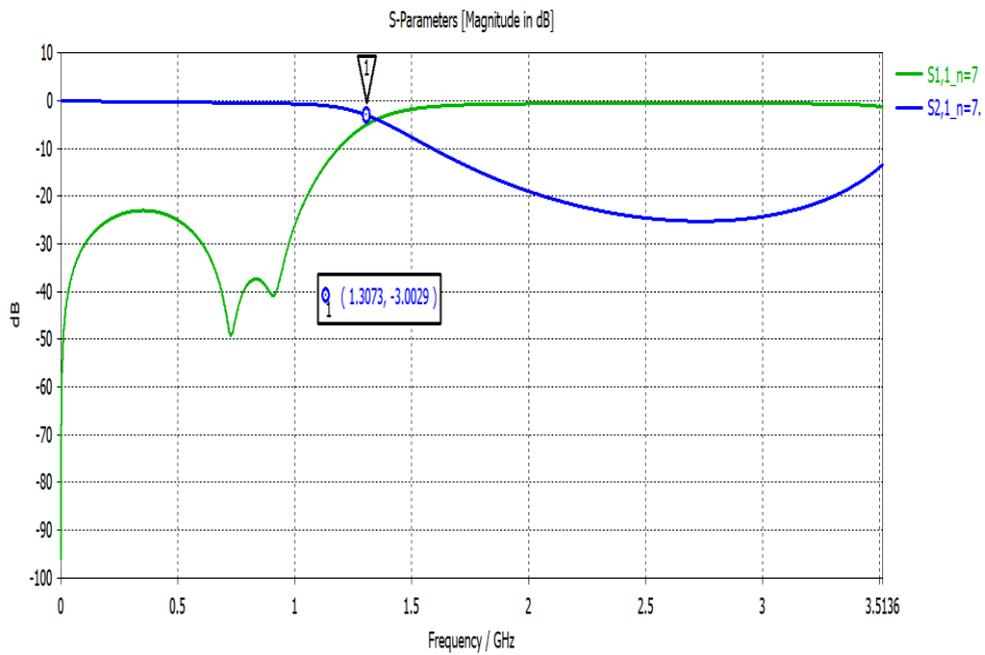
**Figure III.5 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 3.**

Nous observons sur la figure III.5 que la fréquence de coupure est de 1.3 GHz donc la bande passante s'étend de 0 à 1.314 GHz. Le filtre passe-bas d'ordre 3 conçu respecte bien le cahier de charge.



**Figure III.6 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 5.**

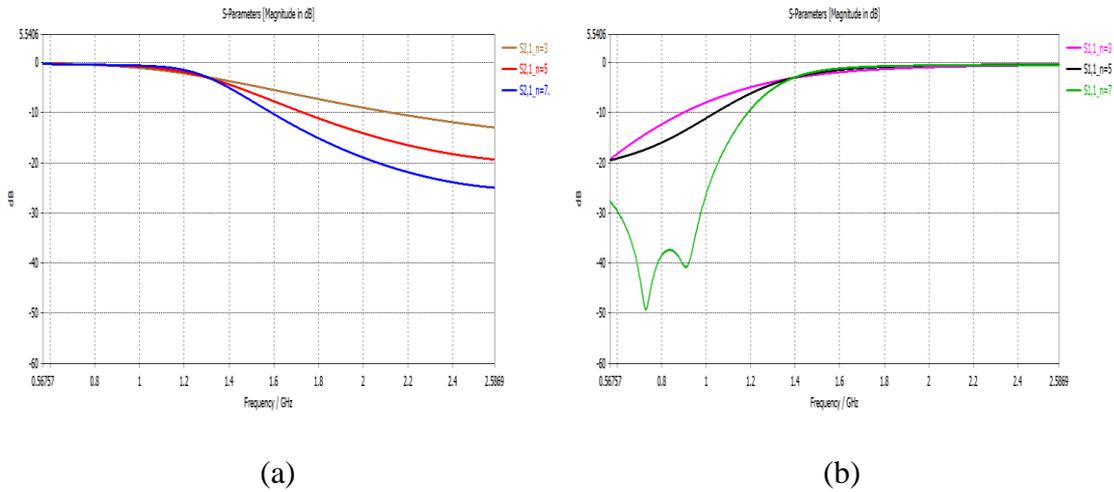
La fréquence de coupure est de 1.3 GHz, donc la bande passante s'étend de 0 à 1.3 GHz ce qui montre que le filtre passe-bas d'ordre 5 conçu respecte bien le cahier de charge.



**Figure III.7 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 7.**

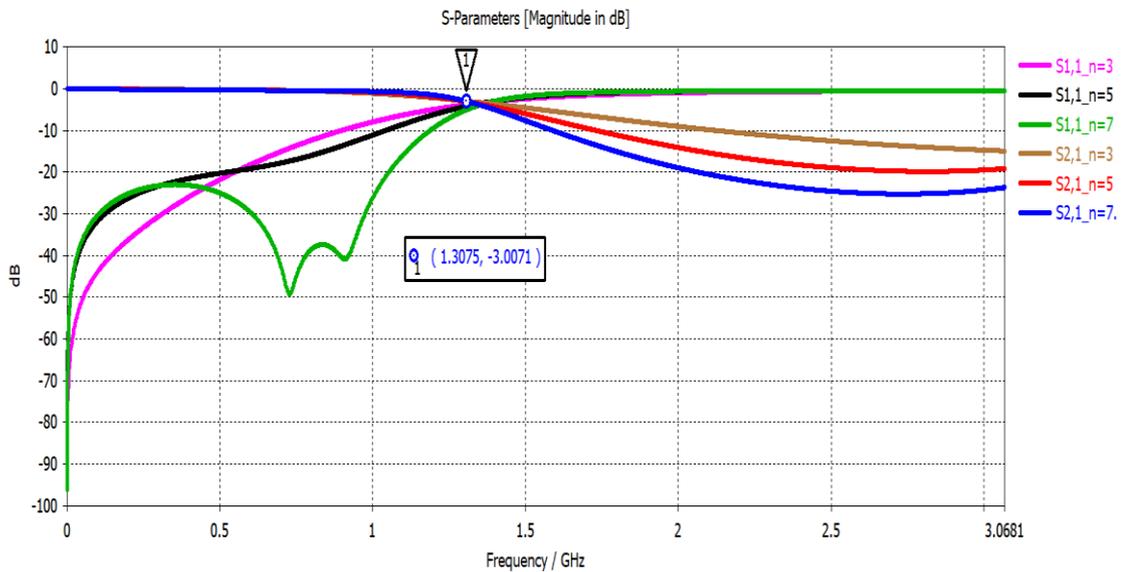
Le filtre passe-bas d'ordre 7 conçu répond aux exigences spécifiées, nous observons que la bande passante s'étend de 0 à 1.3073 GHz et que la fréquence de coupure est de 1.3 GHz.

La figure III.8 (a) représente le paramètre  $S_{21}$  des filtres passe-bas conçus d'ordre 3, 5 et 7 respectivement alors que la figure III.8 (b) représente le paramètre  $S_{11}$ .



**Figure III.8 : (a) Représentation du paramètre  $S_{21}$  du filtre pour un ordre de 3, 5 et 7 .  
 (b) Représentation du paramètre  $S_{11}$  du filtre pour un ordre de 3, 5 et 7 .**

Sur la figure III.9 nous représentons les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  des filtres passe-bas de type Butterworth d'ordre 3, 5 et 7.



**Figure III.9 : Représentation des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du filtre pour un ordre de 3, 5 et 7 .**

Les figures III.8 et III.9 présentent les comparaisons des réponses fréquentielles du filtre passe-bas conçu pour différents ordres (3, 5 et 7). L'analyse de ces figures révèle des observations intéressantes sur la performance du filtre. Tout d'abord, pour l'ordre 3, on remarque une zone de transition élevée. En augmentant l'ordre à 5, nous constatons une diminution significative de la zone de transition. Cela suggère que le filtre atteint une meilleure sélectivité et une meilleure capacité à atténuer les fréquences indésirables. Finalement, pour un ordre de 7, nous observons une nette diminution de la zone de transition par rapport aux ordres précédents. Cela confirme l'amélioration continue des performances du filtre avec l'augmentation de l'ordre. Ces résultats soulignent l'importance de choisir un ordre approprié pour obtenir les caractéristiques de filtrage souhaitées dans une application donnée.

