جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

N° d'ordre : 24/2024

Centre des Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales

Formation Doctorale : Sciences de l'Ingénieur, Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique

Discipline : Sciences de l'Ingénieur

Spécialité : Génie Electrique / Télécommunications

Laboratoire : Intelligence Artificielle & Sciences des données & Systèmes Émergents

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

Etude et conception des antennes imprimées en bande millimétrique et Téra hertz et leurs évolution

Préparée par : DIDI Salah-Eddine

Soutenue le samedi 11 mai 2024 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mohammed El GHAZI	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Président
Hassan CHADLI	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Meknès	Rapporteur
Saad BENNANI	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Rapporteur
Wafae EL HAMDANI	PH	Ecole Supérieure de Technologie d'Oujda	Rapporteur
Younes BALBOUL	PH	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Examinateur
Said HRAOUI	PH	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Examinateur
Said MAZER	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Directeur de thèse
Moulhime EL BEKKALI	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Co-Directeur de thèse

DEDICACES

C’est avec une joie que je dédie ce travail à ceux qui m’ont été une source d’inspiration et de volonté.

À tous les Membres de la Famille,

À mes encadrants de thèse les professeurs Imane Halkhams, Mohammed Fattah, Balboul Younes, Said Mazer et Moulhime El Bekkali qui m'ont soutenu.

Une dédicace spéciale à tous mes amis.

Remerciements

Nous profitons de cette occasion pour remercier :

Avant tout, ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné le Courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Tous ceux qui de près ou de loin ont participés à notre encadrement.

Tous les Membres de ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible.

Un remerciement et une reconnaissance particulière à mes encadrants de thèse les professeurs Imane Halkhams, Mohammed Fattah, Balboul Younes, Said Mazer et Moulhime El Bekkali pour leurs conseils avisés, leurs efforts et leur attention particulière.

Nous n'oublions pas de remercier monsieur Abdelhafid Es-saqy pour son aide.

Merci à tous
DIDI Salah-Eddine

Résumé

Cette thèse présente des travaux qui s'inscrivent dans la thématique des conceptions d'antennes en bande millimétrique pour la 5G afin de répondre aux exigences que se posent les utilisateurs lors des entretiens. Le but de nos travaux consiste à améliorer la qualité de la communication entre les usagers, à réduire la durée de réponse et la rendre plus performante, à diminuer le poids de composants électroniques qui sont utilisés en plusieurs secteurs comme le militaire, médical, réseau corporel (BAN : Body Area Network) industriel, agricole, maritime, etc....

En ce qui concerne les antennes, la meilleure solution consiste à réduire la taille des antennes sur le plan électrique, à rendre les composants électroniques beaucoup plus petits et plus compacts, afin d'obtenir un rayonnement aussi uniforme que possible dans toutes les orientations spatiales et une excellente qualité de communication dans toutes les régions du monde. À cette fin, nous proposons des antennes imprimées microruban et des réseaux d'antennes dans les bandes 28GHz, 28/38GHz, 60GHz et Téra hertz. Ces conceptions offrent des performances améliorées en termes de rayonnement, d'adaptation, de bande passante, de réduction de coûts et de taille. De plus, ces antennes sont compatibles avec les applications 5G, telles que le wifi, les smartphones et les applications médicales.

Mots clés : 5G, antennes imprimées microruban, petite taille, Bande passante, fentes, MIMO, BAN, bande millimétrique, THz.

Abstract

This thesis presents work that falls within the theme of millimeter-band antenna design for 5G in order to meet the requirements posed by users during interviews. The aim of our work is to improve the quality of communication between users, to reduce response time and make it more efficient, to reduce the weight of electronic components that are used in several sectors such as military, medical, industrial, agricultural, maritime, etc....

As far as antennas are concerned, the best solution is to reduce the size of the antennas electrically, and to make the electronic components much smaller and more compact, in order to achieve the most uniform radiation possible in all spatial orientations, and excellent communication quality in all parts of the world. To this end, we offer printed antennas and antenna arrays in the 28GHz, 28/38GHz, 60GHz, and terahertz bands. These designs offer improved performance in terms of radiation, matching, bandwidth, cost reduction, and size. What's more, these antennas are compatible with 5G applications, such as wifi, smartphones, and medical applications.

Keywords : 5G, printed microstrip antennas, small size, bandwidth, slot, MIMO, millimeter-wave band, BAN (Body Area Network)**.**

ملخص

تقدم هذه الأطروحة عملاً يقع ضمن موضوع تصميمات هوائي النطاق المليمتري لشبكة الجيل الخامس من أجل تلبية المتطلبات التي يطرحها المستخدمون أثناء المقابلات. الهدف من عملنا هو تحسين جودة التواصل بين المستخدمين، تقليل زمن الاستجابة وجعلها أكثر كفاءة، تقليل وزن المكونات الإلكترونية التي تستخدم في عدة قطاعات مثل القطاع العسكري، الطبي، صناعة شبكات الجسم، الزراعية والبحري وغيرها.

عندما يتعلق الأمر بالهوائيات، فإن الحل الأفضل هو تقليل حجم الهوائيات كهربائيًا، وجعل المكونات الإلكترونية أصغر بكثير وأكثر إحكاما، من أجل تحقيق إشعاع موحد قدر الإمكان في جميع الاتجاهات المكانية وجودة ممتازة للاتصالات في جميع المناطق. من العالم. ولتحقيق هذه الغاية، نقدم هوائيات شريطية مطبوعة ومصفوفات هوائيات في نطاقات 28 جيجا هرتز و38/28 جيجا هرتز و60 جيجا هرتز وتيراهيرتز. توفر هذه التصميمات أداءً محسنًا من حيث الإشعاع والتكيف وعرض النطاق الترددي وخفض التكلفة والحجم. بالإضافة إلى ذلك، تتوافق هذه الهوائيات مع تطبيقات الجيل الخامس، مثل الواي فاي والهواتف الذكية والتطبيقات الطبية.

Production scientifique

Liste des articles

1. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, Y. Balboul, S. Mazer, and M. El Bekkali, "Study and design of printed rectangular microstrip antenna arrays at an operating frequency of 27.5 GHz for 5G applications," Journal of Nano- and Electronic Physics, vol. 13, no. 6, 2021, doi: 10.21272/jnep.13(6).06035.
2. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, "Design of a microstrip antenna patch with a rectangular slot for 5G applications operating at 28 GHz," Journal of TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control. Vol. 20, No. 3, 2022, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v20i3.23159.
3. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali," Study and Design of a 5G Millimeter Band Patch Antenna with a Resonant Frequency of 60 GHz," Journal of Nano- and Electronic Physics, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.21272/jnep.15(2).02015.
4. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, Y. Balboul, S. Mazer, and M. El Bekkali, "New microstrip patch antenna array design at 28 GHz millimeter-wave for fifth-generation application," International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 13, no. 4, 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i4.pp4184-4193.
5. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, Y. Balboul, S. Mazer, and M. El Bekkali, "Creation of a soft circular patch antenna for 5G at a frequency of 2.45 GHz dedicated to biomedical applications," Data and Metadata, vol. 127, no. 2, 2023, doi: 10.56294/dm202312.
6. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, Y. Balboul, S. Mazer, and M. El Bekkali, "Design of a 2x2 dual band 28/38 GHz MIMO antenna in millimeter band for 5G," Journal of TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control, 22, no. 2, 2024, doi : 10.12928/telkomnika.v22i2.25268.
7. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, S. Mazer, and M. El Bekkali, "Creation of a soft circular patch antenna for bio medical applications for 5G at frequency 2.45 GHz," Journal of Results in Engineering, Vol. 22, no. 10, 2024, doi : 10.1016/j.rineng.2024.102319

Liste des communications

1. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, " Design of a Microstrip Antenna Two-Slot for Fifth Generation Applications operating at 27.5GHz," International Conference on Digital Technologies and Applications(ICDTA), Lecture Notes in Networks and Systems, Fes, Morocco, vol 211, pp. 1081-1089. Springer (2021), doi: 10.1007/978-3-030-73882-2_99.
2. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, "A Review of the Design of a Single Antenna and Antenna Arrays at 60 GHz for 5G Applications System," International conference on Big Data, Modelling and Machine Learning (ICBDMML), Kenitra, Morocco, pp. 103-107, 2021, doi: 10.5220/0010729300003101 .
3. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, " Design of a new microstrip patch antenna at 60GHz for 5G," International conference on Advances in communication Technology and Computer Engineering, Meknes, Morocco, 2022, doi:10.1063/5.0148874.
4. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, "Design of a soft handheld button antenna with an operating frequency of 60GHz in the 5G millimeter band," 2nd Edition of the International Congress on Sustainable Buildings and Cities, Fez, Morocco, 2023.
5. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali," Study and Design of a 28/38 GHz Bi-band MIMO Antenna Array Element for 5G.," In: (eds) Artificial Intelligence and Smart Environment, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 635, pp. 740-746, Springer, Cham (2023), doi: 10.1007/978-3-031-26254-8_107.
6. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, Y. Balboul, S. Mazer, and M. El Bekkali," Creation of a Soft Circular Patch Antenna for 5G at a Frequency of 2.45 GHz," In: (eds) Artificial Intelligence, Data Science and Applications, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 838, pp. 473-479, Springer, Cham (2024), doi: 10.1007/978-3-031-48573-2_68.
7. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, S. Mazer, and M. El Bekkali," Advanced Study and Design of a Flexible MIMO Circular Patch Antenna Array for 5G Communication at 2.45 GHz" IEEE International Conference on Circuit, Systems and Communication, Fez, Morocco (2024), (en cours de publication).
8. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, S. Mazer, and M. El Bekkali," High-Performance Directional Printed Antenna Array for 5G Applications at 28 GHz" IEEE International Conference on Circuit, Systems and Communication, Fez, Morocco (2024), (en cours de publication).

Liste des chapitres

1. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, D. Sudipta, "Study and Design of the Microstrip Patch Antenna Operating at 120 GHz," In (eds) Terahertz Wireless Communication Components and System Technologies. pp. 175-190, Springer, Singapore (2022). doi: 10.1007/978-981-16-9182-9_12.
2. S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali," Study and Design of the Terahertz Antenna Array," In: (eds) Terahertz Devices, Circuits and Systems, Springer, Singapore, (2022). doi: 10.1007/978-981-19-4105-4_13.
3. S. E. Didi, I. Halkhams, A. Es-saqy, M. Fattah, S. Mazer, and M. El Bekkali," Conception d'antenne imprimée en bande 300GHz" In: (eds) Terahertz Devices, Circuits and Systems, Springer, Singapore, (2024), (en cours de publication).

Table des matières

DEDICACES i
Remerciements ii
Résumé iii
Abstract iv
ملخص v
Production scientifique vi
Table des matières ix
Liste des figures xiii
Liste des tableaux xv
Liste des abréviations xvi
Introduction générale 1
Chapitre I. Généralités sur les antennes pour la 5G et leur évolution 5
1 Introduction 6
2 Introduction à la 5G 6
2.1 Objectifs visés par la 5G 6
2.2 Axes de développement de la 5G 6
2.3 Revue de la bande passante de la 5G 7
2.3.1 Importance de la bande passante 7
2.3.2 Bandes de fréquence 5G 7
2.4 Caractéristiques de la 5G 8
2.4.1 Les ondes millimétriques 8
2.4.2 Petites cellules 8
2.4.3 MIMO massive 9
2.4.4 Formation de faisceaux 9
2.4.5 Duplex intégral 10
2.5 Applications visées pour les réseaux 5G 11
2.6 L'évolution de la 5G 12
3 Antennes pour la 5G 14
3.1 Généralités sur les antennes 14
3.1.1 Définition 14
3.1.2 Histoire d'une antenne 14
3.1.3 Caractéristiques d'une antenne 16
3.1.3.1 Caractéristiques électriques 16

3.1.3.2 Caractéristiques de rayonnement 22
3.2 Type d'antenne utilisé dans la 5G 33
3.2.1 Classification des antennes 5G 33
3.2.2 Techniques d'amélioration des caractéristiques des antennes 37
4 Conclusion 40
Reference de chapitre 1 41
Chapitre 2 : Etude et Conception des antennes imprimées au voisinage de 30 GHz 44
1 Introduction 45
2 L'antenne imprimée 46
2.1 Description d'une antenne patch 46
2.2 Mécanismes de rayonnement 47
2.3 Les techniques d'alimentation 48
2.3.1 Alimentation par ligne microruban 48
2.3.2 Alimentation par sonde coaxiale 48
2.3.3 Alimentation couplée à une ouverture 49
2.3.4 Couplage de proximité 50
2.4 Adaptation d'impédance 51
2.5 Réseaux d'antennes imprimées 52
2.5.1 Définition 52
2.5.2 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes imprimées 54
2.5.2.1 Alimentation parallèle 54
2.5.2.2 Alimentation série 55
2.5.3 Applications pratiques des réseaux d'antennes 55
2.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées 56
2.7 Applications des antennes imprimées 57
2.8 Procédure de conception d'une antenne imprimée 57
2.9 Travaux antécédents 61
2.10 Cahier de charge pour les antennes imprimées de la 5G 62
3 Etude et conception d'une antenne imprimée opérationnelle à 27,5 GHz 63
3.1 Méthode de conception 63
3.2 Résultats des simulations 64
4 Étude et conception de réseaux d'antennes rectangulaires imprimées en microruban à une fréquence de fonctionnement de 27,5 GHz pour les applications 5G 67
5 Etude et conception d'une antenne imprimée opérationnelle à 28 GHz 70
5.1 Méthode de recherche 70
5.2 Résultats des simulations et discussions 71

6 Étude et conception de réseaux d'antennes rectangulaires imprimées microruban à 28 GHz pour les applications 5G 75
7 Analyse comparative des résultats de ces travaux proposés par rapport aux résultats de la bibliographie 78
8 Conclusion 79
Références de chapitre 2 80
Chapitre 3 : Étude et conception des antennes Imprimées en bande millimétrique pour la 5G au voisinage de 60 GHz 83
1 Introduction 84
2 La bande de fréquence de 60 GHz 85
3 Revue de la conception d'une antenne et des réseaux d'antennes dans la bande de fréquence de 60 GHz pour la 5G 88
3.1 Analyse de la situation et des coûts liés aux liaisons à 60 GHz 89
3.2 Aspects de la conception des antennes à ondes millimétriques 90
4 Etat de l'art et des technologies d'antenne 60 GHz analyse comparative 90
5 Conception d'une nouvelle antenne patch microruban pour la 5G au voisinage de 60 GHz 92
5.1 Procédures de modélisation et de conception d'antenne 93
5.2 Résultats de simulation et interprétations 94
6 Etude et conception d'une antenne patch en bande millimétrique de fréquence de résonance de 60 GHz 95
6.1 Géométrie de l'antenne proposée 96
6.2 Résultats et l'interprétation 96
6.2.1 Résultats des simulations effectuées avant l'optimisation 96
6.2.2 Résultats des simulations effectuées lors de l'optimisation 97
7 Conception d'une antenne portable souple en forme de bouton dans la bande millimétrique de la 5G de fréquence opérationnelle 60 GHz 99
7.1 La procédure de conception 99
7.2 Résultats et interprétation 99
8 Analyse comparative des résultats de ces travaux proposés par rapport aux résultats existants 101
9 Conclusion 102
Reference de chapitre 3 103
Chapitre 4 : Étude et conception des antennes imprimées en bande Terahertz 106
1 Introduction 107
2 Applications des fréquences Téra hertz 109
2.1 Biomédical 109
2.2 Imagerie 110

2.3 Spectroscopie 111
2.4 Sécurité et défense 111
2.5 Le contrôle de la qualité et les tests non destructifs 111
2.6 Détection chimique 111
2.7 Alimentation et agriculture 111
2.8 Astronomie 112
2.9 Conservation de l'art 112
2.10 Contrôle des processus industriels 112
2.11 Télécommunications 112
3 Composants de THz 114
3.1 Sources de rayonnement Téra hertz 114
3.2 Détecteurs THz 116
3.2.1 Spectres de transmission de THz 116
3.2.2 Spectroscopie FTIR 116
3.2.3 Spectroscopie dans le domaine temporel TDS 118
4 Antennes adaptées aux fréquences térahertz 119
5 Application 120
5.1 Etude et conception d'une antenne patch microruban fonctionnant à 120 GHz 120
5.1.1 Méthodologie de conception d'une antenne patch microruban 120
5.1.2 Résultats des simulations et interprétations 121
5.2 Étude et conception du réseau d'antennes Téra hertz 123
5.3 Comparaison des résultats obtenus avec ceux récents des publications scientifiques 126
6 Conclusion 127
Reference de chapitre 4 128
Conclusion générale et perspectives 130

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure I. 1 : Objectifs visés par la 5G 6
Figure I. 2 : Exemples d'applications visées pour les réseaux 5G 11
Figure I. 3 : Principales étapes de la 6G 12
Figure I. 4 : Courbe représentative d'une Impédance d'entrée $\boldsymbol{Z}$A 17
Figure I. 5 : Schéma équivalent d'une antenne 18
Figure I. 6 : Coefficient de réflexion d'une antenne en fonction de la fréquence 21
Figure I. 7 : Systèmes de coordonnées pour l'analyse de l'antenne 22
Figure I. 8 : Schéma de champ lointain 25
Figure I. 9 : (a) Diagrammes de rayonnement en 3D et (b) diagrammes de rayonnement en 2D (gain en dB) 26
Figure I. 10 : Représentation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre 30
Figure I. 11 : Type de polarisation 31
Figure I. 12 : Représentation de la polarisation elliptique dans une direction ($\boldsymbol{\theta}$, φ) 33
Figure I. 13 : Classification des antennes 5G en fonction des ports d'entrée et de sortie 35
Figure I. 14 : Types d'antennes utilisées dans la 5 G 37

Chapitre 2 :

Figure II. 1: Géométrie d'une antenne imprimée 46
Figure II. 2: Le mécanisme de rayonnement d'une antenne imprimée 47
Figure II. 3: Alimentation par ligne micro ruban 48
Figure II. 4: L'alimentation de la sonde coaxiale 49
Figure II. 5: Alimentation couplée à une ouverture 49
Figure II. 6: Méthode d'alimentation par couplage de proximité 50
Figure II. 7: Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes produit par l'interférence d'antennes individuelles 52
Figure II. 8: Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels 53
Figure II. 9: Alimentation parallèle d'un réseau linéaire 55
Figure II. 10: Alimentation série d'un réseau linéaire 55
Figure II. 11: Antenne patch microruban rectangulaire 58
Figure II. 12: Structure de l'antenne patch en microruban conçue 64
Figure II. 13: Coefficient de réflexion S11 de l'antenne proposée dans cette recherche 65
Figure II. 14: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne conçue 65
Figure II. 15: Diagramme de rayonnement de gain en 3D 66
Figure II. 16: Diagramme de rayonnement de directivité en 3D 66
Figure II. 17: Réseau d'antennes conçus (1×4) 67
Figure II. 18: (a) Courbe de S11 de réseau d'antenne 1×2, (b) Courbe de S11 de réseau d'antenne 1×4 68
Figure II. 19: (a) diagramme de gain en 3D et (b) diagramme de directivité en 3D de réseau d'antenne 1×2 69
Figure II. 20: (a) diagramme de gain en 3D et (b) diagramme de directivité en 3D de réseau d'antenne 1×4 69
Figure II. 21: Structure de l'antenne présentée 71
Figure II. 22: Les courbes S11 sont obtenues par HFSS (a) et (b), et par CST (c). 72
Figure II. 23: Courbe du ROS à l'aide de : (a) HFSS et (b) CST 72