### **III.3.2. Conception d'un filtre passe-bas de type Butterworth sur substrat Preperm**

#### **L900hf :**

Les résultats du premier filtre conçu ont montré que la taille du filtre augmente avec l'ordre. Pour diminuer la taille du filtre, nous changeons le type du substrat en utilisant le Preperm L900hf de permittivité relative  $\epsilon_r=9$  comme matériel du substrat. Le filtre passe bas doit toujours respecter les mêmes conditions énoncées dans le cahier de charge initial.

Les paramètres de conception du filtre pour un ordre égal 3, 5 et 7 respectivement sont données dans les tableaux III.4, III.5 et III.6.

**Tableau III-4 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 3 sur substrat Preperm L900hf :**

i	Z	$g_i$	$\beta l$	L(mm)	W(mm)
1	$Z_h = 93\Omega$	1	$\beta l_1 = \frac{g_1}{Z_h} \times z_0 = 31.81$	8.67	0.33
2	$Z_l = 17\Omega$	2	$\beta l_2 = \frac{g_2}{Z_0} \times z_l = 27.13$	6.45	8.86
3	$Z_h = 93\Omega$	1	$\beta l_3 = \beta l_1 = 31.81$	8.67	0.33

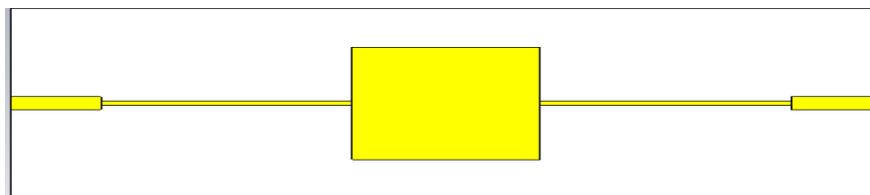
**Tableau III-5 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 5 sur substrat Preperm L900hf :**

i	Z	$g_i$	$\beta l$	L(mm)	W(mm)
1	$Z_h = 101\Omega$	0.6180	$\beta l_1 = 18.73$	5.145	0.239
2	$Z_L = 21\Omega$	1.6180	$\beta l_2 = 30.35$	7.337	6.68
3	$Z_h = 101\Omega$	2	$\beta l_3 = 60.65$	16.66	0.239
4	$Z_L = 21\Omega$	1.6180	$\beta l_4 = \beta l_1 = 30.35$	7.337	6.68
5	$Z_h = 101\Omega$	0.6180	$\beta l_5 = \beta l_1 = 18.73$	5.145	0.239

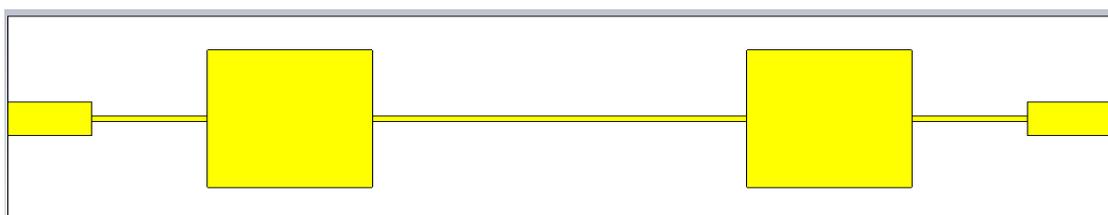
**Tableau III-6 : Paramètres de conception du filtre passe-bas d'ordre 7 sur substrat Preperm L900hf :**

i	Z	$g_i$	$\beta l$	L(mm)	W(mm)
1	$Z_h = 94\Omega$	0.4450	$\beta l_1 = 13.70$	5.02	0.84
2	$Z_L = 22\Omega$	1.2470	$\beta l_2 = 24.29$	7.99	9.9
3	$Z_h = 94\Omega$	1.8019	$\beta l_3 = 55.5$	20.36	0.84
4	$Z_L = 22\Omega$	2	$\beta l_4 = 38.96$	12.82	9.9
5	$Z_h = 94\Omega$	1.8019	$\beta l_5 = \beta l_3 = 55.5$	20.36	0.84
6	$Z_L = 22\Omega$	1.2470	$\beta l_6 = \beta l_2 = 24.29$	7.99	9.9
7	$Z_h = 94\Omega$	0.4450	$\beta l_7 = \beta l_1 = 13.70$	5.20	0.84

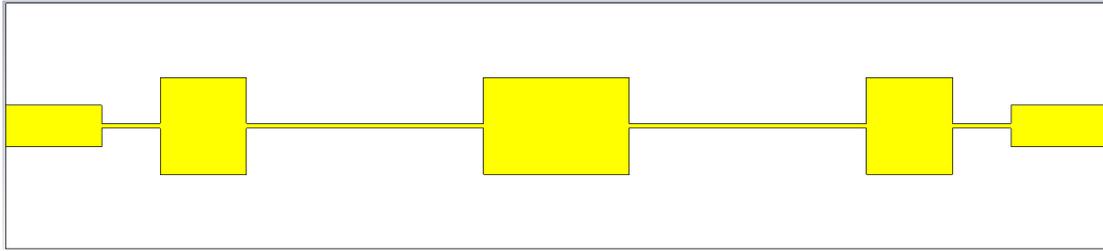
Les géométries des filtres passe-bas sur substrat de type Preperm L900hf d'ordre 3, 5 et 7 sont montrées respectivement sur les figures III.10, III.11 et III.12.



**Figure III.10 : Filtre passe-bas d'ordre 3 sur substrat Preperm L900hf.**

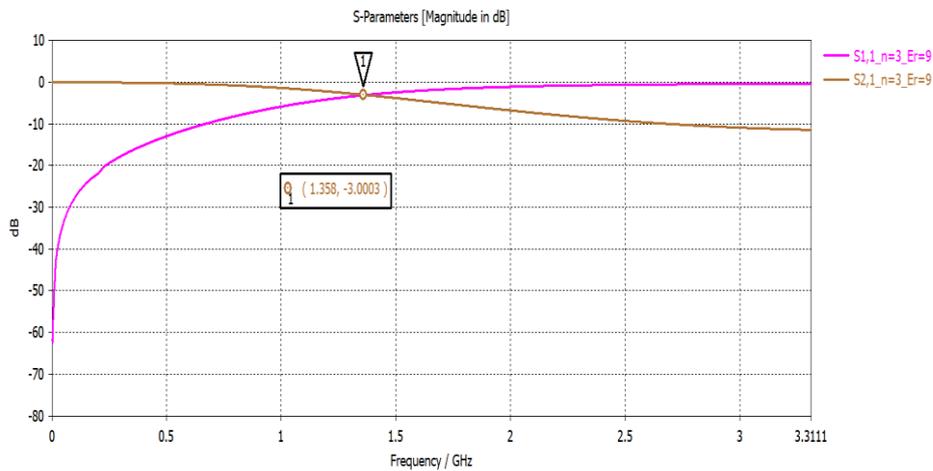


**Figure III.11 : Filtre passe-bas d'ordre 5 sur substrat Preperm L900hf.**



**Figure III.12 : Filtre passe-bas d'ordre 7 sur substrat Preperm L900hf.**

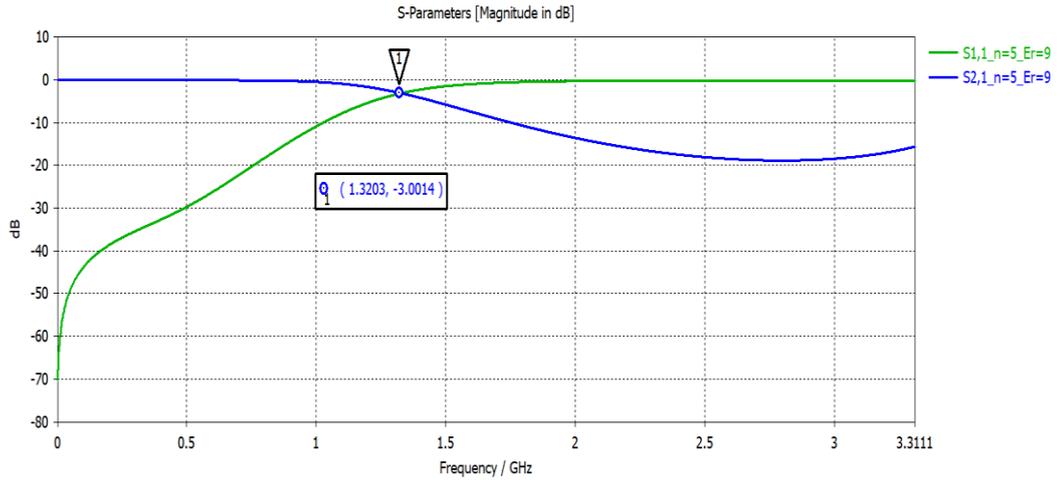
Les figures III.13, III.14 et III.15 représentent les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du filtre passe-bas conçu d'ordre 3, 5 et 7 respectivement sur substrat Preperm L900hf.



**Figure III.13 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 3.**

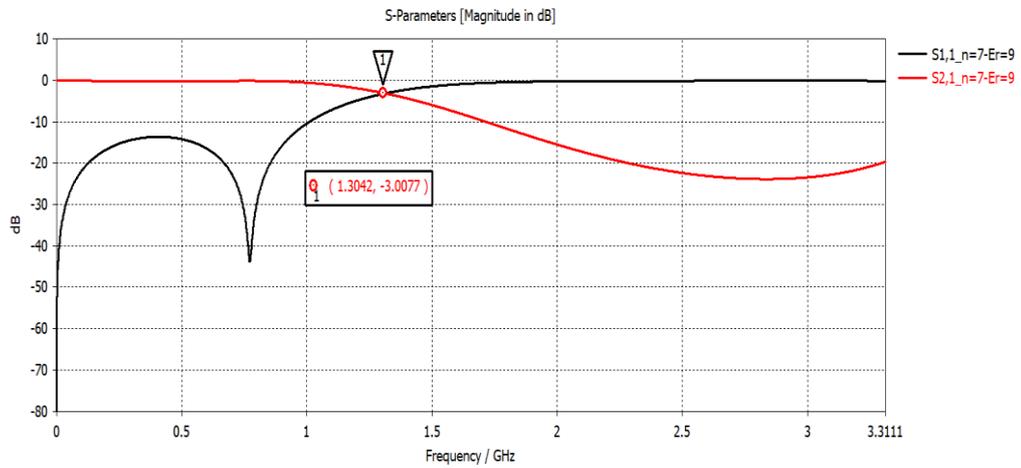
La figure III.13, montre que la fréquence de coupure est de 1.358 GHz, avec une bande passante qui s'étend de 0 à 1.358 GHz. Le filtre passe-bas d'ordre 3 conçu respecte bien les spécifications du cahier de charge.

En augmentant l'ordre du filtre à 5, notre filtre conçu respecte bien le cahier de charge comme le montre la figure III.14. La fréquence de coupure est de 1.3203 GHz, ce qui donne une bande passante de 0 à 1.3203 GHz.



**Figure III.14 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 5.**

En augmentant encore l'ordre à 7, nous remarquons sur la figure III.15 que le filtre passe-bas conçu respecte bien le cahier de charge et que la fréquence de coupure est de 1.3042 GHz ce qui donne une bande passante de 0 à 1.3042 GHz.



**Figure III.15 : Réponses fréquentielles du filtre passe bas d'ordre 7.**

Après avoir changé le matériau du substrat en utilisant le Preperm L900HF ( $\epsilon_r = 9$ ), à la place du FR-4 ( $\epsilon_r = 4.4$ ) nous avons obtenu une réduction de 32 % de la longueur du filtre pour un ordre de 3, tandis que pour les filtres de cinquième et septième ordre, la longueur a diminué de 28,9 %, et les réponses fréquentielles obtenues respectent bien le cahier de charge.

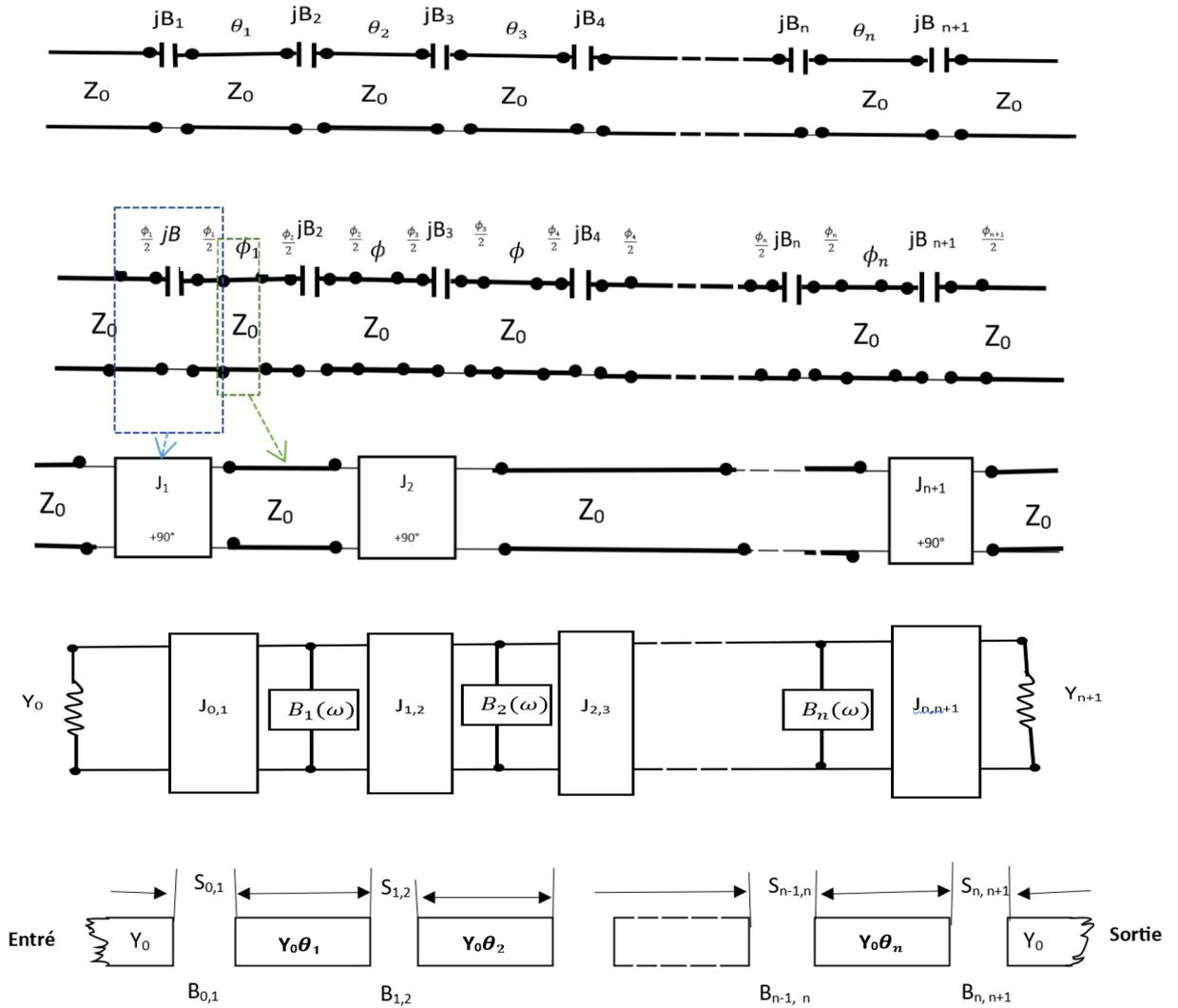
Le tableau (III.7) présente une comparaison entre la longueur totale des filtres à base de FR-4 ( $\epsilon_r = 4.4$ ) et de Preperm L900HF ( $\epsilon_r=9$ ).

**Tableau III-7 : Comparaison entre la longueur totale des filtres à base de FR-4 ( $\epsilon_r=4.4$ ) et du Preperm L900HF ( $\epsilon_r=9$ ) :**

Matériau du substrat	Ordre du filtre	La longueur du filtre (mm)
FR-4 ( $\epsilon_r = 4.4$ )	3	44.21
	5	68.984
	7	97.56
Preperm L900HF ( $\epsilon_r=9$ ).	3	30.027
	5	49.044
	7	69.63

#### III.4. Conception d'un filtre passe-bande :

La configuration générale d'un filtre passe-bande avec couplage d'extrémités est illustrée dans la figure III.16, où chaque résonateur micro-onde à extrémité ouverte a une longueur d'environ une demi-longueur d'onde guidée à la fréquence médiane  $f_0$  du filtre passe-bande. Le couplage d'un résonateur à l'autre se fait à travers l'espace entre les deux extrémités ouvertes adjacentes et est donc capacitif [4].



**Figure III.16 : Configuration générale d'un filtre passe-bande couplé aux extrémités.**

$Z_0$  : Impédance source / charge.

$Y_0$  : Admittance ( $1/Z_0$ ).

$\theta_j$  : Les longueurs électriques des résonateurs demi-longueur d'onde.

$B_{j,j+1}$  : Les susceptances associées aux J-inverseurs.