Figure II. 24: Représentation graphique du gain en 3D et en 2D, à l'aide de HFSS 73
Figure II. 25: Représentation de la directivité en 2D et 3D à l'aide du logiciel HFSS 73
Figure II. 26: Diagramme de rayonnement du gain en 3D et en 2D sur CST 73
Figure II. 27: Représentation de la directivité en 3D et en 2D à l'aide du logiciel CST 74
Figure II. 28: Géométrie du réseau d'antennes proposé 76
Figure II. 29: (a) Courbe de S11 et (b) diagramme de gain 3D de l'antenne unique proposée 76
Figure II. 30: (a) courbe S11 et (b) courbe VSWR du réseau d'antennes proposé 77
Figure II. 31: (a) diagramme de gain 3D et (b) diagramme de gain 2D du réseau d'antennes proposé. 77
Figure II. 32: (a) diagramme de directivité 3D et (b) diagramme de directivité 2D du réseau d'antennes proposé. 77

Chapitre 3 :

Figure III. 1: Géométrie de l'antenne proposée 93
Figure III. 2: Représentation graphique de la courbe S11 94
Figure III. 3: (a) Représentation graphique du gain en 3D, (b) Représentation graphique de la directivité en 3D. 95
Figure III. 4: (a) antenne proposée sans optimisation, (b) géométrie d'antenne optimisée. 96
Figure III. 5: (a) la courbe de S11 et (b) celle du ROS de cette nouvelle antenne non-optimisée. 97
Figure III. 6: (a) Le diagramme de gain 3D et (b) 2D de la proposition d'antenne non optimisée. 97
Figure III. 7: (a) la courbe de S11 et (b) celle du ROS de cette nouvelle antenne optimisée. 98
Figure III. 8: (a) diagramme de gain 3D et (b) diagramme de gain 2D de la proposition d'antenne optimisée. 98
Figure III. 9: (a) Diagramme de directivité 3D et (b) 2D de la proposition d'antenne optimisée. 98
Figure III. 10: Structure de la proposition d'antenne 99
Figure III. 11: (a) la courbe de S11 et (b) celle du ROS de cette nouvelle antenne optimisée. 100
Figure III. 12: (a) diagramme de gain 3D et (b) diagramme de gain 2D de la proposition d'antenne optimisée. 100
Figure III. 13: (a) Diagramme de directivité 3D et (b) 2D de la proposition d'antenne optimisée. 100

Chapitre 4 :

Figure IV. 1: Schéma d'une antenne THz (a) et d'un circuit RC équivalent (b) 115
Figure IV. 2: Schéma de montage d'un spectromètre FTIR commercialisé par la société Brucker Vertex-80 117
Figure IV. 3: Schéma d'une installation de spectroscopie TDS pour mesurer le spectre de transmission THz 118
Figure IV. 4 : Géométrie de l'antenne proposée 121
Figure IV. 5: Courbe de S11 122
Figure IV. 6: (a) le diagramme de gain 3D et (b) en 2D de cette antenne conçue 122
Figure IV. 7: Géométrie de réseau d'antenne proposée 124
Figure IV. 8: Représentation graphique de S_{11} 125
Figure IV. 9: Représentation du gain en 3D et en 2D 126

Liste des tableaux

Chapitre 2 :

Tableau II-1: Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation..... 51
Tableau II- 2: Spécification pour les antennes imprimées dédiées à la 5G..... 62
Tableau II- 3: Dimensions de l'antenne proposées dans cette étude..... 64
Tableau II- 4: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 66
Tableau II- 5: comparaison entre les caractéristiques de l'antenne précédente et celles de l'antenne améliorée..... 67
Tableau II- 6: paramètres de réseau d'antenne conçue..... 68
Tableau II- 7: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 69
Tableau II- 8: Dimensions de l'antenne proposées dans cette étude..... 71
Tableau II- 9: Résultats des simulations de cette antenne..... 74
Tableau II- 10: Comparaison des résultats des simulations avec les outils HFSS et CST..... 75
Tableau II- 11: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 77
Tableau II- 12: Résultat de la comparaison entre cette antenne et les antennes des travaux existants.. 78

Chapitre 3 :

Tableau III- 1: Gamme de fréquences avec puissance d'émission maximale et gain maximal pour un système à 60 GHz..... 89
Tableau III- 2: Comparaisons des performances des différentes antennes existantes..... 91
Tableau III- 3: Paramètres de l'antenne proposée..... 94
Tableau III- 4: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 95
Tableau III- 5: Paramètres de l'antenne proposée..... 96
Tableau III- 6: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 98
Tableau III- 7: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 101
Tableau III- 8: Analyse comparative des résultats de cette antenne avec les résultats existants..... 101

Chapitre 4 :

Tableau IV-1: Bandes de fréquences utilisables pour les communications sans fil jusqu'à 1 THz..... 113
Tableau IV-2: Paramètres de l'antenne proposée..... 121
Tableau IV-3: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 122
Tableau IV-4: Paramètres de l'antenne proposée..... 124
Tableau IV-5: Caractéristiques de l'antenne conçue..... 126
Tableau IV-6: Comparaison des résultats de simulation obtenus avec les résultats des travaux disponibles..... 126

Liste des abréviations

2D : Deux Dimensions

3D : Tridimensionnelle

4G : Quatrième génération

5G : Cinquième génération

6G : sixième génération

ID : Identification

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

ISM : Industrial Scientific and Medical

ISO : International Organization for Standardization

BAN : body area networks

DGS : Defected Ground Slotted

EBG : Electromagnetic Band Gap

FSS : surfaces sélectives en fréquence

IA : l'intelligence artificielle

ICPs : Indicateurs clés de performance

IoT : l'internet des objets

LTE : Évolution à long terme

MIMO : Multiple Input Multiple Output

PD : densité de puissance

RA : le rapport axial

ROS : Rapport d'onde stationnaire

SAR : Specific absorption rate

RFID : Radio Frequency Identification

SISO : Single Input Single Output

S_{11} : Coefficient de réflexion

WPAN : Wireless Personal Area Networks

Introduction générale

L'évolution rapide des systèmes de communication mobile vers la 5G (cinquième génération) exige des antennes multi-bandes et à large bande pour soutenir l'interopérabilité, fournir une plus grande couverture et réduire la complexité du système. En particulier aux fréquences d'ondes millimétriques, une antenne pour la 5G doit être compacte et doit répondre aux exigences en matière de bande passante et d'efficacité de rayonnement. Le spectre des ondes millimétriques subit davantage de pertes sur le trajet en raison de l'augmentation des absorptions atmosphériques et des atténuations aux fréquences plus élevées. Par conséquent, les antennes de la 5G doivent avoir un gain élevé et une directivité accrue afin de surmonter l'affaiblissement du trajet. En outre, un autre défi de la communication mobile aux fréquences micro-ondes et ondes millimétriques est que l'orientation et l'emplacement de l'appareil mobile ne sont pas constants. Ainsi, la direction de la communication n'est pas connue. Par conséquent, pour atténuer les pertes sur le trajet, pour une meilleure couverture spatiale et pour obtenir une directivité et un gain élevés, les réseaux d'antennes et les antennes orientables sont largement considérées comme des éléments clés pour la communication mobile et à large bande de la 5G. En outre, pour répondre aux exigences plus élevées en utilisateurs et pour une zone de couverture plus large, la technologie MIMO (multiple-input and multiple-output) a été largement explorée récemment pour la communication 5G. Cette technologie est l'une des technologies permettant d'obtenir une largeur de bande 100 fois supérieure à celle des systèmes 4G/LTE (Long Term Evolution). Par ailleurs Les antennes 5G à ondes millimétriques devraient être compatibles avec les technologies précédentes telles que la 4G/LTE, des antennes 4G/LTE et 5G à ondes millimétriques intégrées ou coexistantes constitueront une solution efficace pour les communications à longue et courte distance. D'un autre côté, la conception de ces antennes est un véritable défi en raison des effets de couplage accrus entre des antennes très proches les unes des autres. Certaines études récentes font état de conceptions d'antennes pour des appareils portables où les antennes 4G/LTE et les antennes 5G à ondes millimétriques coexistent sur la même carte de substrat. Dans ce contexte, nous avons trouvé des réseaux des antennes "MIMO" aux fréquences micro-ondes ainsi qu'un réseau d'antennes à ondes millimétriques. Ces antennes sont planaires qui sont destinées aux appareils intelligents. Parallèlement, nous avons trouvé une structure antennaire MIMO qui fonctionne aux fréquences micro-ondes ainsi qu'un réseau d'antennes à fente conique en ondes millimétriques pour les appareils portatifs. Ce réseau à fente est également utilisé comme structure de découplage aux hyperfréquences. Dans un autre travail, une antenne MIMO à deux éléments pour le LTE (Évolution à long terme) et une

structure d'antenne MIMO à quatre éléments pour la 5G à ondes millimétriques coexistent sur la même carte. La conception proposée intègre des fentes rectangulaires et circulaires comme DGS (Defected Ground Slotted) pour améliorer les performances de l'antenne. Les analyses SAR (Débit d'absorption spécifique) et PD (densité de puissance) permettent également de vérifier que le système d'antenne proposé satisfait aux normes internationales de sécurité humaine.

La technologie des antennes patch microruban existe depuis les années 1970, mais leurs performances exceptionnelles et leur faible coût les ont rendues plus désirables à l'ère de la 5G. En général, ces antennes sont compactes, légères et discrètes, ce qui les rend idéales pour les systèmes MIMO et les appareils mobiles tels que les smartphones et les tablettes. En outre, elles peuvent être facilement intégrées dans l'infrastructure existante, ce qui en fait une option viable pour un déploiement plus large dans les réseaux 5G. De plus, les antennes patch sont très polyvalentes. Elles sont légères, de petite taille et offrent une faible puissance de rayonnement. Elles peuvent fonctionner à des fréquences doubles ou triples et conviennent à une grande variété d'applications. La conception discrète de ces antennes permet de les intégrer facilement dans un circuit imprimé.

Le MIMO étant un élément clé de la communication à ondes millimétriques 5G, les recherches récentes ont largement exploré les conceptions d'antennes MIMO afin d'obtenir une capacité de canal plus élevée. Cependant, un inconvénient associé à la configuration MIMO est le couplage entre les éléments multiples. Diverses techniques telles que les EBG (Electromagnetic Band Gap), les DGS, les surfaces sélectives en fréquence (FSS), les métasurfaces et les ondulations de métasurface ont été utilisées pour réduire les effets de couplage et améliorer les caractéristiques de rayonnement des antennes MIMO récemment.

L'arrivée de la technologie des antennes 5G a transformé nos interactions et communications mobiles avec l'ingénierie électrique à l'ère numérique. Alors que le monde évolue vers des réseaux de communication mobile plus efficaces et plus fiables, l'antenne microruban 5G joue un rôle crucial dans la mise en œuvre de la prochaine génération de communication sans fil. Ces antennes transmettent et reçoivent des rayonnements électromagnétiques par le biais d'ondes radio dans les réseaux de technologie de communication sans fil 5G. Elles constituent un composant lié à toute 5G, assurant une communication fiable entre ses nombreuses fonctionnalités.

Récemment, plusieurs travaux ont fait état de conceptions d'antennes pour les dispositifs de communication 5G à ondes millimétriques. Dans le spectre des ondes millimétriques, les pertes atmosphériques sont élevées, c'est pourquoi des antennes à gain élevé sont nécessaires pour les systèmes 5G. Les antennes patch unique ont un faible gain, de nombreux travaux ont été réalisés pour améliorer les performances de l'antenne en termes de largeur de bande, de gain et de zone de couverture. Une antenne omnidirectionnelle à polarisation circulaire a été proposée pour les communications d'appareil à appareil de la 5G en intégrant des dipôles électriques et magnétiques dans une structure en forme de disque de manière à ce qu'ils soient orientés parallèlement. On trouve également une antenne à dipôles croisés dans laquelle un dipôle électrique et un dipôle magnétique sont intégrés afin d'améliorer les performances de l'antenne. Parallèlement, il existe aussi une antenne patch à polarisation circulaire. Dans le but d'améliorer les performances de l'antenne en termes de gain, de bande passante et de rapport axial, une métasurface en forme d'anneau carré est montée au-dessus de l'antenne patch. Similairement, pour augmenter l'efficacité spectrale, une antenne à faisceau commutable pour les applications 5G à ondes millimétriques est montée au-dessus de l'antenne patch. En outre, la commutation de faisceau est obtenue en incorporant deux diodes PIN dans le plan de masse. Les concepteurs ont proposé une antenne à large bande pour les dispositifs de communication à ondes millimétriques 5G, où le gain est élevé. Il s'agit d'un réseau d'antennes linéaires de quatre éléments.

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les antennes pour la 5G et leur évolution. Il est divisé en deux parties, la première étant consacrée à une introduction à la 5G et la seconde aux antennes pour la 5G. Dans la première partie, nous présentons la technologie 5G en détail, y compris ses objectifs, les voies de développement, les bandes de fréquences, les ondes millimétriques, le MIMO massif, le duplex intégral, la formation de faisceaux et les petites cellules, les applications ciblées pour les réseaux 5G et les perspectives de développement de la 5G (6G). Ensuite, dans la deuxième partie, nous examinerons de plus près les généralités sur les antennes, telles que la définition, l'histoire de l'antenne, les caractéristiques électriques et les caractéristiques de rayonnement. Enfin, nous examinerons les différents types d'antennes utilisés dans la 5G.

Le deuxième chapitre illustre l'étude et la conception d'antennes et de réseaux d'antennes imprimées au voisinage de la bande des 30 GHz. Ce chapitre débute par une introduction qui présente les évolutions liées à la technologie de l'antenne ainsi que les antennes adéquates à la technologie 5G. Puis nous présentons tous les aspects liés à l'antenne imprimée, parmi lesquels

sa définition, ses principes de fonctionnement, ses mécanismes de rayonnement, ses techniques d'alimentation, son adaptation d'impédance, ses caractéristiques, ses réseaux d'antennes imprimées, ses avantages et inconvénients, ses applications ainsi que sa procédure de conception. Ensuite, nous avons proposé la conception d'une nouvelle antenne ainsi que d'un réseau d'antennes imprimées micro ruban qui fonctionnant à 27,5 GHz. De plus, nous proposons également de nouvelle antenne ainsi que du réseau d'antennes imprimées pour une fréquence d'opération de 28 GHz. Finalement, nous ferons une analyse comparative des résultats de ce travail proposé avec les résultats existants.

Dans le troisième chapitre, nous illustrons l'étude et la conception d'antennes imprimées en bande millimétrique pour la 5G, avec une fréquence de résonance de 60 GHz. Ce chapitre expose également de manière détaillée tout ce qui concerne cette étude. Après une petite introduction nous présentons une étude de l'état de l'art concernant la conception d'antennes et de réseaux d'antennes dans la bande de fréquence de 60 GHz pour la 5G. Dans la partie qui suit, nous proposons une nouvelle antenne patch micro ruban, ainsi qu'une antenne portable flexible en forme de bouton avec une fréquence de fonctionnement de 60 GHz. Finalement, nous comparons les résultats de notre travail proposé avec les résultats existants.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude et à la conception d'antennes imprimées en bande Térahertz. Il contient également les sections suivantes : introduction, applications de la technologie THz, composants THz, sources de rayonnement térahertz, détecteurs THz, spectres de transmission THz, antennes adaptées aux fréquences térahertz, étude et conception d'une antenne patch microruban fonctionnant à 120 GHz, étude et conception du réseau d'antennes térahertz, enfin, comparaison des résultats obtenus avec ceux disponibles dans la littérature scientifique.

Chapitre I. Généralités sur les antennes pour la 5G et leur évolution

1 Introduction

Dans les systèmes de communication sans fil et en particulier pour la 5G, les signaux sont émis dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques à l'aide d'une antenne réceptrice ou émettrice [I.1]. En outre les antennes sont des composantes importantes pour tous les dispositifs fonctionnant sans fil. Elles sont utilisées dans des systèmes tels que la radiodiffusion, la télévision, la radio bidirectionnelle, les récepteurs de communication, les radars, les téléphones cellulaires et les communications par satellite, ainsi que dans d'autres dispositifs tels que les ouvre-portes de garage, les microphones sans fil, les réseaux informatiques sans fil, les moniteurs pour bébés et les étiquettes RFID (Radio Frequency Identification) sur les marchandises [I.2]. Dans ce chapitre nous allons présenter la technologie 5G, les généralités des antennes et les types d'antennes utilisées dans la 5G.

2 Introduction à la 5G

2.1 Objectifs visés par la 5G

La 5G permet de réaliser une vitesse de transfert de données très importante, qui peut atteindre jusqu'à 10 Gb/s dans le cas des utilisateurs immobiles et jusqu'à 1 Gb/s dans celui des utilisateurs mobiles (par exemple, dans un train), au lieu de 150 Mb/s dans le cas de la 4G. De plus, elle offre une grande connectivité, un fonctionnement en large bande, ainsi qu'une diminution du temps de latence (compris entre 1 et 5 ms) avec une réduction de 90 % de la consommation d'énergie du réseau (figure I.1) [I.3].

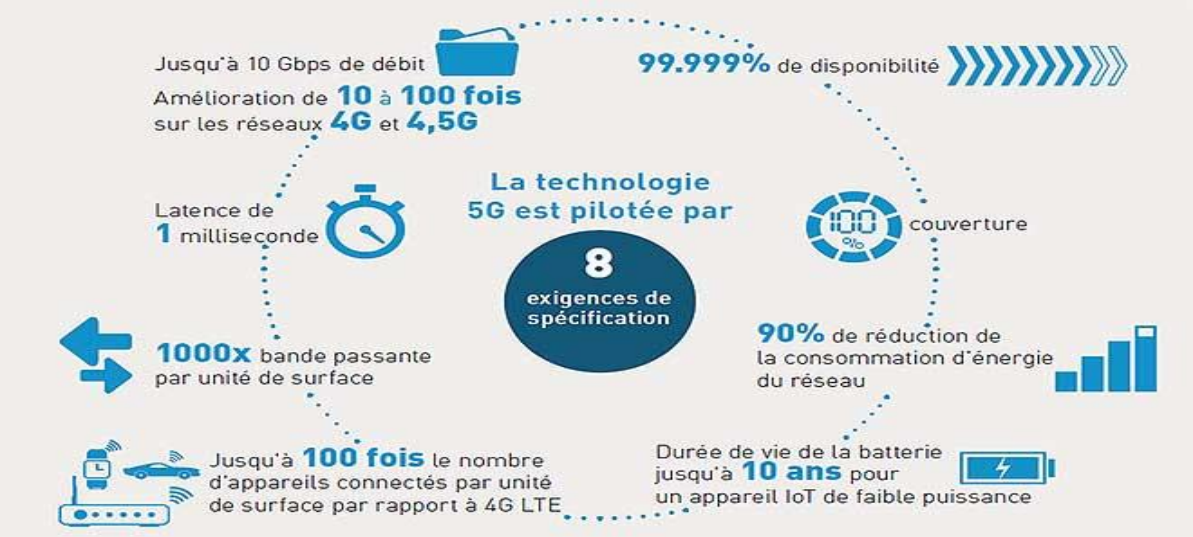


Figure I. 1 : Objectifs visés par la 5G

2.2 Axes de développement de la 5G

Le développement de la 5G s'articule autour de trois axes majeurs : l'amélioration du débit, l'optimisation du temps de réponse, et l'amélioration de la densité [I.3] [I.4] :

- ✓ **Les débits :** La 5G peut offrir une vitesse de téléchargement comprise entre 10 et 20 Gbps, ce qui correspond à un débit multiplié par 100 par rapport à la 4G [I.3] [I.4]. Pour la 5G, la vitesse de téléchargement est la vitesse à laquelle les données sont transmises de votre appareil jusqu'au réseau et à votre point d'arrivée cible (stockage en cloud, par exemple, ou un autre appareil). En outre le stockage en cloud est un service géré pour le stockage de données non structurées. Il permet de stocker n'importe quelle quantité de données et de les récupérer en cas de besoin.
- ✓ **La latence :** La technologie 5G garantit un temps de réponse très faible, à savoir le temps qui s'écoule entre l'envoi et la réception d'une information. Ce délai passe de 200 millisecondes pour la 4G à 1 milliseconde (1 ms) pour la 5G [I.3] [I.4].
- ✓ **La densité :** La densité des appareils de la 5G est particulièrement importante par rapport à son équivalent 4G : la 5G pourra à terme gérer jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par kilomètre carré, soit jusqu'à un million d'appareils [I.3] [I.4].