$S_{j,j+1}$  : Les dimensions des espaces micro-ondes qui produisent les capacités désirées.

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{2B}{Y_0}$$

Pour calculer les dimensions de ce filtre nous utilisons les équations suivantes [5] :

J-inverseurs :

$$\frac{j_{0,1}}{y_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{FBW}{g_0 g_1}} \quad (III. 4)$$

$$\frac{j_{j,j+1}}{y_0} = \frac{\pi}{2} \frac{FBW}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad j = 1 \dots n - 1 \quad (III. 5)$$

$$\frac{j_{n,n+1}}{y_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{FBW}{g_n g_{n+1}}} \quad (III. 6)$$

Les susceptances associées aux J-inverseurs :

$$\frac{B_{j,j+1}}{y_0} = \frac{\frac{j_{j,j+1}}{y_0}}{1 - \left(\frac{j_{j,j+1}}{y_0}\right)^2} \quad (III. 7)$$

Les longueurs électriques des résonateurs demi-longueur d'onde :

$$\theta_j = \pi - \frac{1}{2} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{2B_{j-1,j}}{y_0} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{2B_{j,j+1}}{y_0} \right) \right] \text{ radians} \quad (III. 8)$$

Les capacités de couplage :

$$C_g^{j,j+1} = \frac{B_{j,j+1}}{\omega_0} \quad (III. 9)$$

Nous pouvons déterminer les dimensions  $S_{j,j+1}$  des espaces micro-ondes qui produisent les capacités désirées indiquées dans l'équation (III.9) à partir du tableau (III.9).

**Tableau III-8 [5] : Caractérisation des espaces entre résonateur micro-ondes de largeur de ligne  $W = 1,1$  mm sur un substrat de permittivité  $\epsilon_r = 10.8$  et d'épaisseur  $h=1.27$ mm :**

S(mm)	Y11 = Y22 (siemens) à 6 GHz	Y12 = Y21 (siemens) à 6 GHz	Cg (pF)	Cp (pF)
0.05	$j0.0045977$	$-j0.004434$	0.11762	0.01474
0.1	$j0.0039240$	$-j0.003604$	0.09560	0.00849
0.2	$j0.0032933$	$-j0.0026908$	0.07138	0.01598
0.5	$j0.0026874$	$-j0.0014229$	0.03774	0.03354
0.8	$j0.0025310$	$-j0.00081105$	0.02151	0.04562
1.0	$j0.0024953$	$-j0.00055585$	0.01474	0.05145
1.5	$j0.0024808$	$-j0.0001876$	0.00498	0.06083

Les capacités shunts  $C_p$  associés à ces écarts :

$$C_g = -\frac{Im(y_{21})}{\omega_0} \quad (III. 10)$$

$$C_p = \frac{Im(y_{11} + y_{21})}{\omega_0} \quad (III. 11)$$

Les longueurs effectives des capacités de dérivation :

$$\Delta l_j^{e^1} = \frac{\omega_0 C_p^{j-1,j} \lambda_{g0}}{y_0 2\pi} \quad (III. 12)$$

$$\Delta l_j^{e^2} = \frac{\omega_0 C_p^{j,j+1} \lambda_{g0}}{y_0 2\pi} \quad (III. 13)$$

Les longueurs physiques des résonateurs :

$$l_n = \frac{\lambda_{g0}}{2\pi} \times \theta_j - \Delta l_j^{e^1} - \Delta l_j^{e^2} \quad (III. 14)$$

#### **III.4.1. Conception d'un filtre passe-bande de type Tchebychev de premier ordre :**

Les spécifications nécessaires pour concevoir ce filtre sont les suivantes :

- Fréquence centrale  $f_0 = 5.8$  GHz
- Impédance source / charge  $Z_0 = 50$  ohms
- Largeur de bande fractionnaire FBW = 2.8 %
- L'ondulation dans la bande passante est de 0.1 dB.

Le filtre simulé et conçu est un filtre passe-bande de type Tchebychev de premier ordre. Le matériau utilisé pour concevoir ce filtre micro-onde est le Rogers RO3210, ayant une permittivité relative  $\epsilon_r = 10.8$ , une tangente de perte de 0.002 et une hauteur  $h = 1.27$  mm. La largeur de ligne pour les résonateurs à demi-longueur d'onde est également choisie égale à 1.1 mm.

Les valeurs des éléments sont :

$$g_0 = g_2 = 1$$

$$g_1 = 0.3052$$

À partir de l'équation (III.4) nous obtenons :

$$\frac{j_{01}}{y_0} = 0.3796$$

À partir de l'équation (III.6) nous obtenons :

$$\frac{j_{1,2}}{y_0} = 0.3796$$

Les susceptances associées aux J-inverseurs sont calculées à partir de l'équation (III.7).

$$\frac{B_{0,1}}{y_0} = \frac{B_{1,2}}{y_0} = 0.4435$$

Les longueurs électriques des résonateurs demi-longueur d'onde sont déterminées par l'équation (III.8).

$$\theta_1 = \theta_2 = 2.7241 \text{ radian}$$

En utilisant l'équation (III.9), nous obtenons les capacités de couplage.

$$C_g^{0,1} = C_g^{1,2} = 0.1700 \text{ pF}$$

A partir des résultats de l'équation (III.9) et du tableau (III.9), on trouve les dimensions de  $S_{j,j+1}$  :

$$S_{0,1} = S_{1,2} = 0.05 \text{ mm}$$

En utilisant également l'équation III.11, on détermine les capacités shunts  $C_p$  associés à ces écarts.

$$C_p^{0,1} = C_p^{1,2} = 0.0049 \text{ pF}$$

À la fréquence centrale,  $f_0 = 5.8 \text{ GHz}$ , la longueur d'onde guidée des résonateurs de ligne micro-ruban est de :

$$\lambda_{g0} = c_0 / (f_0 \sqrt{\epsilon_r}) = 18.27 \text{ mm}$$

Les longueurs effectives des capacités de dérivation sont calculées à l'aide des équations (III.12 et III.13).

$$\Delta l_1^{e1} = \Delta l_2^{e2} = 0.0269 \text{ mm}$$

$$\Delta l_1^{e2} = \Delta l_2^{e1} = 0.0269 \text{ mm}$$

### Chapitre III : Simulation et conception des filtres micro-ondes

En fin, les longueurs physiques des résonateurs sont déterminées en remplaçant les longueurs effectives ci-dessus et les longueurs électriques par leurs valeurs dans l'équation (III.14).

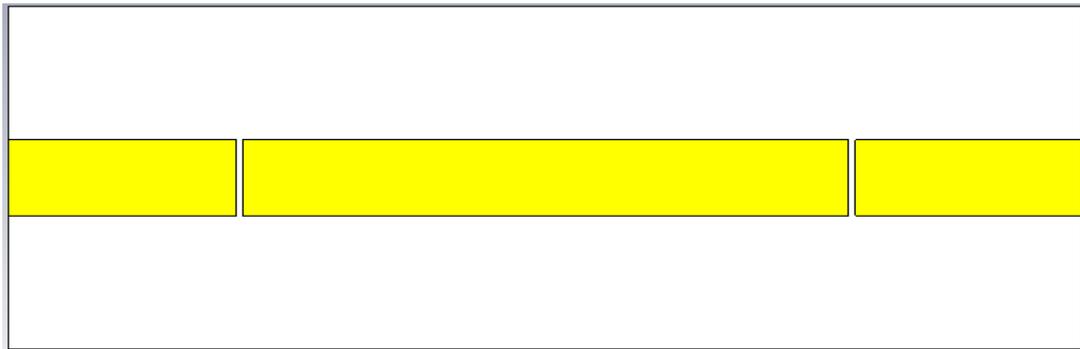
$$l_1 = 7.9 \text{ mm}$$

Le tableau III.9 montre les paramètres géométriques de ce filtre de premier ordre.

**Tableau III-9 : Paramètres géométriques du filtre passe-bande.**

i	L(mm)	W(mm)	S(mm)
1	7.9	1.1	0.05

La figure III.17 montre la structure géométrique du filtre passe-bande de premier ordre conçu avec le logiciel CST.

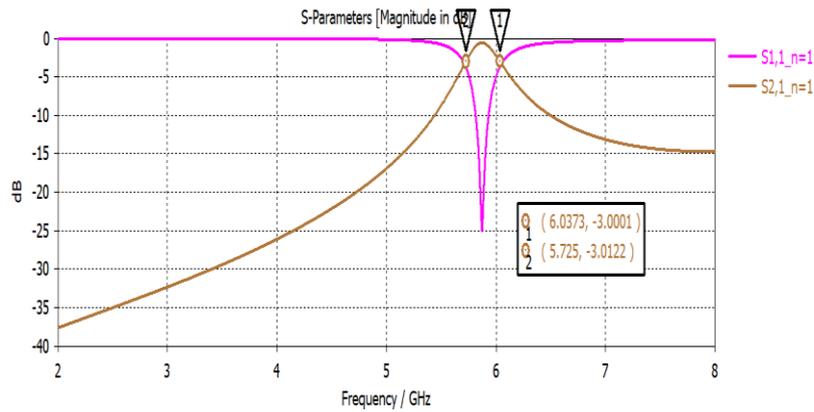


**Figure III.17 : Géométrie du filtre passe-bande de premier ordre conçu.**

Les paramètres optimisés de conception de ce filtre sont montrés dans le tableau III.10. La figure III.18 représente les résultats de simulation obtenus.

**Tableau III-10: Paramètres optimisés de conception du filtre passe-bande conçu.**

i	L(mm)	W(mm)	S(mm)
1	8	1.1	0.057



**Figure III.18 : Réponses fréquentielles du filtre passe bande de premier ordre.**

Nous remarquons que la fréquence centrale est de 5.8 GHz et que la bande passante s'étend de 5,725 à 6 GHz ce qui donne une largeur de bande passante de 275 MHz. Le filtre passe-bande de premier ordre conçu respecte bien le cahier de charge. Nous constatons que la zone de transition est très grande.

**III.4.2. Conception d'un filtre passe-bande de type Tchebychev de troisième ordre :**

En respectant toujours le même cahier de charge, nous concevons un filtre passe-bande de type Tchebychev d'ordre 3.

En utilisant les équations données dans le deuxième chapitre, nous obtenons les valeurs suivantes :

$$g_0 = g_4 = 1$$

$$g_1 = g_3 = 1.0316$$

et  $g_2 = 1.1474$

À partir de l'équation (III.4) nous obtenons :

$$\frac{j_{01}}{y_0} = 0.2065$$

À partir de l'équation (III.5) nous obtenons :

$$\frac{j_{1,2}}{y_0} = 0.0404$$

$$\frac{j_{2,3}}{y_0} = 0.0404$$

À partir de l'équation (III.6) nous obtenons :

$$\frac{j_{3,4}}{y_0} = 0.2065$$

Les susceptances associées aux J-inverseurs sont calculées à partir de l'équation (III.7).

$$\frac{B_{0,1}}{y_0} = \frac{B_{3,4}}{y_0} = 0.1572$$

$$\frac{B_{1,2}}{y_0} = \frac{B_{2,3}}{y_0} = 0.0405$$

Les longueurs électriques des résonateurs demi-longueur d'onde sont déterminées par l'équation (III.8).

$$\theta_1 = \theta_3 = 2.8976 \text{ radian}$$

$$\theta_2 = 3.0608 \text{ radians}$$

En utilisant l'équation (III.9), nous obtenons les capacités de couplage.

$$C_g^{0,1} = C_g^{3,4} = 0.11443 \text{ pF}$$

$$C_g^{1,2} = C_g^{2,3} = 0.021483 \text{ pF}$$

A partir des résultats de l'équation (III.9) et du tableau (III.9), on trouve les dimensions de  $S_{j,j+1}$  :

$$S_{0,1} = S_{3,4} = 0.05 \text{ mm}$$

$$S_{1,2} = S_{2,3} = 0.8 \text{ mm}$$

En utilisant également l'équation III.11, on détermine les capacités shunts  $C_p$  associés à ces écarts :

$$C_p^{0,1} = C_p^{3,4} = 0.0049 \text{ pF}$$

$$C_p^{1,2} = C_p^{2,3} = 0.0457 \text{ pF}$$

Les longueurs effectives des capacités de dérivation sont calculées à l'aide des équations (III.12 et III.13) :

$$\Delta l_1^{e^1} = \Delta l_3^{e^2} = 0.0269 \text{ mm}$$

$$\Delta l_1^{e^2} = \Delta l_3^{e^1} = 0.2505 \text{ mm}$$

$$\Delta l_2^{e^1} = \Delta l_2^{e^2} = \Delta l_1^{e^2}$$

En fin, les longueurs physiques des résonateurs sont déterminées en remplaçant les longueurs effectives ci-dessus et les longueurs électriques par leurs valeurs dans l'équation (III.14).

$$l_1 = l_3 = 8.148 \text{ mm}$$

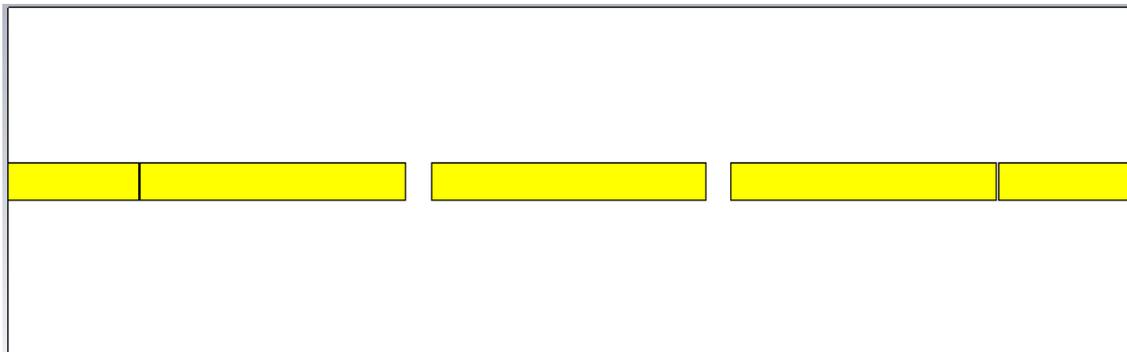
$$l_2 = 8.399 \text{ mm}$$

Le tableau III.11 montre les paramètres géométriques calculés du filtre passe bande d'ordre 3.

**Tableau III-11 : Paramètres géométriques du filtre passe-bande d'ordre 3.**

i	L(mm)	W(mm)
1	8.148	1.1
2	8.399	1.1
3	8.148	1.1

La figure III.19 illustre la géométrie du filtre passe-bande d'ordre 3, simulé sous le logiciel CST.



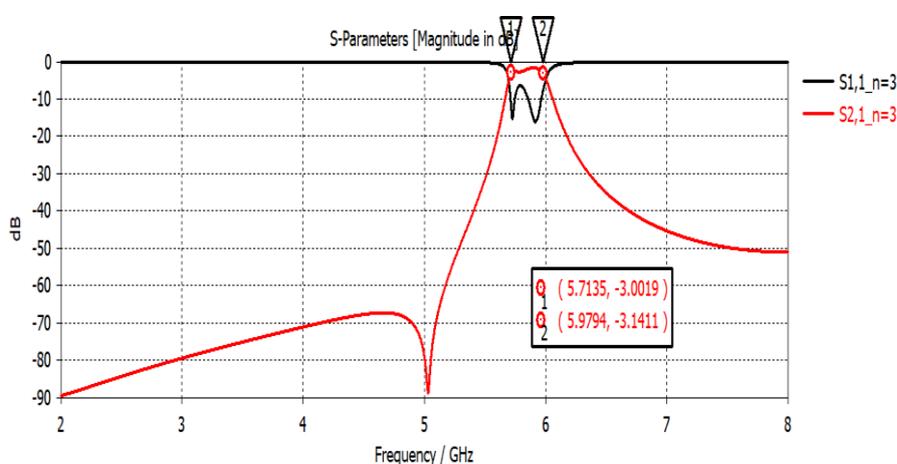
**Figure III.19 : Géométrie du filtre passe bande d'ordre 3.**

Les paramètres optimisés de ce filtre sont montrés dans le tableau III.12.