2.3 Revue de la bande passante de la 5G

2.3.1 Importance de la bande passante

La bande passante est un facteur essentiel pour déterminer les performances et les capacités de tout système de communication sans fil. Elle fait référence à la gamme de fréquences qu'un système peut utiliser pour transmettre et recevoir des données. Plus la bande passante large, plus la quantité de données pouvant être transmis à un moment donné est important, ce qui se traduit par des vitesses de téléchargement et de chargement plus rapides [I.5]. En outre, des bandes passantes plus larges permettent une meilleure prise en charge de divers services et applications, tels que le streaming vidéo haute définition, la réalité virtuelle et l'internet des objets (IoT).

2.3.2 Bandes de fréquence 5G

5G fonctionne dans deux bandes de fréquences principales, connues sous le nom de FR1 et FR2 [I.5]. La FR1 comprend des fréquences inférieures à 6 GHz [I.5], tandis que la FR2 comprend des fréquences d'ondes millimétriques allant de 24 GHz à 100 GHz [I.5]. Le choix de la gamme de fréquences a une incidence considérable sur la couverture, la capacité et les performances du réseau. Les bandes de fréquences basses (FR1) assurent une meilleure couverture et une meilleure pénétration à travers les obstacles, mais offrent une bande passante limitée. En revanche, les bandes de fréquences plus élevées (FR2) offrent des bandes plus larges pour des

débits de données plus élevés, mais leur couverture est limitée et elles sont plus sensibles à l'atténuation du signal.

2.4 Caractéristiques de la 5G

Les éléments essentiels pour comprendre la 5G sont les ondes millimétriques, le MIMO massif (Multiple Input Multiple Output), le full duplex, la formation de faisceau et les petites cellules ne sont que quelques-unes des technologies qui pourraient permettre la mise en place de réseaux 5G ultrarapides [I.6].

2.4.1 Les ondes millimétriques

La fréquence dans laquelle les ondes millimétriques peuvent être propagées peut varier entre 30 et 300 gigahertz, contrairement aux bandes de fréquences inférieures à 6 GHz précédemment exploitées par les appareils mobiles. Ces ondes sont dites millimétriques en raison de leur longueur d'onde qui varie de 1 à 10mm. En revanche, les ondes radio utilisées par les téléphones intelligents actuels présentent des longueurs d'onde de l'ordre de la dizaine de centimètres.

Pour le moment, les ondes millimétriques sont uniquement employées pour des applications réelles dans le cadre de satellites et de radars. Par ailleurs, il existe actuellement des opérateurs cellulaires prêts pour la transmission à distance des données entre deux stations de base, etc. Par contre, la possibilité de connecter des usagers mobiles aux stations de base qui se trouvent dans les environs repose sur une nouvelle démarche.

Les ondes millimétriques présentent toutefois un inconvénient majeur : le passage au travers des bâtiments et des obstacles est plus difficile, elles sont absorbées par les arbres ou par la pluie. Pour cette raison, la technologie 5G est susceptible de venir renforcer le dispositif classique avec une nouvelle technologie, celle des "petites cellules".

2.4.2 Petites cellules

Une petite cellule est un terme générique utilisé pour décrire un point d'accès radio miniature ou une station de base de réseau sans fil avec une puissance de sortie, un encombrement et une portée de radiofréquence (RF) faibles. Les petites cellules améliorent la couverture et la capacité des réseaux cellulaires dans les zones - telles que les centres villes densément peuplés - où les demandes d'utilisation sont les plus élevées [I.6][I.7]. Dans le futur, les petites cellules de cinquième génération (5G) vont lancer une ère d'innovation à grande échelle, avec une

amélioration considérable des performances de pénétration du signal et une couverture supérieure.

La réalisation des performances de la 5G nécessitera une infrastructure encore plus importante, car les réseaux cellulaires traditionnels dépendent de plus en plus de stations de base. Il est avantageux que les antennes des petites cellules soient beaucoup plus petites que les antennes traditionnelles lorsqu'elles transmettent de minuscules ondes millimétriques. Grâce à cette différence de taille, les cellules peuvent être installées sur les poteaux d'éclairage et au sommet des bâtiments sans problème. Les antennes relais du réseau 5G possèdent un nombre bien plus important que les antennes relais des réseaux cellulaires existants, ce qui permet de bénéficier d'une nouvelle technique : "massive MIMO"

2.4.3 MIMO massive

MIMO se traduit par Multiple input, Multiple output (entrées et sorties multiples) et, en premier lieu, permet d'acheminer plusieurs flux sur le même canal de données. Cela se traduit par une augmentation considérable de la capacité de transmission des données, en particulier sur un système qui utilise un nombre particulièrement élevé d'antennes - on passe d'environ quatre antennes pour la 4G à quelque chose de plus proche de 100.

En augmentant la capacité et les performances sans nécessiter plus de spectres, cela sera probablement l'un des principaux moyens par lesquels les réseaux vont se développer. Dans les réseaux MIMO massifs, il est aussi utilisé la formation de faisceaux, une technique pour diriger un signal vers l'appareil utilisé. Cela assure une transmission optimale du signal au mobile et une réception optimale, tout en réduisant les interférences avec les autres appareils. En comparaison, la technologie 4G est actuellement utilisée pour éclairer une grande partie de la région. Néanmoins, cela n'est pas obligatoire si le réseau est suffisamment intelligent.

2.4.4 Formation de faisceaux

Le débit et les densités de connexion requis par la 5G sont fournis par la collaboration entre la formation de faisceaux et le MIMO [I.6][I.7]. La technique MIMO massive (entrées multiples, sorties multiples) utilise des réseaux d'antennes multiples et le multiplexage spatial pour transmettre des signaux de données indépendantes et codées séparément, connus sous le nom de "flux". Grâce à ces signaux, il est possible de communiquer simultanément avec plusieurs équipements d'utilisateurs sur une période de temps donnée et une même bande de fréquence. Outre la technologie formation de faisceaux est utilisée pour concentrer les faisceaux plus

étroitement sur les équipements individuels des utilisateurs, ce qui permet d'augmenter la densité des connexions et de minimiser les interférences entre les faisceaux individuels.

La formation de faisceaux est utilisée avec les systèmes d'antennes réseau à commande de phase pour concentrer le signal sans fil dans une direction choisie, normalement vers un dispositif de réception spécifique. Cela permet d'améliorer le signal au niveau de l'équipement de l'utilisateur (UE) et de réduire les interférences entre les signaux de chaque UE.

Les réseaux d'antennes à phases sont conçus de manière à ce que les diagrammes de rayonnement de chaque élément individuel se combinent de manière constructive avec ceux des éléments voisins pour former un diagramme de rayonnement efficace - le lobe principal - qui transmet l'énergie dans la direction souhaitée. En même temps, le réseau d'antennes est conçu de manière à ce que les signaux envoyés dans des directions non souhaitées interfèrent de manière destructive les uns avec les autres, formant des nuls et des lobes latéraux. Le but du système global du réseau d'antennes est de maximiser l'énergie rayonnée dans le lobe principal tout en maintenant une limite acceptable à l'énergie dans les lobes secondaires. On contrôle la direction du lobe principal, ou faisceau, en utilisant les signaux radio appliqués à tous les éléments d'antenne du réseau.

2.4.5 Duplex intégral

Le duplex intégral est une méthode de communication où les données peuvent être transmises simultanément dans les deux sens à travers un canal de communication [I.6] [I.7]. Autrement dit, il permet une communication bidirectionnelle simultanée, les données circulent de manière indépendante dans les deux sens. Contrairement au semi-duplex, où les données ne peuvent être transmises que dans une seule direction à la fois (comme dans un talkie-walkie), le full-duplex permet une communication simultanée, comme dans une conversation téléphonique. Cette compétence est particulièrement utile dans les cas où une communication interactive en temps réel est requise.

Diverses technologies et protocoles, tels qu'Ethernet, les systèmes de téléphonie et les réseaux sans fil, peuvent être utilisés pour réaliser la communication en duplex intégral. Pour éviter toute interférence entre les deux flux, elle utilise des canaux ou des fréquences distinctes pour la transmission et la réception des données. Lorsqu'une connexion Ethernet full duplex est utilisée, les voies de transmission (Tx) et de réception (Rx) sont séparées par des fils ou des brins de fibre distincts.

Le duplex intégral présente également l'inconvénient de créer plus d'interférences de signal en raison d'un écho gênant. Quand un émetteur transmet un signal, il est beaucoup plus proche de l'antenne de l'appareil et donc plus puissant que n'importe quel signal reçu. Il est impossible d'empêcher une antenne de parler et d'écouter simultanément en utilisant une technique spéciale d'annulation de l'écho.

Grâce à ces techniques et à d'autres technologies 5G, les ingénieurs espèrent construire le réseau sans fil sur lequel les futurs utilisateurs de smartphones, les joueurs de réalité virtuelle et les voitures autonomes s'appuieront tous les jours. La 5G a suscité d'énormes espoirs parmi les chercheurs et les entreprises, car elle garantit une latence ultra-faible et des vitesses de données record pour les consommateurs. En résolvant les problèmes restants et en trouvant comment mettre en place tous ces systèmes ensemble, le service 5G ultrarapide pourrait être disponible pour les consommateurs dans les cinq prochaines années.

2.5 Applications visées pour les réseaux 5G

La technique 5G, qui ouvre la nouvelle révolution dans le domaine des télécommunications, permettra également aux futurs fournisseurs et opérateurs de télécommunications de répondre à la demande croissante de leurs clients. En effet, la technique 5G opère véritablement au niveau des réseaux de téléphonie mobile, mais aussi dans d'autres secteurs tels que la santé, les médias, l'industrie, les transports et, bien sûr, l'internet des objets (IoT) (figure I.2) [I.6]. Selon les prévisions de Cisco [I.6], la connectivité mondiale devrait atteindre plus de 50 milliards d'appareils d'ici 2025. De plus, on prévoit une augmentation de 10 à 100 fois du trafic de données mobiles entre 2020 et 2030 [I.6].

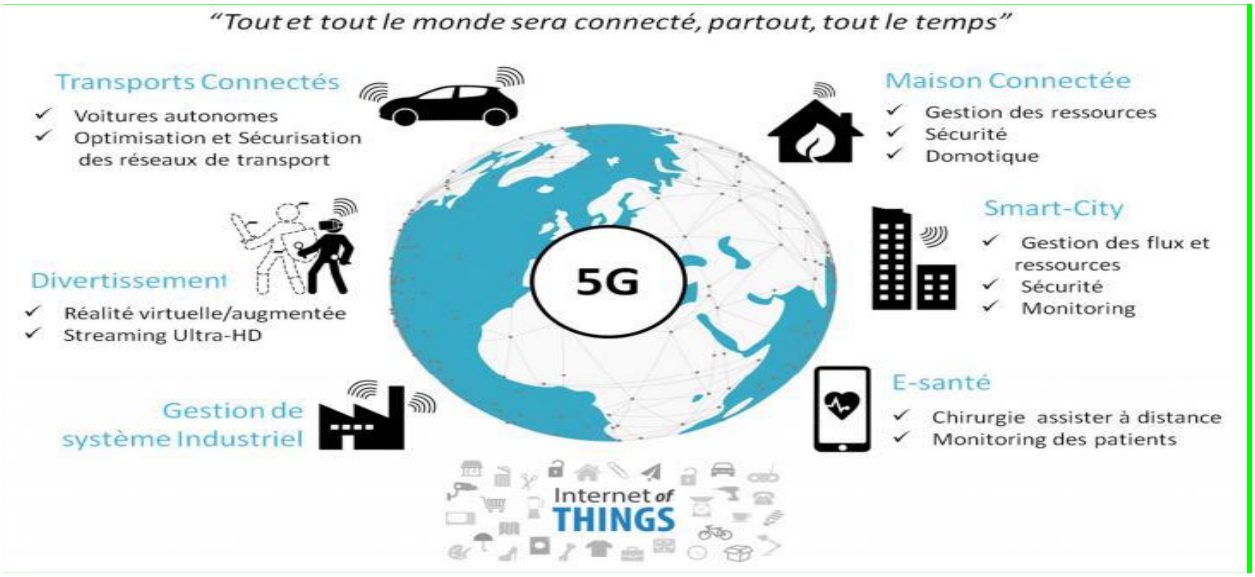


Figure I. 2: Exemples d'applications visées pour les réseaux 5G

2.6 L’évolution de la 5G

La technologie 6G sera mise à jour et élargie sur la base de la visualisation et de l'expansion de la 5G pour atteindre jusqu'à 100 fois le débit de données, une plus grande capacité du système, une latence réduite, une plus grande efficacité du spectre et une couverture plus large et plus profonde. Pour permettre des mouvements plus rapides, pour servir l'internet de tout (IoE), et pour promouvoir complètement l'évolution de la vie intelligente et la société mobile intelligente omniprésente dans l'industrie [I.8]. La figure I.3 résume les principales étapes du réseau sans fil 6G en termes de technologie, d'applications et d'indicateurs clés de performance (ICPs) [I.8].

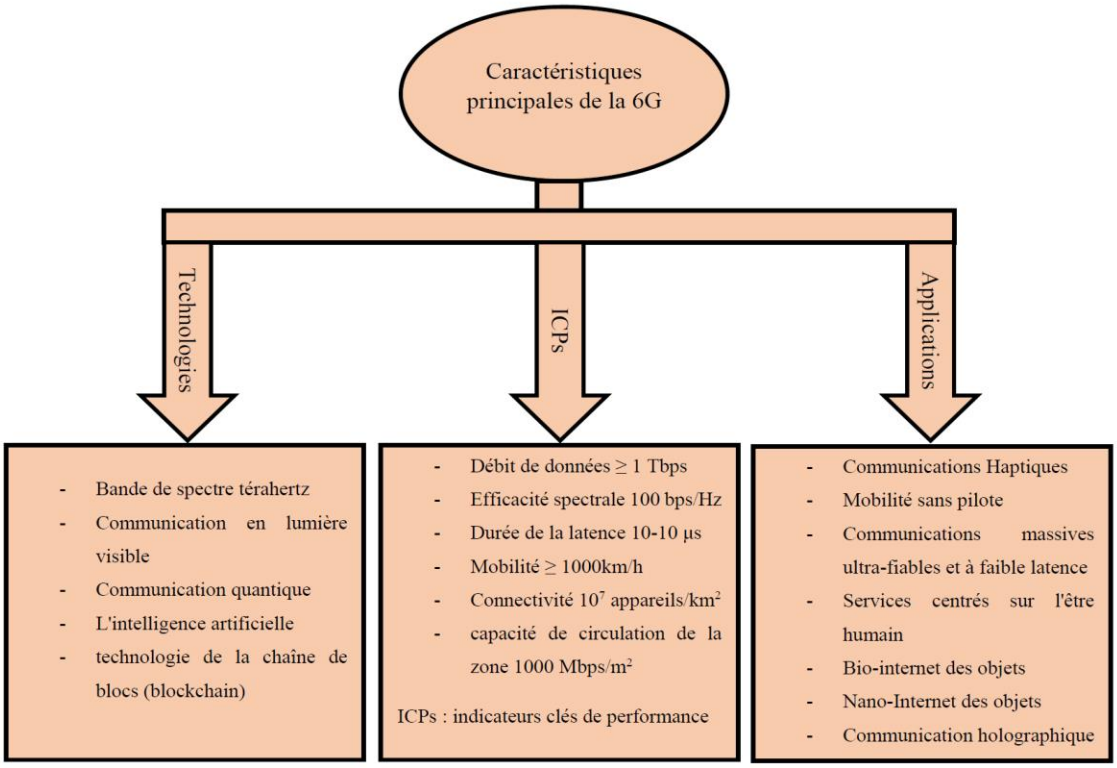


Figure I. 3: Principales étapes de la 6G

Dans les paragraphes ci-dessous, nous allons exposer les exigences prévisionnelles relatives aux visions nécessaires à la technologie 6G :

- ✓ La 6G devrait être un réseau complet avec une couverture de plus en plus large, comprenant des communications terrestres, par satellite et d'appareil à appareil sur de courtes distances. Grâce à des technologies de gestion mobile sophistiquées, la 6G peut desservir un large éventail de situations, y compris l'espace aérien, terrestre et maritime, ce qui aboutira au premier système de communications mobiles à large bande omniprésentes au monde [I.7].

- ✓ Pour obtenir une bande passante plus large, la 6G devrait fonctionner à des fréquences plus élevées, telles que les ondes millimétriques, les térahertz et la lumière visible. Par rapport à la 5G, les débits de données peuvent être multipliés par cent dans la 6G, ce qui permet d'atteindre le débit le plus élevé de Tb/s et un débit de 10 Gb/s pour l'expérience de l'utilisateur. En outre, la 6G peut tirer parti de technologies flexibles de partage des fréquences pour améliorer encore l'efficacité de la réutilisation des fréquences [I.8].
- ✓ La 6G est un réseau intelligent qui peut être personnalisé. Combinée à la technologie de l'intelligence artificielle, la 6G permettra la virtualisation de la communication mobile [I.9], faisant passer le réseau d'un type de réseau centralisé classique à un nouveau type de réseau centralisé, centré sur l'utilisateur, centré sur les données et dont le contenu est entièrement centralisé.
- ✓ Une solution de sécurité endogène ou une conception de sécurité fonctionnelle intégrée sera utilisée dans le réseau 6G [I.9]. Cette technologie se caractérise par l'auto-perception, l'analyse dynamique en temps réel, l'adaptation aux risques et l'évaluation de la confiance. Elle contribuera également à la sécurité du cyberespace en introduisant des mécanismes de confiance et de sécurité.
- ✓ L'informatique, la navigation et la détection sont toutes combinées dans la 6G. Ainsi, elle comprendra, par exemple, des systèmes de communication par satellite, des systèmes de positionnement et de navigation par satellite et des systèmes de détection radar. Elle utilisera une architecture plus ouverte, avec un réseau central utilisant des algorithmes définis par logiciel et un réseau d'accès sans fil ; elle sera en mesure de réaliser un développement intelligent autonome rapide ainsi qu'un déploiement rapide et dynamique des capacités du réseau.
- ✓ La 6G peut être intégrée à de nouvelles technologies telles que l'informatique de pointe, l'informatique en nuage, l'intelligence artificielle et la blockchain [I.10]. De plus elle peut actualiser les intelligences multiples ainsi que l'intelligence de groupe. Ainsi, la 6G peut enfin soutenir la société mobile intelligente omniprésente.
- ✓ La communication 6G permet d'accéder à diverses formes de données par le biais de réseaux de communication non conventionnels et de les envoyer sur des réseaux de radiofréquences traditionnels et améliorés, ce qui donne lieu à une nouvelle expérience de communication de présence et d'implication virtuelles à tout moment et depuis n'importe quel endroit. Les appels holographiques (la communication holographique permet de capturer en temps réel et de manière détaillée les émotions et les expressions

humaines, transmises sur le réseau actuel), la conduite à distance et l'internet tactile font partie des scénarios de communication futurs prévus pour 2030 [I.11]. En outre, les futures communications sans fil devraient offrir le même niveau de fiabilité que les communications traditionnelles. Toutefois, les communications Téra hertz (THz), l'intelligence artificielle (IA) et les surfaces intelligentes reconfigurables sont les plus prometteuses de tous les efforts techniques liés à la 6G [I.12].