**Tableau III-12 : Paramètres optimisés de conception du filtre passe-bande d'ordre 3.**

i	L(mm)	W(mm)
1	8.216	1.1
2	8.425	1.1
3	8.216	1.1

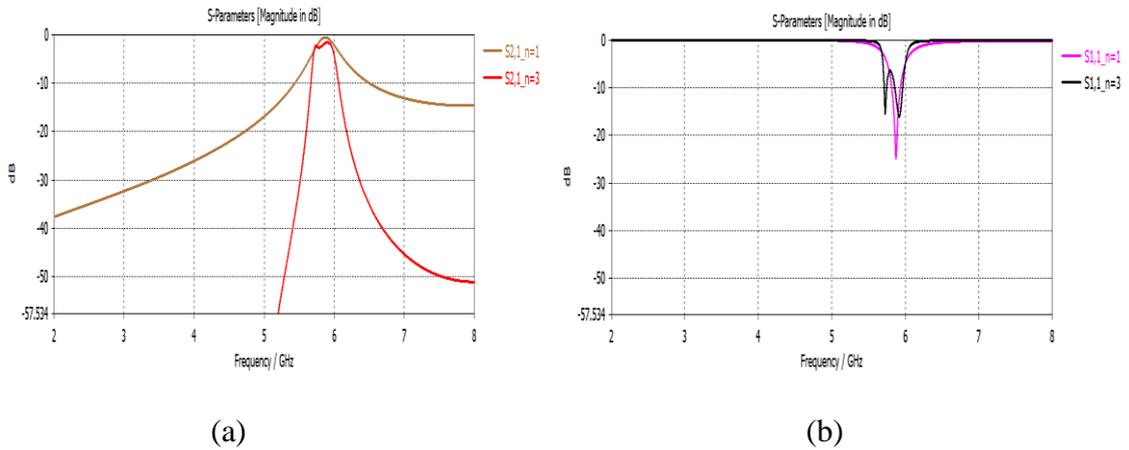
La figure III.20 représente les résultats de simulation du filtre passe-bande d'ordre 3 conçu.



**Figure III.20 : Réponse fréquentielle du filtre passe-bande d'ordre3.**

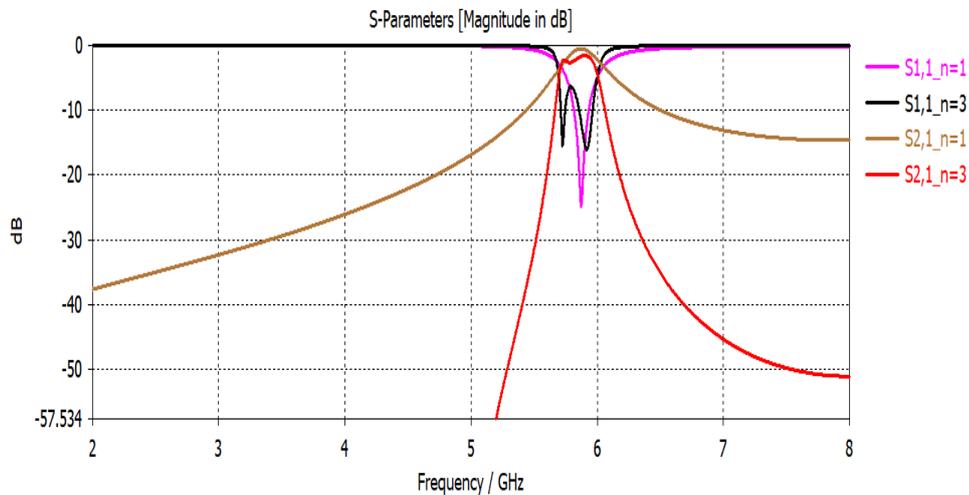
Cette figure montre que la fréquence centrale est de 5.8 GHz et que la bande passante s'étend de 5.7 à 5.974 GHz. Le filtre passe bande d'ordre3 conçu respecte bien le cahier de charge.

La figure III.21 (a) représente le paramètre  $S_{21}$  des filtres passe-bande conçus d'ordre 1 et d'ordre 3 respectivement alors que la figure III.21 (b) représente le paramètre  $S_{11}$ .



**Figure III.21 : (a) Représentation du paramètre  $S_{21}$  du filtre pour un ordre de 1 et 3.  
 (b) Représentation du paramètre  $S_{11}$  du filtre pour un ordre de 1 et 3.**

Sur la figure III.22 nous représentons simultanément les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  des filtres passe-bande de type Tchebychev d'ordre 1 et 3.



**Figure III.22 : Représentation des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du filtre d'ordre 1 et 3.**

Les figures III.21 et III.22 montrent que pour un ordre de 1 nous obtenons une zone de transition plus large que pour le cas d'un ordre égal à 3.

**III.5 : Conception d'un filtre coupe-bande de type Tchebychev :**

Le dernier filtre conçu est un filtre coupe-bande, de type Tchebychev d'ordre 3. La permittivité relative du substrat est de 6.15 et sa hauteur est de  $h=1.27$  mm.

Les spécifications requises pour ce filtre sont les suivantes :

- Fréquence centrale  $f_0 = 2.4$  GHz,
- $f_1 = 1.5$  GHz et  $f_2 = 3.3$  GHz
- Impédance source / charge  $Z_0 = 50$  ohms
- L'ondulation dans la bande passante est de 0.05 dB.

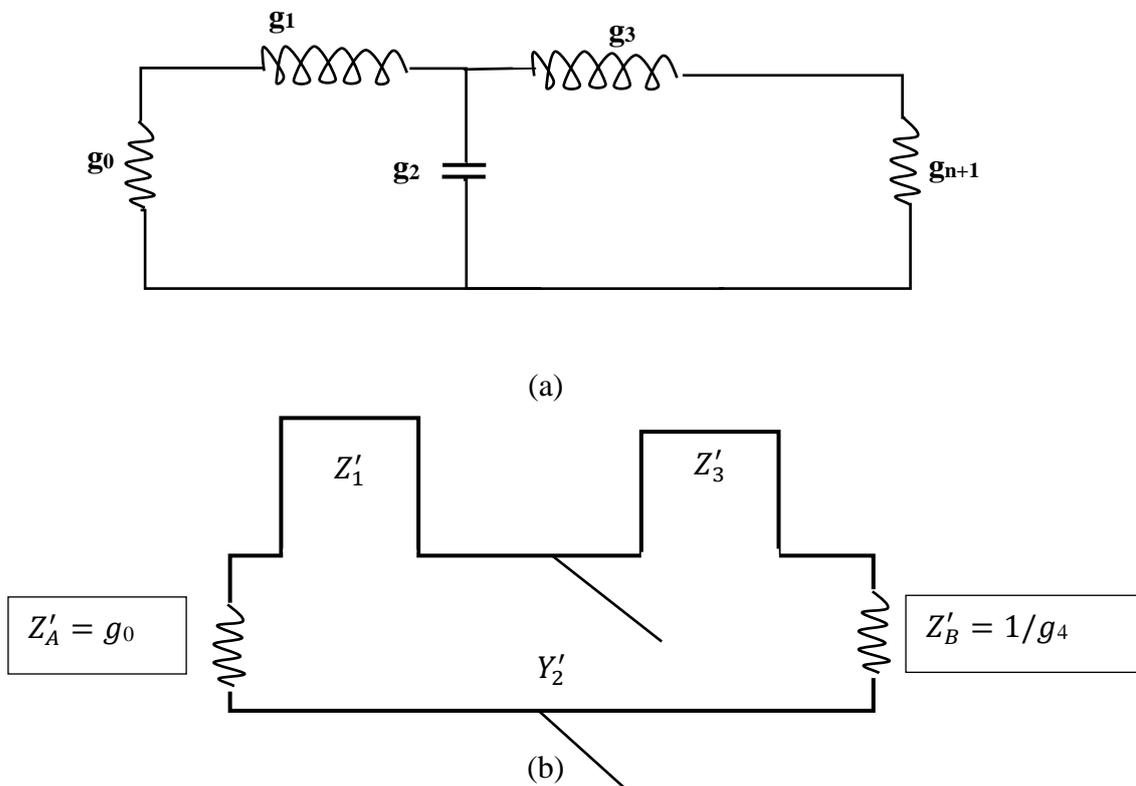
Les équations données dans le deuxième chapitre sont utilisées pour déterminer les valeurs des éléments suivant :