Nous étudierons plus particulièrement les bandes de fréquences de 60 GHz dans le chapitre 3, ainsi que la technologie térahertz (THz) dans le chapitre 4. Par ailleurs, nous avons également proposé des antennes et des réseaux d'antennes pour ces bandes de fréquences.

3 Antennes pour la 5G

3.1 Généralités sur les antennes

3.1.1 Définition

Une antenne est définie comme un dispositif métallique (comme une tige ou un fil) pour émettre ou recevoir des ondes radio, nous avons donc une antenne émettrice et une antenne réceptrice. En d'autres termes, l'antenne est le dispositif de transition entre l'espace libre et une ligne de transmission (ligne coaxiale ou guide d'ondes) [I.13].

3.1.2 Histoire d’une antenne

Les antennes constituent notre lien avec l'espace libre et sont un élément essentiel de notre civilisation. Elles sont utilisées depuis des centaines d'années, mais au cours du siècle dernier, une grande révolution a été observée, notamment en ce qui concerne le lien entre le système radio et le monde extérieur. Le mérite de l'évolution de l'antenne revient à James Clark Maxwell qui a combiné les théories de l'électricité et du magnétisme et a inventé les équations de Maxwell les plus populaires en 1873, qui constituent l'épine dorsale de la théorie des antennes [I.14]. Il a également prédit que les ondes électromagnétiques et les ondes lumineuses se déplaçaient par des perturbations de même vitesse. Le premier concept satisfaisant d'une antenne a été conçu par le physicien allemand Heinrich Rudolph Hertz en 1886 alors qu'il travaillait dans son laboratoire à l'Institut technique de Kalssuhe [I.15]. Il est également connu comme le père de l'électromagnétisme. Il a également donné son nom aux unités SI de fréquence, c'est-à-dire Hertz. Il a prouvé expérimentalement que les perturbations électriques peuvent être détectées par le circuit secondaire en allumant ou en éteignant l'étincelle à une longueur d'onde de 4 mètres. Sa contribution à la recherche dans ce domaine peut être jugée à

partir de cet aspect : une boucle dipolaire demi-onde chargée en bout est également connue sous le nom de dipôle hertizien. Le scientifique indien J. C. Bose (1858-1937) a mené des recherches sur les ondes millimétriques à 60 GHz et a mis au point une nouvelle antenne appelée antenne à cornet en 1897. Bien que ces grandes inventions aient été réalisées par Hertz, elles n'ont pas été utilisées dans la vie réelle jusqu'à ce que Guglielmo Marconi (1874-1973), un scientifique italien, ajoute des circuits d'accord pour améliorer la couverture de l'antenne [I.16]. En 1901, il a effectué des transmissions de signaux depuis Poldu, au Royaume-Uni, jusqu'à St. Johns, à Terre-Neuve, au Canada, et a partagé le prix Nobel de physique avec Karl Fedinand Brain pour leur contribution au développement de la télégraphie sans fil. Il a utilisé une antenne unipolaire d'un quart de longueur d'onde pour réaliser l'expérience, c'est pourquoi une antenne unipolaire verticale est également connue sous le nom d'antenne Marconi [I.17].

La Seconde Guerre mondiale est une preuve éclatante de la révolution d'une nouvelle ère dans le domaine des antennes. C'est au cours de cette guerre que la technologie radar a vu le jour, car il était urgent de frapper les navires, les sous-marins ou les avions de l'ennemi à distance, même la nuit. Les scientifiques anglais et américains ont mené des recherches approfondies dans ce domaine, qui ont abouti au développement rapide d'antennes radar à grande portée, telles que les antennes à ouverture, les antennes à réflecteur, les antennes à cornet, etc. La recherche a été poursuivie par de nombreux scientifiques pour développer différents types d'antennes, comme celles à polarisation circulaire, à large bande et bien d'autres encore, pour des applications dans des domaines aussi variés que Wi-MAX (World Wide interoperability of μ-wave access), WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth, Wi-Fi (Wireless Fidelity), Communication par satellite, communication point à point à haut débit, GPS (Global Positioning System), communication mobile, communication par micro-ondes, communication infrarouge, GPRS (Global Packet Radio System), MANET (Mobile Ad-hoc Network), VANET (Vehicle Ad-hoc Network), UWB (Ultra Wideband), WSN, etc. [I.18] , [I.19], [I.20]. Différentes applications sans fil nécessitent différentes antennes pour la communication, et il est donc toujours nécessaire de concevoir une antenne optimale pour les applications existantes ou émergentes. L'antenne est un élément essentiel du système de communication. Un système de communication sans fil ne peut être conçu sans une configuration adéquate de l'antenne. L'antenne gagne donc en popularité jour après jour. Il ne s'agit plus d'un dispositif de rayonnement ou de réception, mais d'un dispositif qui peut être intégré au système pour atteindre des performances optimales, par exemple l'antenne MIMO (Multiple Input Multiple Output) est utilisée pour améliorer la capacité du canal de transmission.

3.1.3 Caractéristiques d’une antenne

Dans cette partie, nous allons présenter en détail des caractéristiques des antennes qui permettent le dimensionnement de systèmes d’émission réception. Elles sont essentiellement associées au rayonnement dans l'espace. Le rôle essentiel d'une antenne consiste à émettre ou à recevoir des signaux sur des grandes distances. Ici, nous nous concentrerons donc uniquement sur les caractéristiques électriques et les du rayonnement électromagnétique en champ lointain.

3.1.3.1 Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques d'une antenne sont utilisées pour déterminer le circuit d'adaptation approprié et l'interconnexion nécessaire pour connecter une antenne à un émetteur/récepteur. Pour les types d'antennes plus complexes, les caractéristiques électriques d'une antenne sont également utilisées pour concevoir les algorithmes et les circuits RF utilisés pour piloter l'antenne.

a. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est un rapport entre la tension d'entrée complexe (source) et le courant au port de l'antenne. Dans le cas de nombreuses conceptions d'antennes, l'impédance brute de l'antenne n'est pas adaptée aux impédances des lignes de transmission courantes, telles que les lignes de transmission coaxiales de 50 ohms ou 75 ohms ou les interconnexions de guides d'ondes. Un circuit d'adaptation est donc utilisé pour transformer l'impédance innée d'une antenne en impédance de la ligne de transmission, du guide d'ondes ou directement du frontal de l'émetteur/récepteur. L'adaptation de l'impédance d'une antenne à l'impédance d'un port souhaité est mesurée par le biais du rapport d'ondes stationnaires (ROS) et du coefficient de réflexion S_{11}. D’autre par l'impédance d'entrée de l'antenne est essentiellement l'impédance présentée à ses bornes. Elle est définie comme le rapport entre la tension et le courant aux deux bornes d'entrée de l'antenne. Elle est divisée en deux parties : une partie réelle R_A et une partie imaginaire X_A [I.21]. En général, l'impédance de l'antenne est déterminée par la formule I-1, ainsi elle est présentée en fonction de la fréquence comme illustré la figure I.4.

$$Z_A = R_A + jX_A \tag{I-1}$$

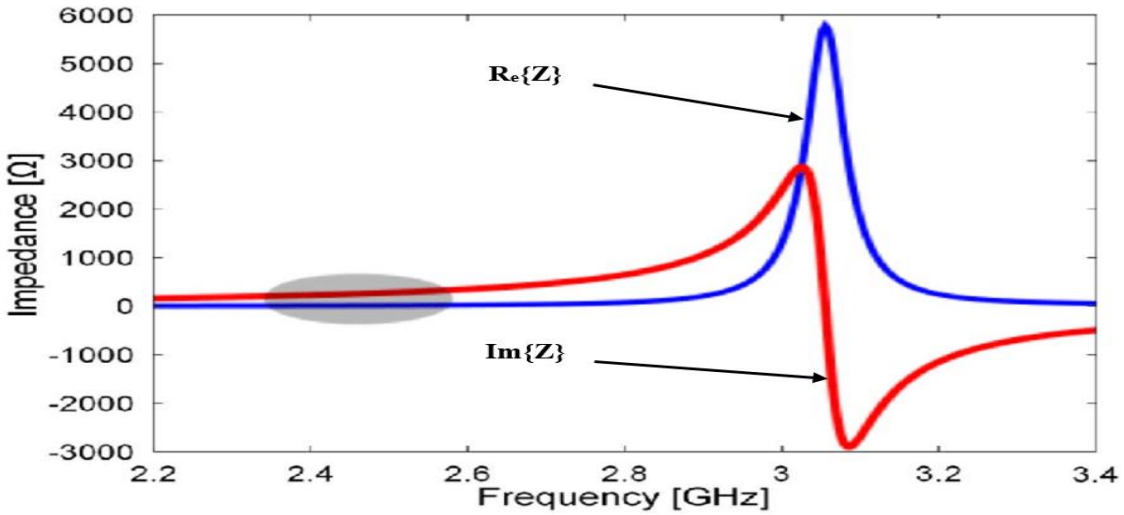


Figure I. 4: Courbe représentative d'une Impédance d'entrée $\boldsymbol{Z}_A$

Le terme R_A désigne la résistance d'entrée et sa représentation est la dissipation. Cette résistance se compose de deux parties, l'une liée aux champs rayonnés et appelée résistance de rayonnement R_r, et l'autre liée aux pertes par effet joule et appelée résistance de perte Rp. Pour déterminer cette résistance, il faut appliquer la formule I-2 comme suit :

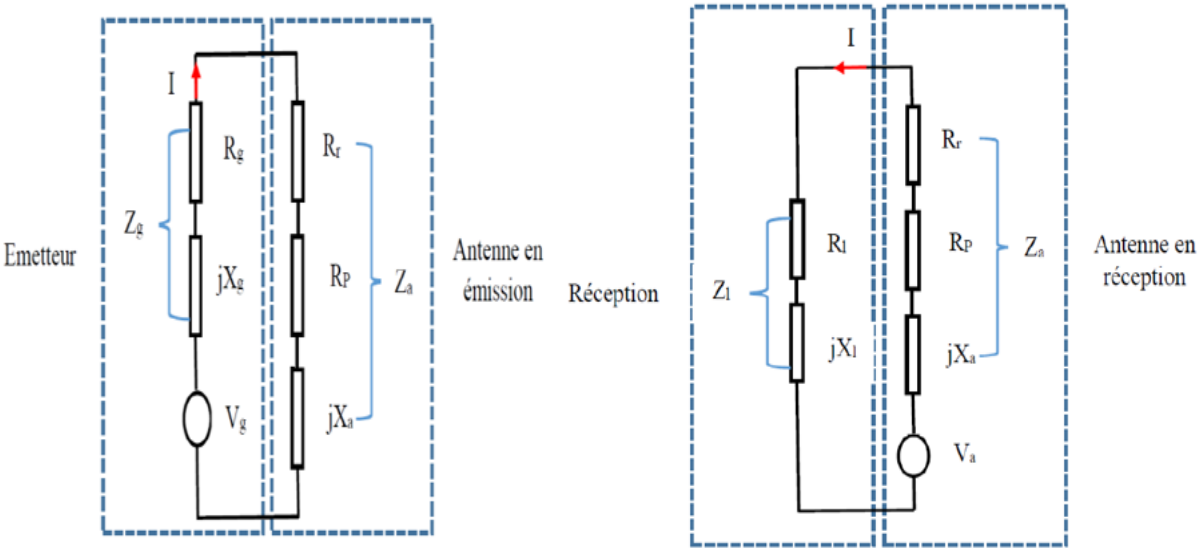
$$R_A = R_r + R_p \tag{I-2}$$

Le terme X_A désigne la réactance qui est produite par l'induction des champs fournis à côté d'une antenne. Cette réactance joue deux rôles possibles selon deux conditions essentielles comme suit : si $X_A>0$ alors X_A est une inductive, sinon si $X_A<0$ alors X_A est une capacitive. Cette réactance est exprimée par la formule I-3 :

$$X_A = \begin{cases} X_L = 2\pi Lf \\ X_C = \dfrac{-1}{2\pi fC} \end{cases} \tag{I-3}$$

avec : La réactance Inductive X_L est exprimée dans le système international des unités de mesure en ohms (Ω), de même que la réactance capacitive X_C qui est exprimée en ohm (Ω), également la fréquence f s'exprime en Hz, ainsi que l'inductance L dont l'unité est H(henry), et la capacité C qui est exprimée en F (Farad).

La figure I.5 illustre schématiquement le montage et le fonctionnement électrique simplifié de l'antenne reliée aux circuits électriques, lors des opérations concernant les émissions ou les réceptions.



(a) En émission (b) En réception

Figure I. 5: Schéma équivalent d'une antenne

b. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est une mesure du rapport entre la puissance d'un signal transmis qui est réfléchi par un port et la puissance totale du signal moins ce qui est perdu par rayonnement. En outre, une autre caractéristique importante de la réflexion S_{11} d'une antenne est l'évaluation quantitative des signaux réfléchis par rapport aux signaux incidents ; ce coefficient de réflexion est le rapport entre la puissance réfléchie (P_r) et la puissance fournie de l'émetteur à l'antenne P_f [I.22] :

$$|S_{11}| = \sqrt{\frac{P_r}{P_f}} \tag{I-4}$$

En termes d'impédance caractéristique par rapport à l'impédance de charge, le coefficient de réflexion est déterminé mathématiquement à l'aide de l'équation suivante :

$$S_{11} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{I-5}$$

Où S_{11} est le coefficient de réflexion, Z_L est l'impédance de charge et Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission ou du guide d'ondes. Pour un transfert d'énergie maximal, il est souhaitable d'avoir un coefficient de réflexion aussi proche de zéro que possible.

c. Rapport d'ondes stationnaires (ROS)

Le rapport d'ondes stationnaires (ROS) est une mesure de l'efficacité avec laquelle la puissance radiofréquence est transmise d'une source d'énergie à une charge, en passant par une ligne de transmission (par exemple, d'un amplificateur de puissance à une antenne, en passant par une ligne de transmission) [I.23].

Dans un système idéal, 100 % de l'énergie est transmise. Il est indispensable que l'impédance de la source, l'impédance caractéristique de la ligne de transmission et de ses connecteurs, ainsi que l'impédance de la charge soient parfaitement accordées. La tension alternative du signal ne variera pas le long de la ligne, car elle est transmise sans subir d'interférences.

Dans les systèmes réels, les impédances mal adaptées provoquent la réflexion d'une partie de la puissance vers la source (comme un écho). Les réflexions provoquent des interférences destructives, entraînant des pics et des creux dans la tension à différents moments et à différentes distances le long de la ligne.

Le ROS mesure ces variations de tension. Il s'agit du rapport entre la tension la plus élevée à n'importe quel endroit de la ligne de transmission et la tension la plus basse. Comme la tension ne varie pas dans un système idéal, son ROS est de 1. La valeur de ce rapport est comprise entre 1 et 2. Pour une transmission et une réception optimales, une antenne idéale a un ROS de 1. La formule I-6 permet de calculer ce rapport comme suit :

$$ROS = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} \tag{I-6}$$

Où V_{max} est la tension maximale du signal le long de la ligne, et V_{min} est la tension minimale le long de la ligne.

Elle peut également être dérivée des impédances :

$$ROS = \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \tag{I-7}$$

Où γ (gamma) est le coefficient de réflexion de la tension près de la charge, dérivé de l'impédance de la charge (Z_L) et de l'impédance de la source (Z_0) :

$$\gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{I-8}$$

Si la charge et la ligne de transmission sont adaptées, γ= 0 et le ROS = 1.

d. La bande passante

La bande passante d'une antenne est un concept important. Elle désigne le domaine des fréquences sur lesquelles une antenne est capable de satisfaire une spécification particulière en termes de caractéristiques [I.24]. Ces paramètres sont en général le gain, le diagramme de rayonnement, le ROS, etc. Généralement, le ROS est le paramètre principal utilisé pour déterminer la bande passante, et celle-ci est appelée "bande passante d'impédance". La bande des fréquences inférieure et supérieure conforme au ROS souhaitée permet de déterminer les fréquences auxquelles répond l'antenne selon la spécification du ROS.

La bande passante est la plage des fréquences comprise entre les fréquences supérieures et inférieures sur lesquelles un signal est transmis comme le montre la figure I.6. Lorsqu'elle est attribuée, la bande passante ne peut pas être réutilisée. En effet, l'ensemble du spectre est divisé en bandes passantes qui sont attribuées à différents émetteurs. Cette bande passante que nous venons d'évoquer peut également être appelée bande passante absolue.

En règle générale, Le pourcentage de la largeur de la bande passante dépend de l'étendue de la bande de fréquence absolue ainsi que de sa fréquence de résonance, autrement dit de sa fréquence centrale [I.24]. Dans cette bande de fréquence, il y a une intensité maximale du signal, comme indiqué à la figure I.6. Ainsi, il est possible de calculer le pourcentage de la largeur de bande à l'aide de la relation I-9.

- ✓ Les termes "$\mathbf{f_H}$" et "$\mathbf{f_L}$" désignent les fréquences respectivement les plus élevées ainsi que les plus basses de la bande passante absolue $\mathbf{\Delta f = f_H - f_L}$, et le terme $\mathbf{f_C}$: Fréquence centrale. De plus le terme **PBP** : Le pourcentage de la bande passante.
- ✓ Pour connaître l'étendue de la bande passante, il faut calculer la bande passante fractionnelle ou la bande passante en pourcentage.

Ce pourcentage permet de connaître le niveau du changement de fréquences que peut prendre en charge à la fois un élément principal ou un système. Plus le pourcentage de largeur de bande est élevé, plus la largeur de bande du canal est importante.

$$PBP = \frac{\Delta f}{f_C} \times 100 = \frac{f_H - f_L}{f_C} \times 100 \qquad \text{(I-9)}$$

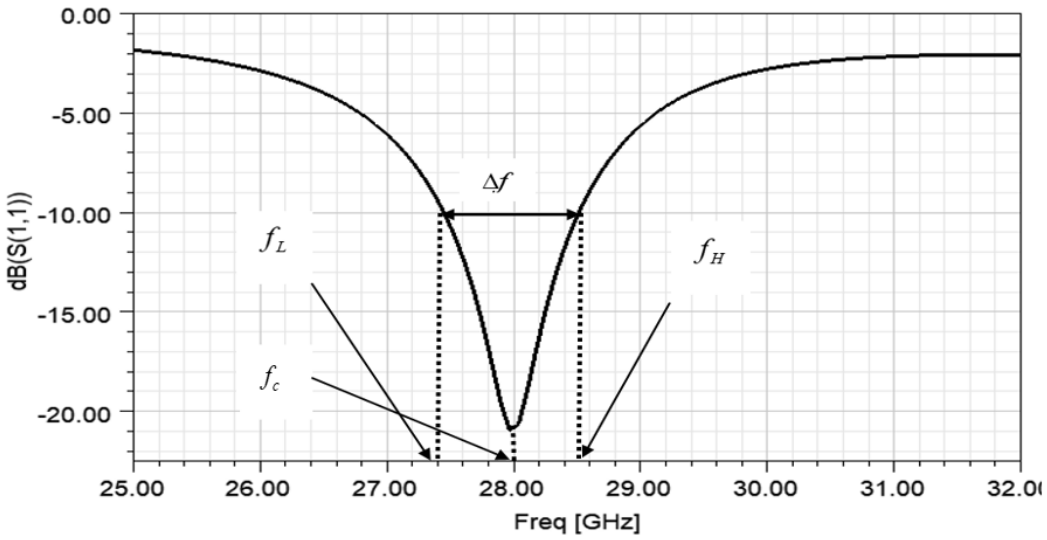


Figure I. 6 : Coefficient de réflexion d'une antenne en fonction de la fréquence

e. Couplage et isolation mutuels des éléments d'antenne

Le couplage mutuel est défini comme l'interaction des champs électromagnétiques entre les éléments de l'antenne. Il modifie le diagramme de rayonnement, les tensions de l'élément reçu et les caractéristiques d'adaptation de l'élément d'antenne. Ce couplage mutuel peut être minimisé en utilisant des réseaux de découplage [I.25]. Ces réseaux sont utilisés pour superposer les perturbations sur les lignes d'alimentation, de communication, de contrôle ou autres lignes similaires connectées au port d'un équipement sous test (EST), tout en s'assurant que les perturbations ne sont appliquées qu'à l'EST et non aux sources d'alimentation ou à l'équipement auxiliaire (EA). Ils découplent les ports d'entrée des éléments adjacents en fournissant un couplage négatif qui annule le couplage entre les antennes adjacentes. Les éléments forfaitaires ainsi que les éléments distribués ont été utilisés avec succès pour réduire le couplage et améliorer ainsi l'isolation entre les antennes adjacentes. Dans [I.26], les réseaux de découplage construits à l'aide d'éléments groupés ne fonctionneront pas pour les fréquences inférieures à 700 MHz, car la ligne de transmission devient plus longue pour un réseau de découplage et, par conséquent, les éléments groupés sont réalisés à l'aide de coupleurs hybrides qui résolvent le problème d'espace [I.27]. Les réseaux de découplage (RD) ont été fréquemment utilisés en raison de leur efficacité spatiale. Bien que les réseaux de découplage conventionnels présentent également l'inconvénient d'une bande passante étroite, une large bande passante est obtenue dans les réseaux de découplage à l'aide de circuits résonnants parallèles, ce qui convient aux espaces restreints tels que les appareils mobiles.

Dans le cas de réseaux d'antennes, des antennes multimodes ou des antennes multi polarisées, il y aura un certain couplage électrique et magnétique entre les antennes ou les ports. L'isolation

entre les éléments est une mesure de l'intensité du signal dans un élément donné et de l'intensité de ce signal couplé à un autre élément. L'isolation est généralement indiquée dans le scénario le plus défavorable, mais elle doit souvent être caractérisée afin de mettre en œuvre des algorithmes à entrées et sorties multiples (MIMO) ou de formation de faisceaux.

3.1.3.2 Caractéristiques de rayonnement

Lorsque des électrons produits par un signal variant dans le temps et comportant suffisamment de composantes à haute fréquence traversent un conducteur non blindé, il en résulte la création d'une onde électromagnétique, ou rayonnement d'antenne. On appelle champ lointain d'une antenne la distance spécifique à laquelle les champs électriques et magnétiques du diagramme de rayonnement électromagnétique de l'antenne sont parfaitement orthogonaux. Les paramètres d'une antenne sont généralement mesurés dans le champ lointain. Le comportement du rayonnement d'une antenne est décrit par plusieurs paramètres clés, qui sont le diagramme de rayonnement, l'angle d'ouverture, la directivité, le gain, l'efficacité et la polarisation.

a. Fonction caractéristique de rayonnement

La figure 1.7 montre l'emplacement de l'antenne dans le cadre de référence sphérique. Nous observons le rayonnement en un point M, localisé et situé au niveau des champs lointains d'antennes. Cette situation permet de constater que le champ électromagnétique peut être comparé au niveau localisé à celui de l'onde plane. Dans ce cas, tous les vecteurs $(\vec{E},\vec{H},\vec{k})$ doivent être perpendiculaires entre eux. Ainsi, dans le cas d'un champ électrique ou magnétique, celui-ci est contenu dans un plan perpendiculaire au vecteur de propagation.

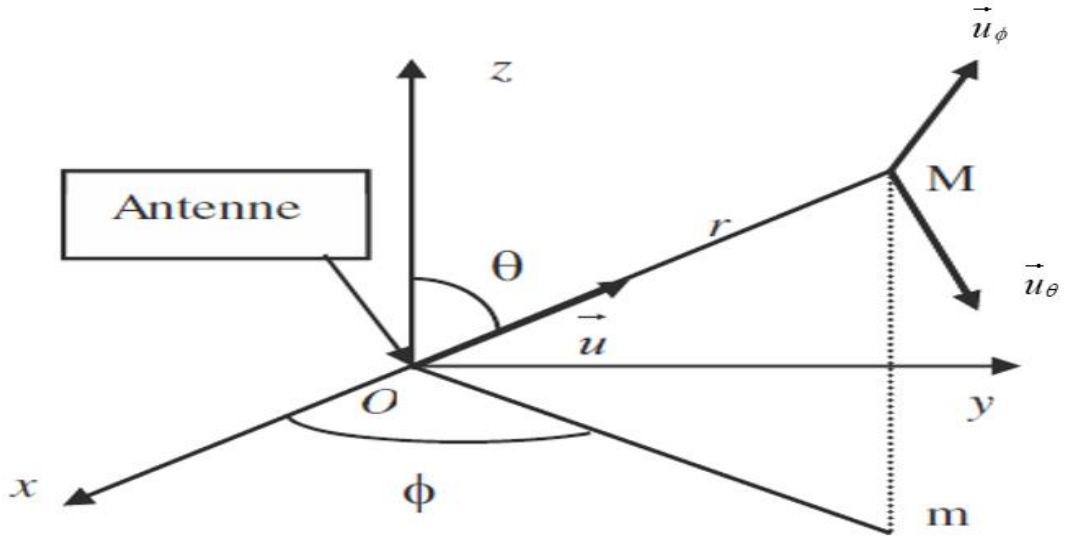


Figure I. 7 : Systèmes de coordonnées pour l'analyse de l'antenne

- La détermination du champ électrique se fait à l'aide de la formule I-10 :

$$\vec{E} = E_\theta \vec{u_\theta} + E_\varphi \vec{u_\varphi} \tag{I-10}$$

- On peut déduire le champ magnétique en utilisant la formule suivante :

$$\vec{H} = \frac{1}{Z}(\vec{u} \wedge \vec{E}) \tag{I-11}$$

Avec l'impédance du vide :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377\Omega \tag{I-12}$$

- La densité de puissance surfacique est définie par la formule (I-13), qui dépend du champ électrique [I.28]. Elle est la caractéristique essentielle qui permet aux chercheurs de comprendre le fonctionnement du rayonnement électromagnétique d'une antenne.

$$S_r = \frac{1}{2Z}(|E_\theta|^2 + |E_\varphi|^2) \tag{I-13}$$

- Le champ électromagnétique résultant de l'antenne possède une composante variable en fonction de la distance, qui résulte de ce que la radiation au point "M" représente un cumul des ondes sphériques issues au niveau de la source élémentaire de l'antenne. Par conséquent, la forme des composants de ce champ électrique se présente comme suit :

$$E_\theta = \frac{e^{-jkr}}{r} f_1(\theta,\varphi) \quad \text{et} \quad E_\phi = \frac{e^{-jkr}}{r} f_2(\theta,\varphi) \tag{I-14}$$

- En application de ces formules, on peut exprimer la densité surfacique de puissance par la formule :

$$S_r = \frac{1}{2Zr^2}(|f_1(\theta,\phi)|^2 + |f_2(\theta,\phi)|^2) \tag{I-15}$$

- A partir de cette formule, on peut dissocier le phénomène lié à la variation angulaire de celui lié à la variation radiale. Ainsi, celle-ci, exprimée sous la forme de la variation inverse au carré à la distance, qui est un paramètre identique pour tous les types d'antennes, donne l'atténuation associée à la dilatation d'une onde sphérique. Dans le cas de la variation angulaire, elle est spécifique à un type d'antenne. Dans ce qui suit, nous allons concentrer notre attention sur cette variation angulaire. De plus, il existe également une autre caractéristique du rayonnement, appelée la fonction caractéristique du rayonnement, qui est déterminée par la formule I-16 :

$$F(\theta,\phi) = \frac{1}{2Z}\left(\left|f_1(\theta,\phi)\right|^2 + \left|f_2(\theta,\phi)\right|^2\right) \quad \text{(I-16)}$$

- Elle ne comprend que des variables angulaires. On définit cette fonction caractéristique du rayonnement normalisé par la formule I-17 :

$$F_n(\theta,\phi) = \frac{F(\theta,\phi)}{F_{\max}(\theta,\phi)} \quad \text{(I-17)}$$

- La formule I-18 permet de calculer cette fonction caractéristique en fonction de la puissance surfacique :

$$F_n(\theta,\phi) = \frac{S_r(\theta,\phi)}{S_{\max}(\theta,\phi)} \quad \text{(I-18)}$$

- On peut exprimer la fonction normalisée sous forme linéaire et sous forme logarithmique. Elle est souvent plus élevée et provient du rapport de deux puissances. De plus, grâce à l'échelle logarithmique en décibels (dB), il est plus facile d'apprécier les variations sur différentes échelles.

b. Champ proche et champ lointain

Les paramètres de rayonnement d'une antenne sont tous donnés pour le champ lointain. Cependant, à quelques longueurs d'onde de l'antenne, le comportement du rayonnement électromagnétique autour de l'antenne est très différent. Le champ proche est composé de deux régions, la région non radiative (réactive) et la région radiative (Fresnel). Dans la région réactive, l'intensité des champs électriques et magnétiques diminue selon la loi de l'inverse du cube avec la distance, alors que dans la région radiative, elle diminue selon la loi de l'inverse du carré avec la distance. Par conséquent, le champ proche diminue beaucoup plus rapidement que le champ lointain et n'est pertinent que pour les systèmes d'antennes avec des objets à proximité de l'antenne [I.29].

Il est important de connaître la dynamique du champ proche, car l'absorption du rayonnement dans le champ proche modifie le comportement de l'antenne tel qu'il est perçu par le matériel d'émission et de réception. En outre, les interactions entre une antenne et d'autres objets dans le champ proche peuvent entraîner une distorsion du rayonnement dans le champ lointain et des effets indésirables.

Dans le cas général, on appelle le champ situé à distance par rapport aux antennes, appelé "champ lointain". On le désigne aussi sous le terme de "champ de rayonnement", en raison des effets élevés de ce dernier dans cette région. On considère généralement les critères

liés à l'antenne, comme la directivité ainsi que le diagramme de rayonnement, qu'à l'intérieur de cette région.

c. Diagramme de champ

Le diagramme du champ désigne la répartition possible et quantifiable des champs électromagnétiques selon leur intensité. Plus précisément, le rayonnement électromagnétique généré par une antenne peut être exprimé en fonction de son champ électrique, E (V/m). Cela explique que la configuration se nomme "diagramme de champ". Si elle est mesurée sous forme de puissance (W), on parle ici également du diagramme de puissance.

Le diagramme représentant les caractéristiques des champs ou des puissances rayonnées dépend des différents éléments que sont les deux angles spatiaux (θ, Ø) qui caractérisent les champs lointains. Ainsi que des angles spatiaux (θ, Ø) et la distance radiale (r) en ce qui concernent le champ proche. On peut comprendre facilement comment sont répartis le champ proche ou le champ lointain grâce au diagramme de rayonnement comme le montre la figure I.8.

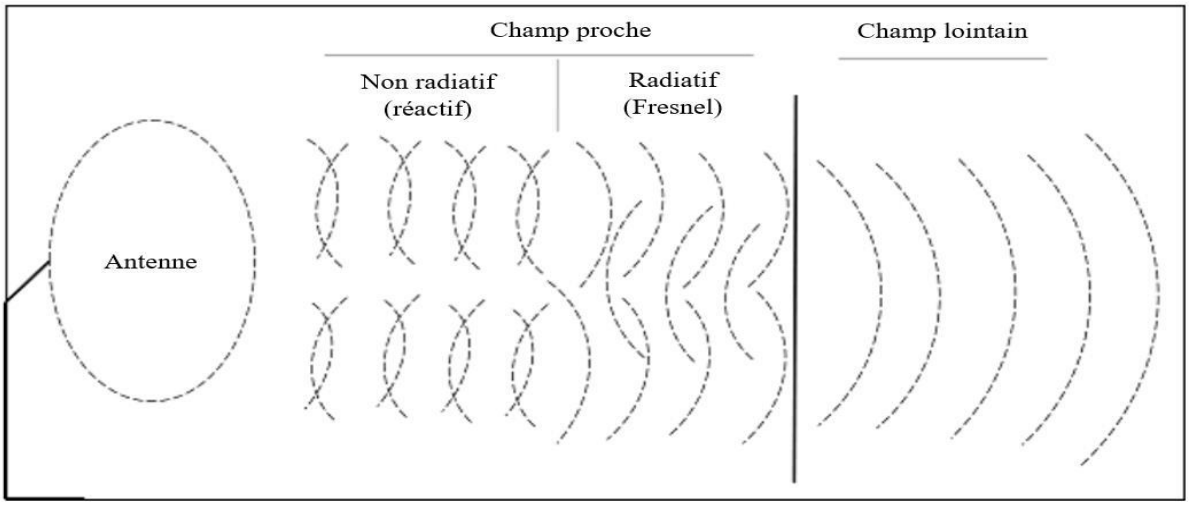


Figure I. 8 : Schéma de champ lointain

Les champs peuvent être classés en deux catégories : les champs réactifs et les champs rayonnants :

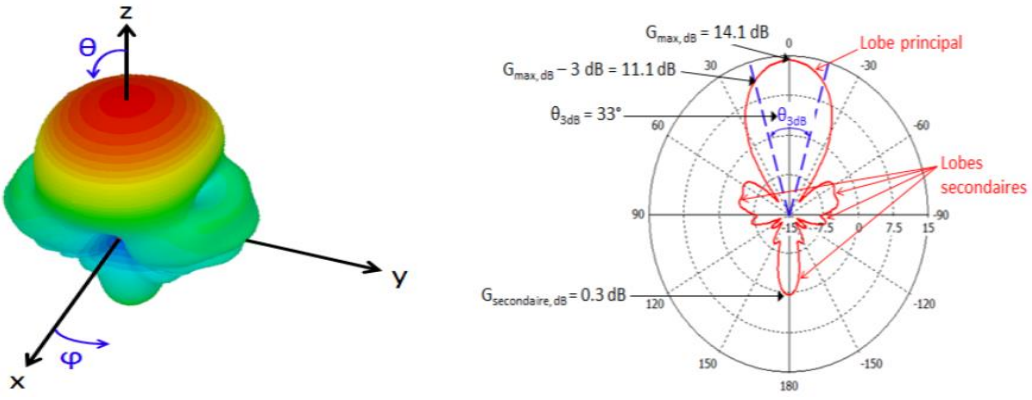
- ✓ La zone réactive dite "champ proche" ainsi que la zone rayonnante dite "champ proche" désignent ensemble ce que l'on appelle le "champ proche".
- ✓ le champ lointain de rayonnement peut être simplement désigné sous le nom de champ lointain.

La région située le plus près possible des antennes correspond au champ réactif proche ou champ non-radiatif, dans lequel les radiations restent faibles. On peut qualifier la zone la plus proche comme un champ rapproché de rayonnement du fait que celui-ci joue un rôle important et que sa répartition angulaire est liée à sa distance géographique vis-à-vis de l'antenne.

La zone adjacente correspond au champ lointain rayonnant. Ici, la répartition des champs varie indépendamment des distances de l'antenne. Dans cette région, on peut observer un diagramme de rayonnement efficace.

d. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la représentation graphique de sa fonction caractéristique. Le sens maximal du rayonnement se nomme l'axe du rayonnement d'une antenne. Cette fonction permet d'obtenir les caractéristiques de rayonnement dans l'espace. Pour cela, il est usuel que le diagramme de rayonnement soit représenté selon deux plans orthogonaux : ce sont les plans E et H. Dans le cas du plan E, cela signifie que le champ électrique et l'axe de l'antenne se trouvent dans le même plan. En revanche, dans le plan H, on trouve l'axe de l'antenne et le champ magnétique. En outre d'autre façon le diagramme de rayonnement de l'antenne montre la distribution de l'énergie rayonnée par l'antenne dans l'espace. Plus simplement, le diagramme de rayonnement est un tracé qui correspond aux propriétés de rayonnement de l'antenne en coordonnées spatiales (c'est-à-dire en ce qui concerne l'angle et la distance). Il s'agit d'une manière graphique de présenter le rayonnement de l'antenne en fonction de la direction et il est également connu sous le nom de diagramme d'intensité de champ. La figure I.9 représente les diagrammes de rayonnement en 3D et en 2D (gain en dB).



(a) (b)

Figure I. 9 : (a) Diagrammes de rayonnement en 3D et (b) diagrammes de rayonnement en 2D (gain en dB)

e. Angle d'ouverture

L'ouverture à 3 dB, θ_{3dB}, ou ouverture à mi- puissance : c'est la plage angulaire définie sur un diagramme en 2D dans laquelle le gain (ou la directivité) vaut $G_{dB} \geq G_{max,dB} - 3$ (ou $G = G_{max}/2$ si on ne travaille pas en dB) comme le montre la figure I.10(b) . En général, plus θ_{3dB} est faible, plus le gain maximal est important, mais plus le pointage devrait faire appel à des techniques élaborées !

f. Directivité

La directivité d'une antenne est la mesure de la plus grande quantité de puissance rayonnée dans une direction divisée par la puissance moyenne d'une antenne rayonnée dans toutes les directions. Ainsi, une antenne à forte directivité aura un diagramme de rayonnement très puissant dans une seule direction, alors qu'une antenne à faible directivité aura de plus grandes quantités d'énergie de faisceau en dehors du lobe principal. L'enveloppe d'une antenne peut également être décrite en termes d'ouverture de faisceau à demi-puissance, également connue sous le nom d'ouverture de faisceau à 3 dB. L'ouverture de faisceau à 3 dB est la largeur angulaire du diagramme de rayonnement entre les deux points situés à 3 dB en dessous du faisceau de crête.

La directivité D (θ,φ) d'un antenne dans une direction spécifique est le rapport entre la densité de puissance rayonnée Sr(θ,φ) par l'antenne dans cette direction et sa valeur moyenne sur tout l'espace [I.30] :

$$D(\theta,\varphi) = \frac{S_r(\theta,\varphi)}{\frac{1}{4\pi}\iint S_r(\theta,\varphi)d\Omega} \qquad \text{(I-19)}$$

g. Gain d'antenne

Le gain d'antenne indique la concentration de la puissance rayonnée dans une direction particulière par rapport à une antenne théorique appelée radiateur isotrope. Cette dernière rayonne uniformément dans toutes les directions. De plus, le gain décrit la directivité du diagramme de rayonnement d'une antenne. Il est mesuré en décibels (dB) et des valeurs de gain plus élevées indiquent une direction de signal plus ciblée. Lorsque le gain est élevé, l'intensité du signal est concentrée dans une direction spécifique, ce qui améliore la portée et les performances de l'antenne. Comment faire la différence entre le gain et la directivité ? Généralement, le gain d'une antenne est confondu avec la directivité, qui fait également référence aux propriétés directionnelles de l'antenne. Toutefois, le gain tient compte de l'efficacité électrique de l'antenne, ce qui n'est pas le cas de la directivité. Une antenne peut

avoir une directivité élevée, ce qui indique un rayonnement énergétique très concentré, mais elle peut avoir des pertes qui réduisent la puissance totale transmise. Le gain tient compte à la fois de la directivité et de ces pertes.