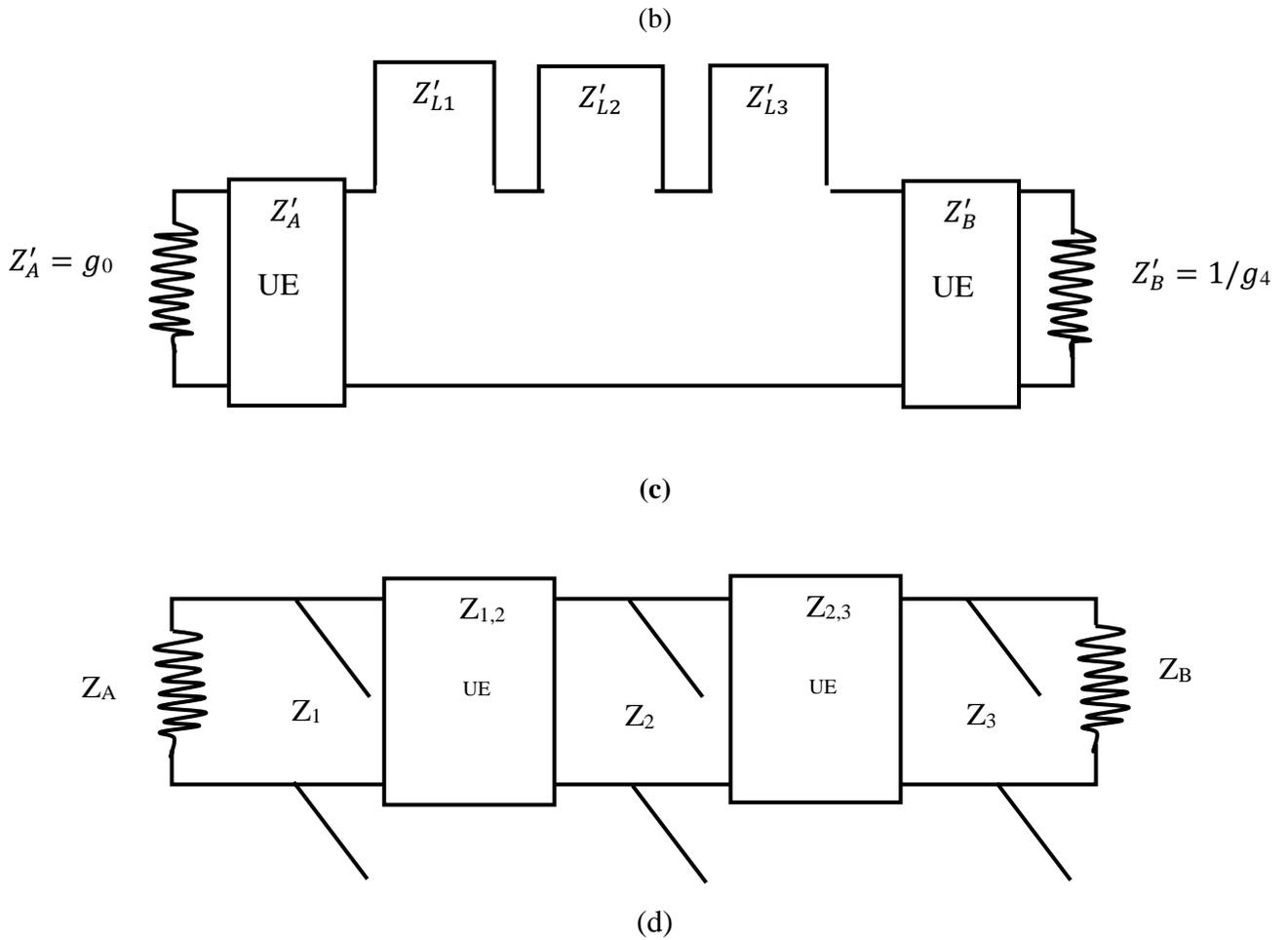
$$g_0 = g_4 = 1$$

$$g_1 = g_3 = 0.8794$$

et  $g_2 = 1.1132$

Les principales étapes de la transformation d'un filtre passe-bas prototype en un filtre coupe bande sont illustrées sur la figure III.23.





**Figure III.23: Principales étapes de la transformation du filtre passe-bas prototype en un filtre coupe-bande.**

**(a) Filtre passe-bas prototype (n = 3).**

**(b) Après application de la correspondance de fréquence.**

**(c) Après avoir appliqué une séquence d'identités de Kuroda.**

**(d) Représentation du réseau de lignes de transmission.**

Séquence d'identités de Kuroda [6] :

Les admittances caractéristiques normalisées des tronçons shunt en circuit ouvert ( $Y_i$ ) sont données par :

$$Y_{c0} = \frac{z'_1}{z'_A(z'_A + z'_1)}$$

$$Y'_2 = \Omega_c g_2 \tag{III.15}$$

Les éléments unitaires  $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$ ,  $Z_{U0}$ ,  $Z_{U1}$  et  $Z_{U2}$  sont données par :

$$\begin{aligned}
 Z_{L1} &= \frac{(Z'_A)^2 Y_{C0}}{1+Z'_A Y_{C0}} \\
 Z_{L2} &= \frac{Z_{U0}^2}{1+Z_{U0} Y'_2} \\
 Z_{U0} &= Z'_A + Z'_1 \\
 Z_{U1} &= \frac{Z'_A}{1+Z_{U0} Y'_2} \\
 Z_{U2} &= \frac{Z_{U0}}{1+Z'_A Y_{C0}}
 \end{aligned}
 \tag{III.16}$$

Nous obtenons un réseau équivalent comme le montre la figure III.23(c).

En appliquant simultanément l'identité de Kuroda au stub  $Z_{U2}$ , au stub  $Z_{L2}$  et à l'élément unitaire  $Z_{U1}$ , au stub  $Z_{L1}$  et à l'élément unitaire  $Z'_A$ , et à l'élément unitaire  $Z'_B$  dans la figure III.23 (c), on obtient un réseau souhaité illustré dans la figure III.23(d), avec les paramètres de conception suivants :

$$\begin{aligned}
 Z_A &= Z_0 Z'_A \\
 Z_1 &= Z_0 Z'_A \frac{Z'_A + Z_{L1}}{Z_{L1}} \\
 Z_2 &= Z_0 Z'_{U1} \frac{Z'_{U1} + Z_{L2}}{Z_{L2}} \\
 Z_3 &= Z_0 Z'_{U2} \frac{Z'_{U2} + Z'_3}{Z'_3} \\
 Z_B &= Z_0 Z'_B \\
 Z_{1,2} &= Z_0 (Z'_A + Z_{L1}) \\
 Z_{2,3} &= Z_0 (Z'_{U1} + Z_{L2})
 \end{aligned}
 \tag{III.17}$$

Les équations de conception du filtre coupe-bande d'ordre 3 de type Tchebychev sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \cot \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{FBW}{2} \right) \right] \\
 Z_A &= Z_0 g_0 \\
 Z_1 &= Z_A \left( 1 + \frac{1}{\alpha g_0 g_1} \right) \\
 Z_{1,2} &= Z_A (1 + \alpha g_0 g_1) \\
 Z_2 &= \frac{Z_A g_0}{\alpha g_2} \\
 Z_3 &= \frac{Z_A g_0}{g_4} \left( 1 + \frac{1}{\alpha g_3 g_4} \right) \\
 Z_{2,3} &= \frac{Z_A g_0}{g_4} (1 + \alpha g_3 g_4) \\
 Z_B &= \frac{Z_A g_0}{g_4}
 \end{aligned}
 \tag{III.18}$$

En utilisant l'équation III.18, nous obtenons les valeurs suivantes :

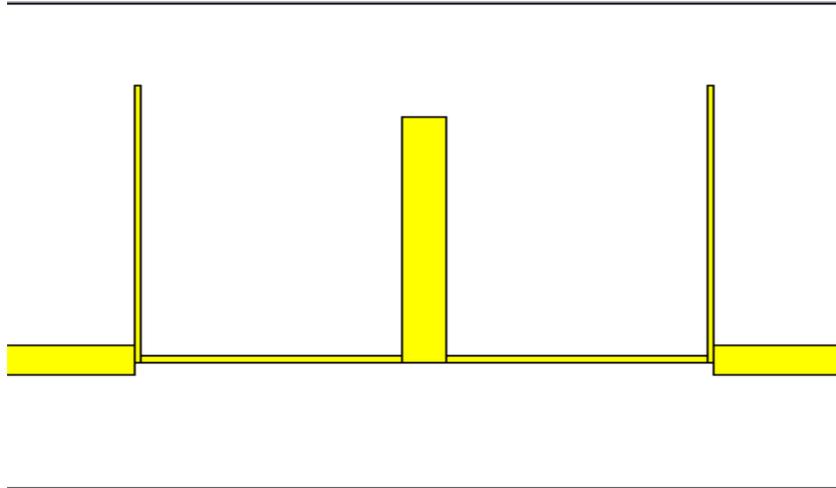
- $\alpha = 1$
- $Z_A = Z_B = 50$  ohms
- $Z_1 = Z_3 = 106.8544$  ohms,
- $Z_{1,2} = Z_{2,3} = 93.9712$  ohms
- $Z_2 = 44.9169$  ohms

Le tableau III.13 donne les paramètres géométriques du filtre coupe bande de type Tchebychev.