Le choix du bon gain d'antenne permet d'optimiser un système sans fil en dirigeant davantage d'énergie du signal vers le récepteur. L'installation d'antennes à gain élevé permet d'améliorer la qualité du signal grâce à un transfert plus efficace de l'énergie. Il est possible d'obtenir une plus grande portée, moins de zones mortes et des débits de données plus rapides. En utilisant des antennes à gain élevé pour propager et recevoir les signaux, on obtient une meilleure performance globale du système sans fil.

Le gain d'antenne est mesuré en décibels (dB), une unité logarithmique qui décrit le rapport entre deux valeurs de puissance. L'échelle des décibels permet de comparer facilement une large gamme de valeurs de gain. En tant que rapport, les valeurs de gain en dB peuvent être positives, négatives ou nulles. Un gain positif indique une amplification ou un renforcement de la puissance du signal par l'antenne.

Deux unités sont utilisées pour quantifier le gain d'une antenne : dBi et dBd. dBi se réfère au gain par rapport au gain d'une antenne isotrope, qui rayonne uniformément vers l'extérieur et sert de référence dans l'industrie. Une antenne isotrope rayonne uniformément vers l'extérieur, ce qui constitue le point de référence dans l'industrie. Le dB mesure le gain par rapport à une simple antenne dipôle standard qui rayonne uniformément le long d'un plan. Une antenne de 5 dB signifie que son gain est supérieur de 5 dB à celui d'une antenne isotrope, tandis que 5 dB indiquent que son gain est supérieur de 5 dB à celui d'un dipôle.

Les facteurs influençant le gain de l'antenne :

- Qualité des matériaux et de la construction

Les matériaux utilisés pour les éléments de l'antenne influencent le gain car ils ont une incidence sur la conductivité électrique et l'efficacité du signal. Le cuivre, l'aluminium et le laiton sont couramment utilisés. La qualité de la construction, en termes de précision des formes et de l'espacement, améliore également le gain.

- Forme et conception de l'antenne

La forme physique de l'antenne génère des propriétés directionnelles. Les antennes paraboliques, Yagi et log-périodiques offrent un gain élevé en dirigeant la propagation le

long de l'axe long de l'antenne. La conception tient également compte de la fréquence de fonctionnement, du type de polarisation et de l'adaptation de l'impédance.

- Considérations relatives à la gamme de fréquences et la bande passante

Une antenne est réglée pour émettre efficacement des signaux à l'intérieur d'une bande particulière de fréquences de fonctionnement. En dehors de cette bande, le gain diminue car l'antenne ne peut pas transmettre l'énergie de manière optimale. L'adaptation de la largeur de bande de l'antenne à son utilisation garantit un bon gain.

- Facteurs environnementaux affectant le gain

Les objets situés sur le trajet entre l'émetteur et le récepteur réduisent le gain de l'antenne. La pluie, la neige et les conditions atmosphériques entraînent des pertes. Les interférences des signaux voisins peuvent également réduire le gain. Le positionnement de l'installation minimise les impacts environnementaux.

On définit un gain (θ,φ) attribué par une antenne selon une certaine trajectoire donnée en fonction notamment que la densité de puissance rayonnée Sr (θ, φ) obtenue grâce à l'antenne selon cette trajectoire par rapport à la densité de puissance rayonnée Sri obtenue par une antenne isotrope. Pour cela, la formule I-20 est appliquée [I.30] :

$$G(\theta,\varphi) = \frac{S_r(\theta,\varphi)}{S_{ri}} \qquad \text{(I-20)}$$

h. Efficacité de l'antenne

En règle générale, l'efficacité d'une antenne correspond au regroupement de ses puissances à ses ports. Ce regroupement correspond plus précisément à la relation existant entre la puissance rayonnée par l'antenne ainsi que la puissance d'entrée acceptée par celle-ci. De toute évidence, en principe, la puissance rayonnée par une antenne à son entrée, sans beaucoup des pertes. En effet, le degré de performance indique précisément la capacité relative de l'antenne à fournir de manière performante son énergie, grâce à une réduction significative du taux des pertes au niveau des lignes de transmission. On appelle cela le facteur lié au rendement en matière de radiation propre de l'antenne.

L'antenne a une caractéristique très importante qui est l'efficience ou le rendement. Cette caractéristique assure que la puissance transmis à l'antenne P_t peut être transformée en une

puissance rayonnée P_r, dont le symbole s'exprime par η. On utilise la formule I-21 afin de calculer cette caractéristique [I.30].

$$\eta = \frac{P_r}{P_t} \tag{I-21}$$

$$\text{Avec } P_r = \iint r^2 S_r(\theta,\varphi) d\Omega \text{ et } P_t = 4\pi r^2 S_{ri} \tag{I-22}$$

On peut également déterminer le rendement d'une antenne à partir de la relation existant au niveau de la directivité et de son gain. Pour ce faire, on peut utiliser la formule I-23 :

$$\eta = \frac{D(\theta,\varphi)}{G(\theta,\varphi)} \tag{I-23}$$

i. Polarisation d'antenne

L'orientation de l'antenne est liée au rayonnement ou à la réception d'une onde dans une direction spécifique par cette antenne. Toutefois, lorsque la direction n'est pas précisée, la polarisation de l'antenne est définie dans la direction où son gain est le plus élevé. Il est à noter que la polarisation de l'antenne est influencée par la distance par rapport à son centre. Il est possible que chaque partie de l'antenne ait une polarisation distincte. Nous connaissons le fait qu'une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Dans la propagation d'une onde, le vecteur électrique et le vecteur magnétique sont situés à angle droit par rapport à la direction de l'onde [I.31][I.32].

Sur la figure I.10, on peut observer la représentation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre, qui inclut les composantes du champ électrique et magnétique :

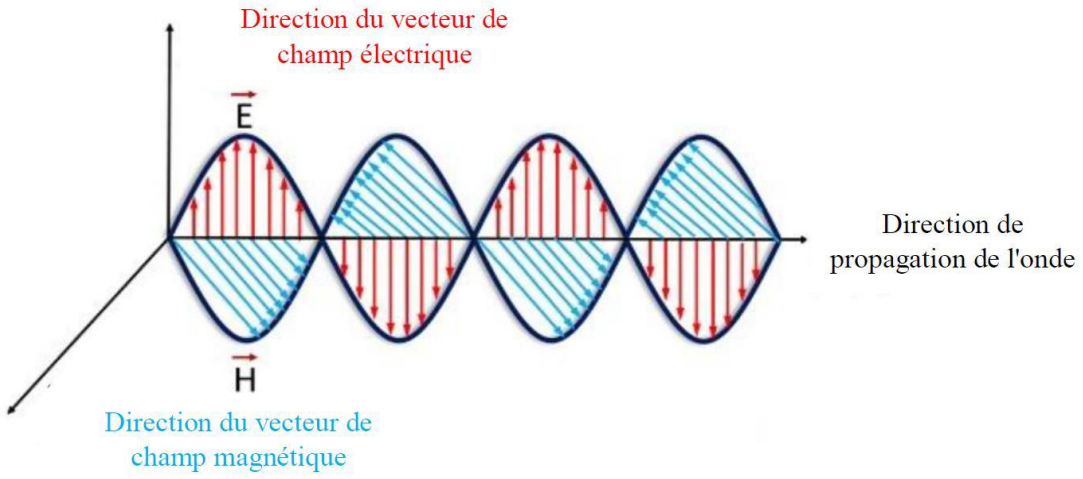


Figure I. 10 : Représentation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre

Il convient de noter ici que la direction de l'antenne et sa polarisation sont similaires. Pour cette raison, une antenne verticale émet des ondes polarisées verticalement, tandis qu'une antenne horizontale émet des ondes polarisées horizontalement. Ceci peut être compris à partir de la figure I.10. On voit clairement que le vecteur de champ électrique est vertical et que les ondes sont donc polarisées verticalement. En d'autres termes, si le vecteur de champ électrique est présent dans le plan vertical au-dessus de la surface de la terre, on parle de polarisation verticale. De même, lorsque le vecteur de champ électrique se trouve dans le plan horizontal, on parle d'ondes polarisées horizontalement. Par conséquent, la polarisation est la propriété caractéristique de l'antenne conçue pour émettre des ondes à polarisation linéaire. Donc, nous pouvons dire que l'orientation physique de l'antenne dans l'espace donne une idée de base de la polarisation des ondes. Cela signifie que le type de polarisation est le facteur de conception de l'antenne. Voyons maintenant les différentes classifications de la polarisation des antennes. D'une manière générale, la polarisation de l'antenne est classée comme le montre la figure I.11 :

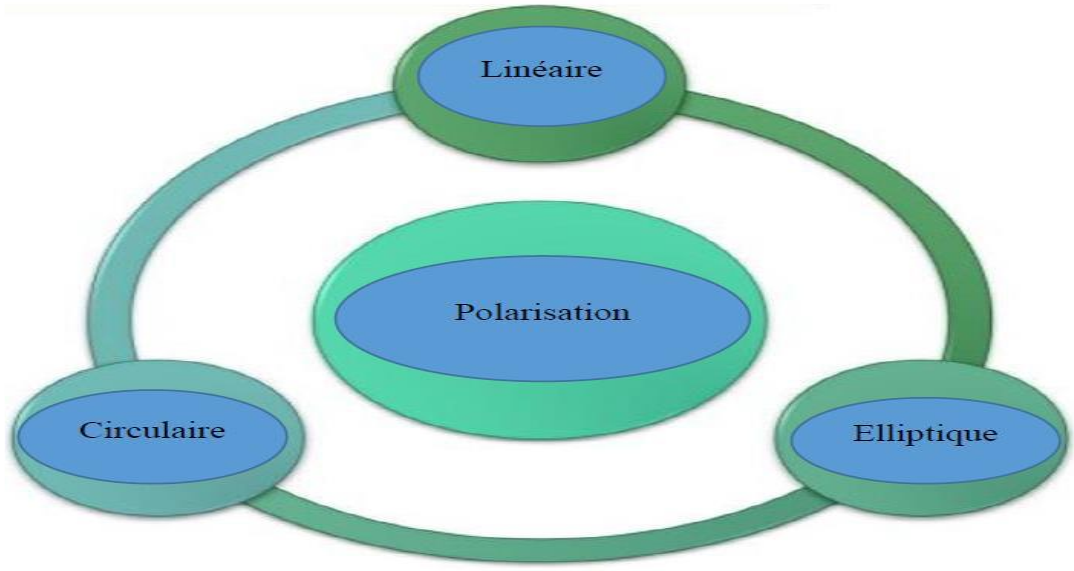


Figure I. 11 : Type de polarisation

- ✓ **Polarisation linéaire :**

Un type de polarisation dans lequel toutes les ondes possèdent un alignement similaire dans l'espace, soit vertical, soit horizontal, est connu sous le nom de polarisation linéaire. Nous avons déjà discuté des ondes électromagnétiques polarisées verticalement et horizontalement dans la section précédente. Ces deux types de polarisation sont considérés comme une polarisation linéaire.

Une antenne qui émet des ondes polarisées verticalement ou horizontalement est appelée antenne à polarisation linéaire. Ce type de polarisation est principalement utilisé par les antennes employées dans la propagation d'ondes spatiales.

- ✓ **Polarisation circulaire :**

Les antennes conçues pour rayonner horizontalement, verticalement et dans tous les plans intermédiaires sont appelées antennes à polarisation circulaire.

La question se pose maintenant de savoir comment les ondes à polarisation circulaire sont produites.

Lorsque deux ondes à polarisation linéaire d'amplitudes égales sont produites par une seule antenne dans la même direction et mutuellement perpendiculaires l'une par rapport à l'autre, des ondes à polarisation circulaire sont produites. Cela signifie que les deux ondes polarisées linéairement doivent présenter une différence de phase de 90°. En outre, selon le format de rotation, la polarisation circulaire peut être droite ou gauche. Cela dépend de la polarité de la différence de phase. La polarisation circulaire convient aux applications VHF, UHF et micro-ondes. Par exemple : dans les applications radar pour réduire les échos parasites, dans les satellites artificiels, etc. L'efficacité maximale entre les antennes émettrices et réceptrices est obtenue lorsque les deux antennes présentent une polarisation circulaire.

- ✓ **Polarisation elliptique**

Les ondes à polarisation elliptique sont à nouveau générées à partir de deux ondes à polarisation linéaire, comme les ondes à polarisation circulaire. Dans le cas des ondes à polarisation circulaire, nous avons récemment expliqué que l'amplitude des deux ondes à polarisation linéaire doit être spécifiquement égale. Mais lorsque deux ondes polarisées linéairement d'amplitudes inégales et mutuellement perpendiculaires l'une à l'autre sont combinées, on obtient une onde polarisée elliptiquement. Il convient de noter ici que le rapport axial (**RA**) joue un rôle crucial dans la détermination du type de polarisation. Il s'agit du rapport entre le champ dans un plan vertical et le champ dans un plan horizontal. Il est abrégé en **RA** et sa valeur est généralement comprise entre 1 et ∞. Pour une antenne à polarisation circulaire, il est compris entre 0 et 2. Cependant, pour une valeur supérieure à 2, la polarisation est considérée comme elliptique et il est infini pour une polarisation linéaire.

Généralement, le concept de la polarisation se caractérise de manière elliptique. En ce qui le concerne, on distingue deux cas particuliers : celui de la polarisation linéaire ou celui de la polarisation circulaire. Pour déterminer quel genre de la polarisation, nous devons déterminer

le rapport axial ***RA***. Celui-ci correspond aux rapports entre l'axe secondaire et l'axe principal de l'ellipse de polarisation (figure I.12). Son expression se fait par la formule suivante :

$$RA = \frac{\left\|\vec{E}_{\min}\right\|}{\left\|\vec{E}_{\max}\right\|} \qquad \text{(I-24)}$$

Avec $\overrightarrow{E_{\max}}$ et $\overrightarrow{E_{\min}}$ représentent le champ électrique maximal ainsi que le champ électrique minimal Orthogonal, tous deux respectivement.

Si $0<RA<1$ ($\| \overrightarrow{E_{\max}} \| \neq \| \overrightarrow{E_{\min}} \|$) alors le vecteur de champ électrique $\overrightarrow{E}$ décrit une ellipse, d'où la polarisation obtenue est une polarisation elliptique. Ainsi quand $RA=1$ ($\| \overrightarrow{E_{\max}} \| = \| \overrightarrow{E_{\min}} \|$), alors le vecteur de champ $\overrightarrow{E}$ décrit un cercle, d'où la polarisation obtenue est une polarisation circulaire. Quand $RA=0$ ($\| \overrightarrow{E_{\min}} \|=0$)) alors le vecteur de champ électrique $\overrightarrow{E}$ est orienté dans la même direction, d'où la polarisation obtenue est une polarisation linéaire.

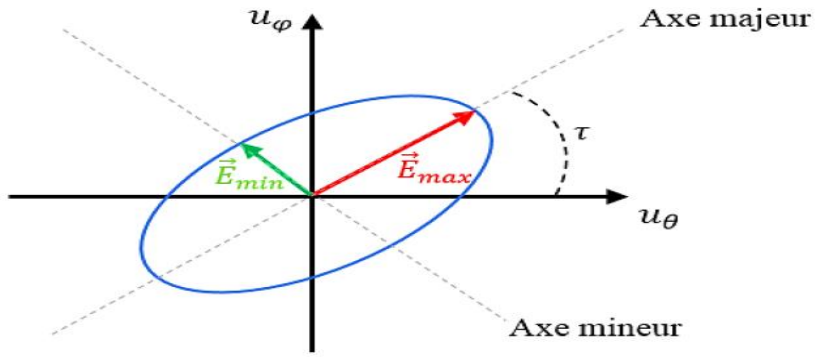


Figure I. 12: Représentation de la polarisation elliptique dans une direction (***θ***, φ)

3.2 Type d'antenne utilisé dans la 5G

3.2.1 Classification des antennes 5G

Ces dernières années, de nombreuses conceptions d'antennes 5G ont été proposées en utilisant différentes techniques d'amélioration des performances. Dans ce chapitre, nous avons classé ces conceptions en fonction des ports d'entrée-sortie et des types d'antennes.

a. Classification basée sur les ports d'entrée et de sortie

Nous avons constaté que la façon la plus simple de classer les antennes est de se baser sur les ports entrée-sortie, comme le montre la figure I.13. L'antenne peut être classée de manière générale comme suit :

- ✓ **Single Input Single Output (SISO)** Certains chercheurs ont mis en œuvre l'antenne **SISO** qui est une antenne à un ou plusieurs éléments pour les applications 5G. L'antenne **SISO** est facile à concevoir et à mettre en œuvre. De plus, elle peut être facilement intégrée dans les dispositifs de communication 5G. Pour obtenir un gain élevé, la taille d'une antenne à un seul élément est plus importante [I.33]. Dans les bandes de fréquences supérieures à 6 GHz, les signaux subissent des pertes de propagation plus importantes et la qualité de service se dégrade.
- ✓ La communication sans fil à entrées et sorties multiples (MIMO) est sujette aux interférences, à l'évanouissement par trajets multiples et aux pertes par rayonnement [I.33]. En outre, ce phénomène s'aggrave à des fréquences plus élevées. Pour surmonter ces problèmes, l'utilisation d'antennes à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) devient très importante car elle améliore la portée de la transmission sans augmenter la puissance du signal. Ainsi, la conception MIMO peut être utilisée pour obtenir une faible latence, un débit maximal et une grande efficacité. Dans la conception MIMO, davantage de signaux peuvent être lancés de manière intelligente en utilisant plusieurs antennes, ce qui améliore considérablement la capacité du canal.
- ✓ La méthode utilisée pour réduire le nombre d'antennes en MIMO consiste à utiliser des antennes multibandes qui assurent la couverture de différentes applications sans fil [I.34][I.35]. En outre, les antennes MIMO peuvent être classées, en fonction de leur bande de fréquence, en antennes à large bande et antennes multibandes. Les antennes à large bande et multibandes peuvent également être classées en antennes multiéléments avec un bord métallique et en antennes multiéléments sans bord métallique. L'antenne à bord métallique offre une excellente résistance mécanique ainsi qu'un aspect esthétique aux téléphones mobiles.
- ✓ En outre, dans les dispositifs compacts, pour atteindre un taux de transmission plus élevé, l'antenne MIMO avec une isolation améliorée est préférée [I.36]. Différents types de techniques d'amélioration sont utilisés dans diverses structures d'antennes pour augmenter le gain, améliorer l'isolation (couplage mutuel), la bande passante, le coefficient de corrélation de l'enveloppe (ECC) et l'efficacité. L'interaction électromagnétique entre les éléments d'antenne dans le MIMO est appelée couplage mutuel (MC). Dans ce processus, l'énergie est absorbée par le récepteur d'une antenne lorsqu'une autre antenne émet de l'énergie. Il est donc essentiel de réduire le couplage mutuel entre les éléments d'antenne dans le système MIMO.

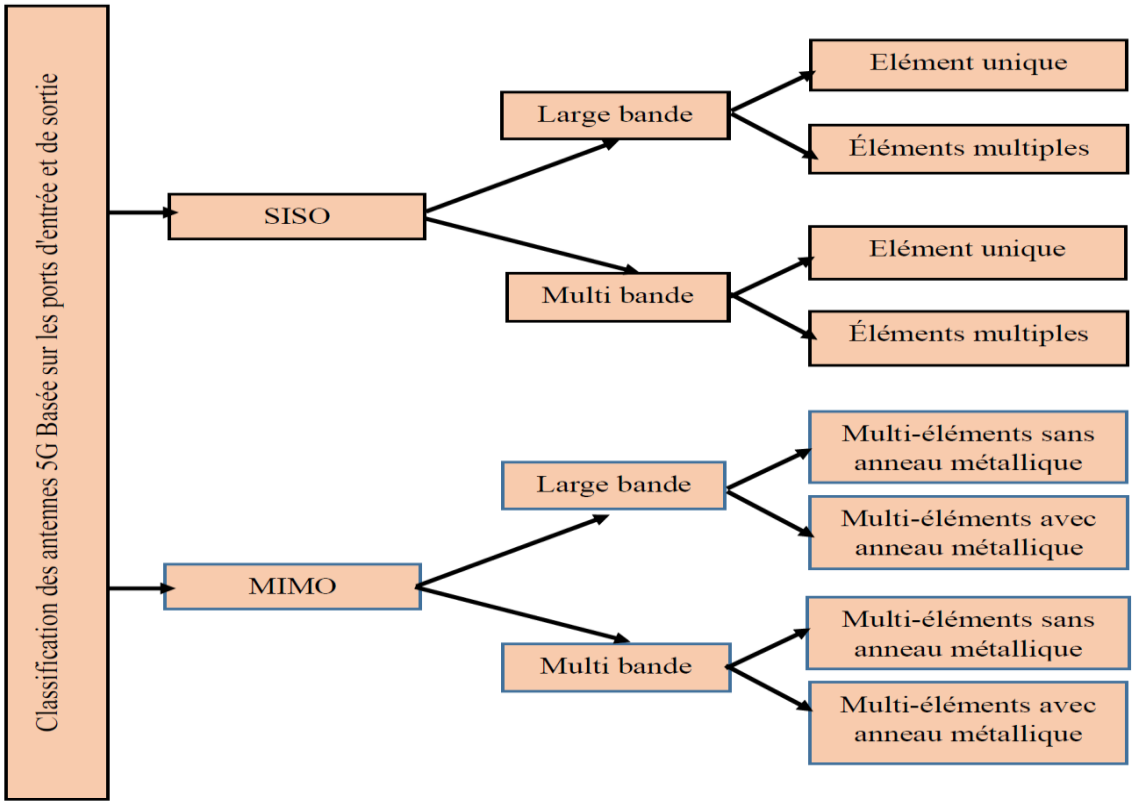


Figure I. 13: Classification des antennes 5G en fonction des ports d'entrée et de sortie

b. Classification basée sur les types d'antennes

Une autre méthode importante de classification peut être basée sur les types d'antennes, comme le montre la figure I.14. D'après la littérature, les différents types d'antennes adaptés aux applications 5G sont les suivants :

- **Antenne monopole :** elle se compose d'une ligne linéaire microruban dont la longueur est égale à λ/4, où λ est la longueur d'onde de la fréquence de fonctionnement résonnante de l'antenne. Comme on peut le voir dans la littérature, plusieurs modifications ont été proposées qui changent la structure de base en de nouvelles formes telles que conique, spirale et autres selon les applications et les exigences [I.37][38].
- **Antenne dipôle :** elle se compose de deux lignes rectilignes microruban qui ont chacune des longueurs de λ/4 et qui sont alimentées entre les deux lignes microruban; ainsi, la longueur totale de l'antenne dipôle est de λ/2 [I.39].
- **Antenne dipôle magnéto-électrique (ME)** : cette antenne est constituée par un dipôle électrique plan de même que le dipôle magnétique plan en court-circuit de façon verticale. Le dipôle magnétique est alimenté par la face inférieure du substrat [I.40].

- **Antenne en boucle :** elle se compose tout simplement par un anneau de forme circulaire, rectangulaire, carrée ou de toute autre forme. Cette antenne possède un rayon inférieur à la longueur d'onde [I.41].
- **Antenne Vivaldi antipodale (AVA) :** elle se compose de deux conducteurs situés de part et d'autre du substrat et qui sont des images miroir l'un de l'autre. Le conducteur en haut agit comme un radiateur tandis que le conducteur en bas agit comme un plan de masse [I.42]. Ces antennes sont généralement fabriquées à partir d'une feuille de métal solide, comme de minces feuilles de cuivre, d'un circuit imprimé ou d'une plaque diélectrique métallisée sur une ou deux faces. Dans le cas d'une antenne Vivaldi à double polarisation, il s'agit de deux éléments coplanaires horizontaux et de deux éléments coplanaires verticaux disposés de manière symétrique autour de l'axe de l'antenne. Ces éléments sont alimentés par une excitation de phase et d'amplitude égales, ce qui permet à l'antenne d'obtenir un large diagramme.
- **Antenne fractale :** elle consiste à répéter plusieurs fois la même structure. Elle est conçue à l'aide d'une règle mathématique itérative. L'antenne fractale peut avoir différentes formes comme le rectangle, le cercle, l'étoile, le triangle et la feuille [I.43].
- **Antenne en F inversée (IFA) :** Elle se compose d'une ligne microruban avec une courbure et l'alimentation est donnée à la partie droite de la ligne microruban. Le point d'alimentation est proche de la partie courbée et l'aspect général de l'antenne est donc de type F inversé [I.44].
- **Antenne planaire en F inversée (PIFA) :** Elle se compose d'une antenne patch et d'un plan de masse qui est connectés à l'aide d'une broche de court-circuitage et l'alimentation est fournie à partir de la face inférieure du substrat. Comme elle résonne à un quart de longueur d'onde, elle nécessite moins d'espace [I.45].

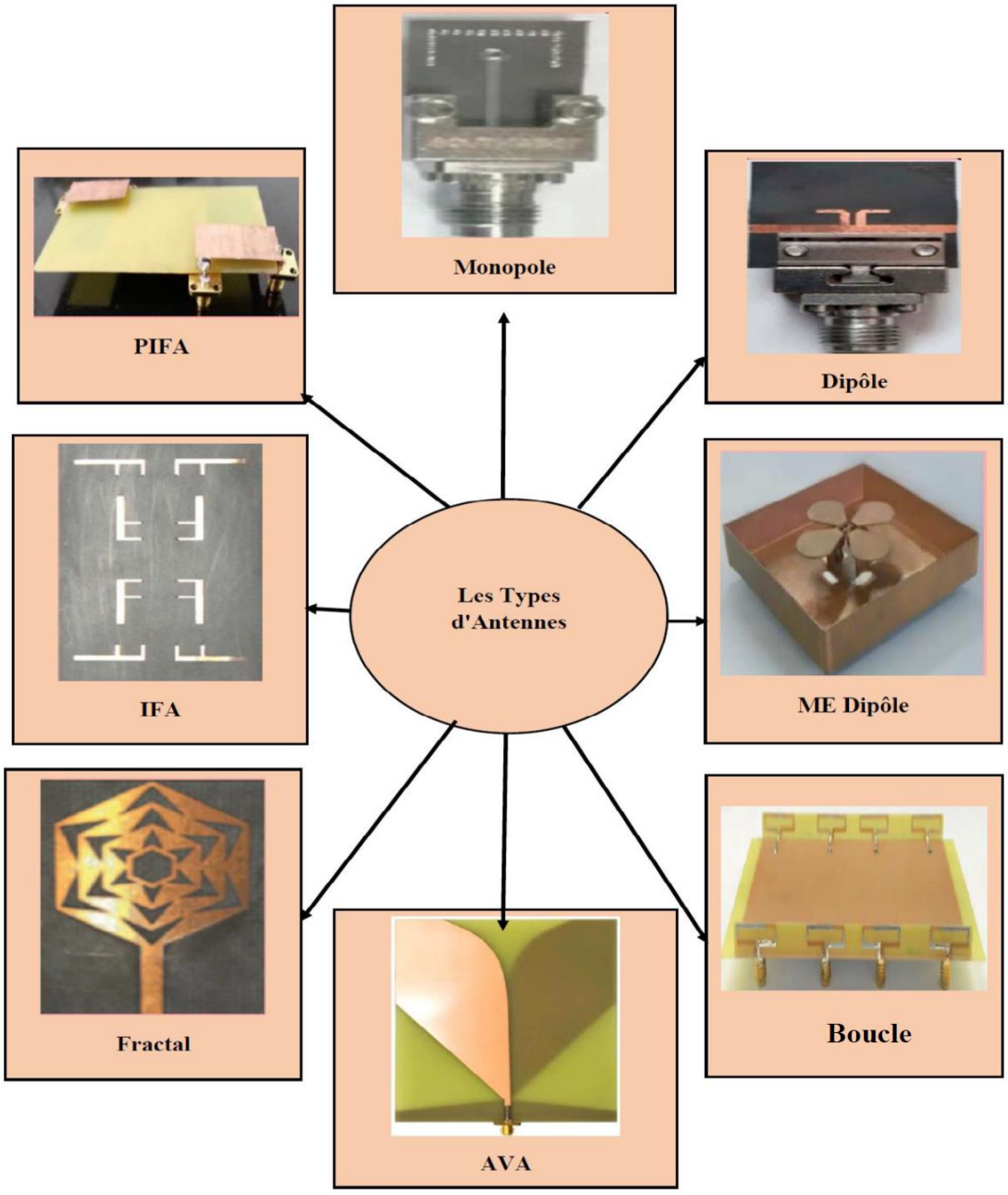


Figure I. 14: Types d'antennes utilisées dans la 5 G

3.2.2 Techniques d'amélioration des caractéristiques des antennes

On peut trouver diverses méthodes pour améliorer les performances des antennes 5G, telles que la bande passante, le gain, l'efficacité, la réduction du couplage mutuel et la taille compacte. Parmi ces techniques, on peut citer :

- **Choix du substrat :** le choix approprié du substrat est le critère le plus important pour la réalisation d'une antenne. Il existe plusieurs substrats ayant une permittivité et une tangente de perte différentes pour la fabrication d'antennes. Dans le but d'augmenter le

gain et de réduire la perte de puissance, il faut choisir un substrat ayant une permittivité relative plus faible et une tangente de perte plus basse [I.46].

- **Ondulation :** Il s'agit de retirer un morceau de métal (rectangulaire, sinusoïdal, triangulaire ou carré) du bord d'un radiateur. Elle améliore la largeur de bande et le rapport avant-arrière [I.47]. Ce rapport avant-arrière (rapport A/A) d'une antenne est le rapport entre la puissance rayonnée dans le lobe de rayonnement avant/principal et la puissance rayonnée dans la direction opposée (180 degrés par rapport au faisceau principal).
- **Réseau d'antennes :** L'utilisation d'un réseau d'antennes permet d'augmenter le gain d'une antenne. De plus, cette méthode améliore la bande passante et l'efficacité de l'antenne [I.46][I.47]. Dans les applications où une antenne à un seul élément ne peut pas répondre à toutes les exigences, telles qu'un gain élevé et une large bande passante, une antenne à plusieurs éléments est plus efficace.
- **Techniques de réduction du couplage mutuel :** Dans la conception d'une antenne multi-éléments, les éléments de l'antenne affectent les performances des autres. Pour réduire ce phénomène, les chercheurs ont incorporé différentes techniques de couplage mutuel dans l'antenne MIMO, également appelées techniques d'isolation ou de découplage dans la littérature.
- **Structure de masse défectueuse (DGS) :** Il s'agit de la structure où les fentes ou les défauts sont consolidés sur le plan de masse de l'antenne. Elle peut être utilisée pour obtenir une efficacité maximale, un faible couplage mutuel et une large bande passante [I.46], [I.47].
- **Méta matériau** : Il contient une caractéristique électromagnétique. Parmi les différents types de méta matériaux, on peut citer le méta matériaux à simple négation, électromagnétiques, à bande interdite électromagnétique, à double négation, anisotropes, isotropes, térahertz, chiraux, accordables, photoniques, à surface sélective en fréquence, non linéaires et accordables. Les métamatériaux sont conçus manuellement en utilisant deux matériaux ou plus. En utilisant les métamatériaux, il est possible d'obtenir une antenne avec un faible couplage mutuel, un gain élevé, une bande passante et une taille d'antenne compacte [I.46], [I.47].
- **Fentes :** elles sont utilisées pour assurer une large bande passante, un gain élevé, une efficacité élevée et une valeur de couplage mutuel élevée [I.47].

Dans le cadre de cette thèse de doctorat, nous allons étudier les antennes imprimées, qui sont employées dans les technologies mentionnées dans le tableau suivant.

Technologie	Description	Bandes spécifiques d'utilisation	Références
E-band (ondes millimétriques)	Utilisée principalement pour les liaisons sans fil à haute capacité et faible latence, notamment dans les réseaux de télécommunications pour les backhauls.	71-76 GHz, 81-86 GHz	FCC E-band Regulations, ITU-R F.2006
WiGig (802.11ad/ay)	Extension de la norme Wi-Fi pour des transmissions sans fil à courte portée et haute vitesse, souvent utilisée pour des applications comme le streaming vidéo 4K et les interconnexions sans fil entre appareils.	57-66 GHz	IEEE 802.11ad Standard, IEEE 802.11ay Standard
Radar automobile	Utilisé pour les systèmes de détection d'obstacles et d'assistance à la conduite dans les véhicules autonomes.	76-81 GHz	NHTSA on Automotive Radar, ETSI EN 302 264
5G mmWave	Partie de la technologie 5G qui exploite les ondes millimétriques pour offrir des débits de données très élevés et une faible latence, principalement pour des applications urbaines denses.	24.25-27.5 GHz, 26.5-29.5 GHz	3GPP Release 15, FCC 5G Spectrum
Radiotélescopes	Utilisés en astronomie pour observer les ondes radio émises par les objets célestes, couvrant une large gamme de fréquences pour des observations diverses.	30 GHz et au-delà	NRAO Frequency Bands, ALMA Bands
Communication par satellite	Utilisée pour les liaisons de communication longue distance, y compris les services Internet par satellite, la télévision par satellite, et les	20-30 GHz (Ku-band), 30-40 GHz (Ka-band)	ITU-R S.465-6, FCC Ka-band

	communications militaires.		
Communications THz	Technologie émergente pour les communications sans fil à ultra-haute vitesse, explorée pour les futures générations de réseaux sans fil au-delà de la 5G (6G et au-delà).	100-300 GHz (inclut la bande 120 GHz)	IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Nature: Terahertz Communications
Imagerie THz	Utilisée dans les systèmes de sécurité et de surveillance pour la détection d'objets cachés sous les vêtements, et dans les applications médicales pour l'imagerie non invasive.	100-300 GHz (inclut la bande 120 GHz)	SPIE Terahertz Technology, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves
Transmission de données sans fil haute capacité	Utilisée pour les liaisons de données à très haute capacité, souvent dans des environnements où les inters	-	-

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une introduction, puis nous avons divisé ce chapitre en deux parties distinctes de façon suivante : l'introduction à la technologie 5G, et les antennes pour la 5G. Dans cette dernière un historique concernant le développement et le fonctionnement général des antennes, puis, nous avons expliqué tous les aspects intéressant au niveau théorique des antennes, aussi bien en considérant des paramètres du rayonnement électromagnétique (EM) basés sur les équations de Maxwell, ainsi que des paramètres électriques, et les types des antennes utilisées dans la 5G. Ces informations permettent de mieux comprendre le fonctionnement des antennes dans différentes situations.

Les prochains chapitres seront dédiés aux études et aux conceptions des antennes et des réseaux des antennes imprimés dans les bandes millimétriques de la 5G et du THz, conformément aux solutions suggérées.

Reference de chapitre 1

[I.1] M. d. S. Rana, M. d. M. R. Smieee, " Design and analysis of microstrip patch antenna for 5G wireless communication systems, "Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, Vol. 11, No. 6, pp. 3329-3337, 2022, doi: 10.11591/eei.v11i6.3955.

[I.2] Ballanis C.A.: Antenna theory. 3rd edn. Wiley, New Delhi. (2005).

[I.3] Hala Alzein, "Développements de nouvelles architectures d'antennes reconfigurables pour les applications de télécommunications de 5ème generation" , These de doctorat, université de Limoges (2020), Consulté le: 20 juin 2023 . [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-02926011.

[I.4] S. Wu, C. X. Wang, E. M. Aggoune, M. M. Alwakeel, X. You, " A General 3-D Non-Stationary 5G Wireless Channel Model, " IEEE Transactions on Communications. Vol. 66, no. 7. pp. 3065 – 3078, 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2779128.

[I.5] I. Fulani, et al. ,"5G Frequency Standardization, Technologies, Channel Models, and Network Deployment: Advances, Challenges, and Future Directions," Journal Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 15, no. 6, 2023, doi: 10.3390/su15065173.

[I.6] « 5G – Les technologies mobiles de cinquième génération», ITU. [En ligne]. Disponible sur: https://www.itu.int/fr/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx (Consulté le 5 Mai 2022)

[I.7] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks," IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, Aug. 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.1900271.

[I.8] M. H. Alsharif, M. A. M. Albreem, A. A. A. Solyman, and S. Kim, "Toward 6G communication networks: terahertz frequency challenges and open research issues," Computers, Materials & Continua (CMC), vol. 66, no. 3, pp. 2831–2842, 2021, doi: 10.32604/cmc.2021.013176.

[I.9] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G wireless communications: vision and potential techniques," IEEE Network, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, Jul. 2019, doi: 10.1109/MNET.2019.1800418.

[I.10] T. S. Rappaport et al., "Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond," IEEE Access, vol. 7, pp. 78729–78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522.

[I.11] A. A. A. Solyman, K. Yahya. "Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 12, no. 4, pp. 3943~3950, August 2022, doi : 10.11591/ijece.v12i4.pp3943-3950.

[I.12] H. H. Attar, A. A. A. Solyman, M. R. Khosravi, L. Qi, M. Alhihi, and P. Tavallali, "Bit and packet error rate evaluations for half-cycle stage cooperation on 6G wireless networks," Physical Communication, vol. 44, pp. 1-13, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.phycom.2020.101249.

[I.13] S. ABULGASEM, F. TUBBAL, R. RAAD, P. I. THEOHARIS, S. LU, S. IRANMANESH, " Antenna Designs for CubeSats: A Review , " IEEE Access, Vol. 9, pp. 45289-45324, 2021, doi : 10.1109/ACCESS.2021.3066632

[I.14] E. O. Hammerstad, "Equations for Microstrip Circuit Design'', in 5th European Microwave Conference, pp. 268-272, IEEE, Hamburg, Germany (2007), doi: 10.1109/EUMA.1975.332206.

[I.15] H. Oraizi and S. Hedayati, "Microstrip Slot Antenna using the Novel Application of Giuseppe Peano Fractal and CPW Feed," in 8th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP), pp. 2063-2066, IEEE, The Hague, Netherlands (2014), 10.1109/EuCAP.2014.6902214.

[I.16] J. Abraham, A. K. K. John and T. Mathews, "Microstrip Antenna Based on Durer Pentagon Fractal Patch for Multiband Wireless Applications," IN Internationa Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES), pp. 1- 5, IEEE, Chennai, India (2014), doi: 10.1109/ICICES.2014.7033976.

[I.17] N. Sharma, V. Sharma," A Journey of Antenna from Dipole to Fractal: A Review," Journal of Engineering Technology, vol. 6, no. 2, PP.317-351, July 2017.

[I.18] D. Kumar, M. Sharma and S. Bansal, "Novel Design of Key Shaped Fractal Antenna for UWB Applications," in Sixth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, pp. 87-90, IEEE, Bhopal, India (2014), doi: 10.1109/CICN.2014.31.

[I.19] D. Parkash and R. Khanna, "Design and Development of CPW-FED Microstrip Antenna for WLAN/WIMAX Applications," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 17, pp. 17-27, 2010, doi:10.2528/PIERC10090603

[I.20] W. Farooq , M. Ur-Rehman , Q. H. Abbassi , X. Yang and K. Qaraqe, " Design of a Finger Ring Antenna for Wireless Sensor Networks", in 10th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP), pp. 1-4, IEEE, Davos (2016), doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481827.

[I.21] K.A.Bakshi A.P.Godse U.A.Bakshi, "Antenna And Wave Propagation," Technical Publications, 1 jan. 2008.

[I.22] R. L. Yadava, "Antenna and Wave Propagation," second edition , PHI Learning Pvt. Ltd., 2022.