**Tableau III-13 : Paramètres géométriques du filtre coupe-bande.**

i	$g_i$	$Z(\Omega)$	L(mm)	W(mm)
1	0.8794	106.85	0.29	15.43
2	1.1132	44.91	2.24	14.64
3	0.8794	106.85	0.29	15.43

La figure III.24 illustre la géométrie du filtre coupe-bande de type Tchebychev conçu avec le logiciel CST.



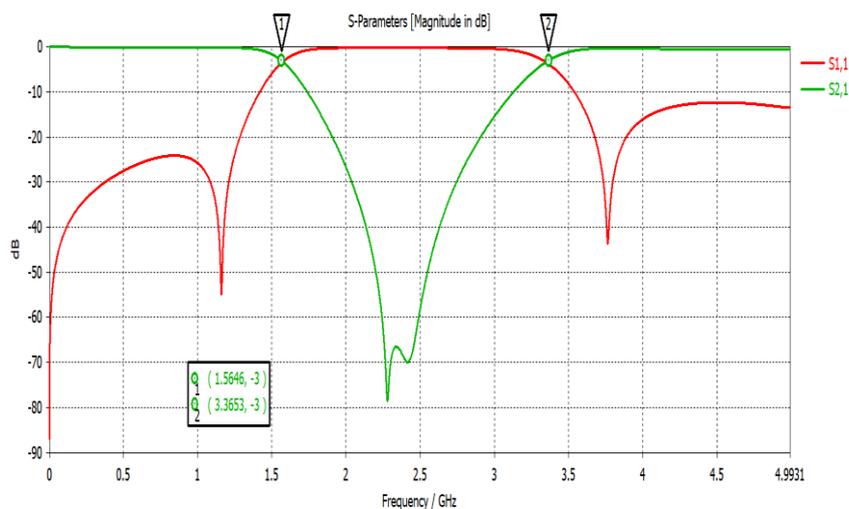
**Figure III.24 : Géométrie du filtre coupe-bande conçu.**

Le tableau III.14 donne les paramètres géométriques optimisés du filtre coupe bande.

**Tableau III-14: Paramètres optimisés de conception du filtre coupe-bande.**

i	$g_i$	$Z(\Omega)$	L(mm)	W(mm)
1	0.8794	106.85	0.3	15.5
2	1.1132	44.91	2.3	14.85
3	0.8794	106.85	0.3	15.5

La figure III.25 représente les résultats de simulation du filtre coupe-bande conçu.



**Figure III.25 : Réponses fréquentielles du filtre coupe-bande conçu.**

Les résultats présentés dans la figure II.25, obtenus à l'aide du logiciel CST, mettent en évidence que le filtre coupe bande de type Tchebychev conçu respecte bien les spécifications requises. La bande coupée s'étend de la fréquence 1.5646 GHz à la fréquence 3.3653 GHz. La fréquence centrale  $f_0$  est de 2.4 GHz et la largeur de la bande coupée est de 1.8 GHz.

#### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié, simulé et conçu plusieurs types de filtres à base de lignes micro-ruban. Le premier filtre conçu est un filtre passe-bas, de type Butterworth, d'ordre 3,5 et 7 sur substrat FR-4. Le deuxième filtre conçu est un filtre passe-bas, de type Butterworth, d'ordre 3,5 et 7 sur substrat de type Preperm L900HF.

Ensuite nous avons conçu un filtre passe-bande de type Tchebychev de premier ordre et de troisième ordre, en utilisant le Rogers RO3210 comme matériel du substrat.

Le dernier filtre conçu est un filtre coupe-bande de type Tchebychev de troisième ordre. Le substrat utilisé pour ce filtre est de permittivité relative de 6.15 et d'hauteur de  $h=1.27$  mm.

Les filtres, conçus et simulés à l'aide du logiciel CST, répondent bien aux exigences spécifiées dans le cahier de charge et d'excellents résultats ont été obtenus lors de cette étude.

**III.7. References:**

- [1] Navita, Pravesh, Vibhav Kumar Sachan "Stepped Impedance Design Of Butterworth Microstrip Low Pass Filter With Split Ring Resonator For N=3" in 04, APRIL 2020.
- [2] N. Engheta and R.W. Ziolkowski (guest editors), IEEE Trans. Antennas Propag., Special Issue on Metamaterials, vol.51, pp.2546– 2750, Oct. 2003.
- [3] N. Engheta and R.W. Ziolkowski, —A positive future for double negative metamaterials, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.53, no.4, pp.1535–1556, April 2005.
- [4] JIA-SHENG HONG M. J. LANCASTER " Microstrip Filters for RF/Microwave Applications" pp.121– 126, in 2001.
- [5] Tzong-Lin Wu "Conception de filtres à micro-ondes" Département de génie électrique Université nationale de Taiwan
- [6] JIA-SHENG HONG M. J. LANCASTER " Microstrip Filters for RF/Microwave Applications", in 2001.

## **Conclusion Générale et Perspectives**

## **Conclusion générale et perspectives :**

Les exigences croissantes des systèmes sans fil de plus en plus complexes nécessitent le développement de nouvelles méthodes de conception des composants sans fil afin de répondre simultanément à de nombreux critères de performance. Parmi ces composants, les filtres micro-ondes jouent un rôle crucial dans les systèmes de transmission à haut débit, relevant ainsi les défis des moyens de communication de nouvelle génération.

Ce mémoire s'est concentré sur l'étude, la simulation et la conception de filtres micro-ondes en technologie microruban. Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu des systèmes de communication modernes sans fil, la technologie 5G et les défis liés à la mise en place de la 5G, notamment la couverture, la sécurité et l'interopérabilité.

Dans le deuxième chapitre, intitulé "Les Filtres Micro-Ondes", nous avons abordé les notions fondamentales sur le filtrage ainsi que les différentes méthodes de conception de filtre et la transformation de filtres à partir du prototype passe bas.

Dans le dernier chapitre intitulé "Conception et Simulation de filtres micro-ondes", nous avons étudié, simulé et conçu plusieurs types de filtres à base de lignes micro-ruban. Le premier filtre conçu est un filtre passe-bas, de type Butterworth, d'ordre 3,5 et 7 sur substrat FR-4. Le deuxième filtre conçu est un filtre passe-bas, de type Butterworth, d'ordre 3,5 et 7 sur substrat de type Preperm L900HF.

Ensuite nous avons conçu un filtre passe-bande de type Tchebychev de premier ordre et de troisième ordre, en utilisant le Rogers RO3210 comme matériel du substrat.

Le dernier filtre conçu est un filtre coupe-bande de type Tchebychev de troisième ordre. Le substrat utilisé pour ce filtre est de permittivité relative de 6.15 et d'hauteur de  $h=1.27$  mm.

Les filtres, conçus et simulés à l'aide du logiciel CST, répondent bien aux exigences spécifiées dans le cahier de charge et d'excellents résultats ont été obtenus lors de cette étude.

En fin, il serait souhaitable de poursuivre cette étude par une mise en œuvre pratique afin de mesurer les différences entre la théorie et la pratique, ainsi que pour faire face à d'autres problèmes qui n'ont pas été abordés dans cette étude, tout en approfondissant la recherche sur la miniaturisation des filtres qui reste un objectif principal de l'étude des filtres micro-ondes.

## **Résumé :**

La communication sans fil a connu une évolution rapide ces dernières décennies, passant de la simple transmission de la voix à des applications multimédias complexes. La cinquième génération de systèmes de communication sans fil (5G) promet des performances considérablement améliorées en termes de débit de données, de latence, de fiabilité et de densité de connexion.

Dans ce projet nous nous sommes intéressés à l'étude, à la simulation et à la conception de filtres micro-onde pour les systèmes de communication modernes sans fil 5G. Plusieurs filtres en technologie micro ruban, de type passe bas, passe bande et coupe bande sont conçus en utilisant le logiciel "CST".

Les filtres conçus répondent bien aux exigences spécifiées dans le cahier de charge et d'excellents résultats ont été obtenus lors de cette étude.

**Mots clés :** Filtres, conception, Réseau 5G, sans fil, filtre micro-onde.

## **Abstract:**

Wireless communication has undergone rapid evolution in recent decades, transitioning from simple voice transmission to complex multimedia applications. The fifth generation of wireless communication systems (5G) promises significantly improved performance in terms of data throughput, latency, reliability, and connection density.

In this project, we focused on the study, simulation, and design of microwave filters for modern 5G wireless communication systems. Several microstrip filters, including low-pass, bandpass, and band-stop filters, were designed using the "CST" software.

The designed filters meet the specified requirements in the design specification, and excellent results were achieved during this study.

**Keywords:** design, 5G network, wireless, microwave filter.