[I.23] “Voltage Standing Wave Ratio” Antenna-Theory.com, [En ligne]. Disponible sur: http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php. (Consulté le 20 Mars 2023)
[I.24] W. F. Zeng, F. C. Chen, Q. X. Chu, “Bandwidth-Enhanced 5G Mobile Phone Antenna Pair With Tunable Electric Field Null,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 71, no. 2, pp. 1960 – 1964, 2023, 10.1109/TAP.2022.3232748.
[I.25] J. F. Qian, S. GAO, B. S. Izquierdo, H. Wang, H. Zhou, H. Xu, “Mutual Coupling Suppression Between Two Closely Placed Patch Antennas Using Higher-Order Modes,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 71, no. 6, pp. 4686 – 4694, 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3264874.
[I.26] BALANIS C.A.: Antenna Theory Analysis and Design. Fourth edition, New Jersey, A. John Wiley & Sons, Inc., 2016.
[I.27] N. Lakhlef, H. Oudira and C. Dumond.” Failure correction of linear antenna arrays with optimized element position using Grey Wolf Algorithm,” Special Issue on Smart Cities, Optimization and Modeling of Complex Systems, International Journal of Information Science and Technology(IJIST), Vol. 6, no. 1, pp. 46-53, 2022, doi: 10.57675/IMIST.PRSM/ijist-v6i1.186.
[I.28] Odile Picon et coll.: Antennes: Théorie, conception et applications. Maurice BELLANGER, Paris, 2009.
[I.29] José Bruno Oliveira de Araújo, “Multiband dielectric resonator antennas based on 3D-printed inhomogeneous and anisotropic ceramics”, These de doctorat, Université Fédérale Toulouse Midi-pyrénées(2022).
[I.30] B. R. Jackson, “2D Direction of Arrival Estimation Using Uniform Circular Arrays With Radiation Pattern Reconfigurable Antennas,” IEEE Access, Vol. 10, pp. 11909 – 11923, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146075.
[I.31] A. Guerra, F. Guidi, D. D. Senior, P. M. D. Fellow," Near-field Tracking with Large Antenna Arrays: Fundamental Limits and Practical Algorithms," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 69, Page(s): 5723 - 5738, 2021, 10.1109/TSP.2021.3101696.
[I.32] R. S. Elliott, "Antenna Theory and design," IEEE Press, New Jersey, A. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
[I.33] N. Bayat-Makou, K. Wu, and A. A. Kishk, “Single-Layer Substrate- Integrated Broadside Leaky Long-Slot Array Antennas with Embedded Reflectors for 5G Systems,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 12, pp. 7331–7339, 2019, doi: 10.1109/tap.2019.2930134.
[I.34] H. Liu, W. Yang, A. Zhang, S. Zhu, Z. Wang, and T. Huang, “A Miniaturized Gain-Enhanced Antipodal Vivaldi Antenna and Its Array for 5G Communication Applications,” IEEE Access, vol. 6, pp. 76 282–76 288, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882914.
[I.35] A. S. Dixit and S. Kumar, “A Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna for 5G Communication Applications,” in 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), pp.800–803, IEEE, Noida(2020), doi: 10.1109/SPIN48934.2020.9071075.
[I.36] R. Khan, A. A. Al-Hadi, P. J. Soh, M. R. Kamarudin, M. T. Ali, and Owais, “User influence on mobile terminal antennas: A review of challenges and potential solution for 5G antennas,” IEEE Access, vol. 6, pp. 77 695–77 715, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883788.
[I.37] R. G. Villanueva, H. J. Aguilar, “Compact UWB Uniplanar Four-Port MIMO Antenna Array with Rejecting Band,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 12, pp. 2543–2547, 2019, 10.1109/LAWP.2019.2942827.
[I.38] I. Nadeem and D. Y. Choi, “Study on Mutual Coupling Reduction Technique for MIMO Antennas,” IEEE Access, vol. 7, pp. 563–586, 2019, 10.1109/ACCESS.2018.2885558.
[I.39] L. Zhao, Z. M. Chen, and J. Wang, “A Wideband Dual-Polarized Omnidirectional Antenna for 5G/WLAN,” IEEE Access, vol. 7, pp. 14 266–14 272, 2019, 10.1109/ACCESS.2019.2893941.
[I.40] S. Hussain, S. W. Qu, W. L. Zhou, P. Zhang, and S. Yang, “Design and Fabrication of Wideband Dual-Polarized Dipole Array for 5G Wireless Systems,” IEEE Access, vol. 8, pp. 65 155–65 163, 2020, 10.1109/ACCESS.2020.2984613.
[I.41] K. Sun, D. Yang, and S. Liu, “A wideband hybrid feeding circularly polarized magneto-electric dipole antenna for 5GWi-Fi,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 60, pp. 1837–1842, 2018, 10.1002/mop.31259.
[I.42] M. S. Sharawi, M. Ikram, and A. Shamim, “A Two Concentric Slot Loop Based Connected Array MIMO Antenna System for 4G / 5G Terminals,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6679–6686, 2017, 10.1109/TAP.2017.2671028.
[I.43] A. S. Dixit and S. Kumar, “A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna,” IEEE Access, vol. 8, pp. 45 774–45 796, 2020, 10.1109/ACCESS.2020.2977167.
[I.44] H. Ullah and F. Tahir, “A novel snowflake fractal antenna for dual-beam applications in 28 GHz Band,” IEEE Access, vol. 8, pp. 19 873–19 879, 2020, 10.1109/ACCESS.2020.2968619.
[I.45] D. Q. Liu, H. J. Luo, M. Zhang, H. L. Wen, B. Wang, and J. Wang, “An Extremely Low-ProfileWideband MIMO Antenna for 5G Smartphones,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 9, pp. 5772–5780, 2019, 10.1109/TAP.2019.2908261.

[I.46] A. AZARI, A. SKRIVERVIK, H. ALIAKBARIAN, R. A. SADEGHZADEH," A Super Wideband Dual-Polarized Vivaldi Antenna for 5G mmWave Applications," IEEE Access, Vol. 11, pp. 80761 - 80768, 2023, 10.1109/ACCESS.2023.3300040.
[I.47] H. T. Chattha, “4-Port 2-Element MIMO Antenna for 5G Portable Applications,” IEEE Access, vol. 7, pp. 96 516–96 520, 2019, 10.1109/ACCESS.2019.2925351.

Chapitre 2 : Etude et Conception des antennes imprimées au voisinage de 30 GHz

1 Introduction

Le développement technologique et l'histoire du concept et des techniques liés en particulier à la conception des antennes dépendent principalement des connaissances des chercheurs sur les phénomènes électromagnétiques ainsi que de leur compréhension de la formulation des équations de Maxwell. De plus, des chercheurs spécialistes en étude et en conception des antennes travaillent continuellement à l'élaboration des nouveautés nécessaires pour améliorer les performances des antennes selon la nécessité des utilisateurs et selon le développement technologique.

Les antennes pour la 5G doivent avoir de bonnes performances, notamment une bande passante et une directivité élevées, pour répondre aux exigences et aux besoins des utilisateurs, y compris les débits de données élevés de la technologie actuelle (5G) [II.1] [II.2]. Ces antennes doivent également avoir un gain élevé pour éviter les problèmes causés par les micro-ondes. En règle générale, la technologie sans fil de la 5G doit s'adapter à des antennes très performantes, légères, de petit profil (taille compacte), peu coûteuses, faciles à mettre en œuvre sur tous les systèmes et appareils électroniques, adaptables aux surfaces planes et non planes, et mécaniquement solides lorsqu'elles sont montées sur des surfaces rigides [II.3].

Pour concevoir une antenne, il est nécessaire et indispensable que les chercheurs appliquent une méthodologie analytique pour prévoir son fonctionnement au niveau électrique et au niveau du rayonnement. En effet les méthodes les plus communément mises en œuvre sont analytiques et numériques. On ne peut utiliser des méthodes analytiques que pour les cas des antennes classiques et simples [II.4]. En revanche, l'utilisation qui est faite de méthodes numériques pour obtenir les meilleurs résultats, même si la structure des antennes demeure très complexe, pose des problèmes au niveau du temps de traitement des calculs ainsi que de gestion du stockage de données[II.5].

Les évolutions importantes liées aux technologies des antennes proviennent directement du recours aux simulateurs électromagnétiques reposant essentiellement sur des méthodes numériques. Ces outils de simulations sont apparus dès 1960 [II.6]. De nombreux chercheurs et designers experts et spécialistes de la conception des antennes se sont intéressés au développement de ces outils de simulation électromagnétique pour obtenir de meilleurs et plus précis résultats, tous les simulateurs utilisent des méthodes numériques. Parmi ces outils, on trouve HFSS, CST, et FEKO [II.6].

Plusieurs recherches sont associées aux études et à la conception d'antennes en bande millimétrique pour la 5G, en particulier dans la bande de fréquences au voisinage de 30 GHz,

qui offre de meilleures performances [II.6] [II.7]. À cette fin, l'objectif étant de concevoir de nouveaux types d'antennes adaptés aux technologies de cinquième génération, ce qui constitue une tâche difficile et un défi important pour les spécialistes de la conception d'antennes. En effet, le système de communication sans fil 5G nécessite des antennes très performantes en termes de gain, de directivité, de coefficient de réflexion, de bande passante et d'efficacité. Ce chapitre vise à surmonter les problèmes liés aux antennes et aux réseaux d'antennes imprimées à travers des propositions de conceptions des antennes et des réseaux d'antennes patchs qui ont meilleures performances électriques et de rayonnements.

2 L'antenne imprimée

2.1 Description d'une antenne patch

L'antenne patch microruban est une structure constituée généralement de quatre éléments ("patch" dont sa largeur W, sa longueur L et son épaisseur t, "plan de masse", "substrat" de hauteur h et " ligne d'alimentation") (voir la figure II.1) [II.7]. Elle peut être classée comme une antenne résonnante mono élément. Lorsque sa fréquence est déterminée, tous les éléments (tels que le diagramme de rayonnement, l'impédance d'entrée, etc.) peuvent être déterminées. Le patch est une très fine bande métallique rayonnante située d'un côté d'un mince substrat non conducteur, le plan de masse est situé de l'autre côté du substrat. En général, ce patch métallique est constitué d'une fine feuille de cuivre plaquée d'un métal résistant à la corrosion, tel que l'or, l'étain ou le nickel. De nombreuses formes de patchs sont conçues (Carré, Rectangulaire, Dipôle, Circulaire, Secteur d'anneau, Elliptique, Triangulaire, Anneau, Secteur de Disque) [II.8].

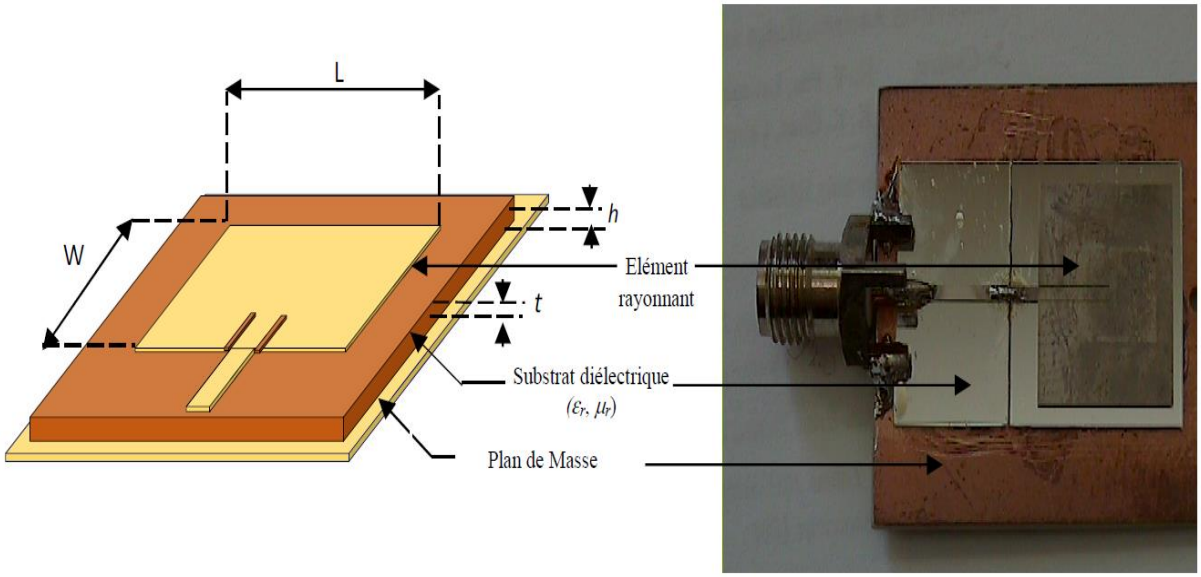


Figure II. 1: Géométrie d'une antenne imprimée

2.2 Mécanismes de rayonnement

La littérature scientifique repose souvent sur des travaux de théorie optique [II.10] qui permettent la compréhension du mécanisme de rayonnement des antennes imprimées comme le montre la figure II.2.

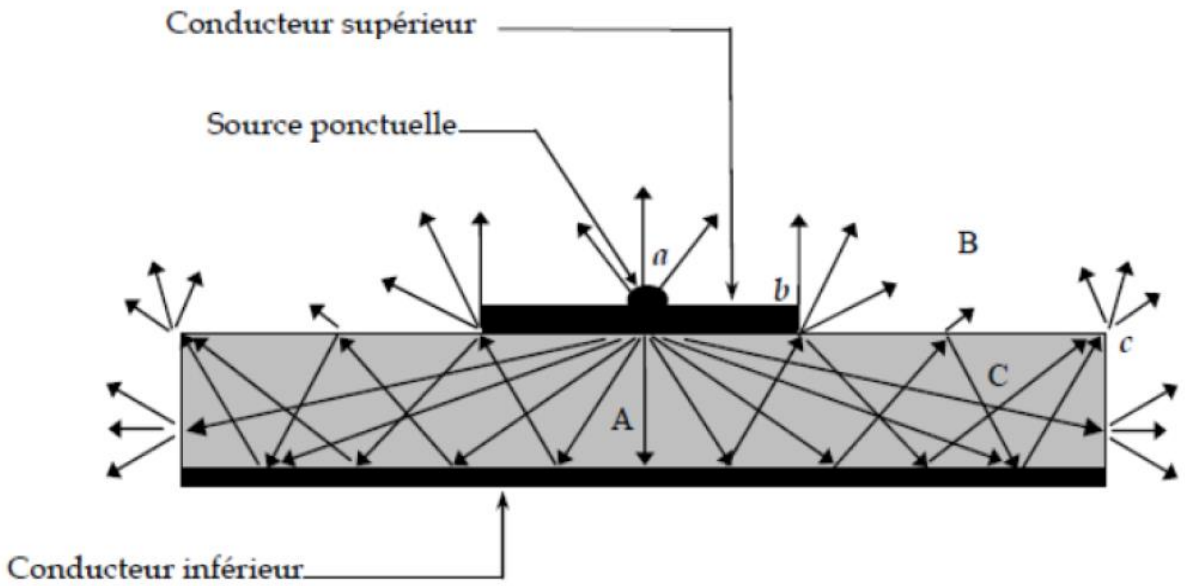


Figure II. 2: Le mécanisme de rayonnement d'une antenne imprimée

Le point (a) contient une source ponctuelle qui produit une radiation uniforme se propageant dans toutes les directions. Une partie de ce rayonnement est réfléchie d'abord au niveau de la masse, puis au niveau du conducteur supérieur, et ainsi de suite. Certains de ces rayonnements atteignent également le bord conducteur (b), provoquant ainsi un phénomène de diffraction. Ce phénomène entraîne l'apparition de deux composantes du champ, l'une perpendiculaire et l'autre tangente au plan de masse. Il est possible de définir trois zones distinctes :

- **Zone A :** Cette région connaît la densité de rayonnement la plus élevée, et le champ électromagnétique se concentre de manière plus intense dans cet espace. Par ailleurs, ce type de fonctionnement permet de propager des ondes électromagnétiques à travers les lignes de micro-ruban. Dans les basses fréquences, la concentration des champs dans cette zone entraîne une propagation des ondes électromagnétiques sans présence de rayonnement.
- **Zone B :** Cette zone couvre entièrement la moitié supérieure d'une antenne. L'espace en question offre la possibilité de dispersion complète des champs électromagnétiques dans l'atmosphère, ce qui a pour conséquence d'accroître la radiation interne de la source. En ce qui concerne les hautes fréquences, le rendement s'affaiblit, alors que la radiation électromagnétique reste un facteur crucial pour le fonctionnement de l'antenne.

- **Zone C :** Une portion des rayonnements atteint directement la surface de séparation au point d'incidence, mais reste à l'intérieur du diélectrique. Ultérieurement, dans cette région, les ondes de surface peuvent être orientées vers l'arête diélectrique du substrat, sans avoir de conséquence directe sur l'émission de rayonnement de l'antenne. Néanmoins, en se dirigeant vers le substrat (C), cette onde est diffractée, entraînant ainsi l'apparition de rayonnements parasites.

2.3 Les techniques d'alimentation

Les techniques d'alimentation sont classées en deux catégories. L'une est avec contact et l'autre sans contact [II.10], [II.11]. Il existe quatre types de techniques d'alimentation : la sonde coaxiale, la ligne microruban, le couplage d'ouverture et le couplage de proximité.

2.3.1 Alimentation par ligne microruban

Cette technique d'alimentation est une ligne de petite taille par rapport au patch. Elle est connectée directement au patch, comme illustré dans la figure II.3. De plus, cette technique se caractérise par des avantages importants, notamment son adaptation facile à la fréquence de résonance, sa fabrication sans difficulté, son contrôle de position et sa modélisation, ainsi que la possibilité de réaliser des réseaux d'antennes sur le même substrat afin d'augmenter la directivité et le gain.

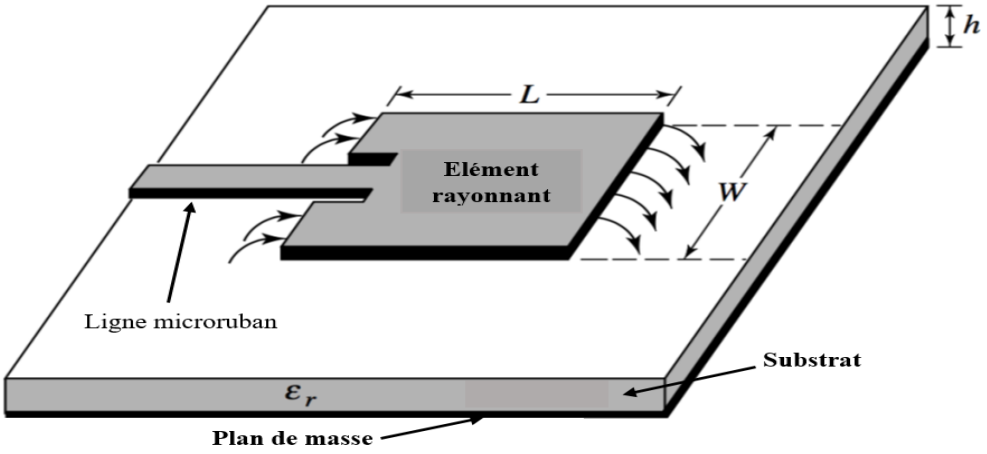


Figure II. 3: Alimentation par ligne micro ruban

2.3.2 Alimentation par sonde coaxiale

Pour ce type d'alimentation, le conducteur central du câble coaxial est fixé directement à l'élément rayonnant, qui est le patch de l'antenne, et le conducteur externe est lié au plan de masse. En général, la ligne d'alimentation devrait être isolée de l'élément rayonnant,

contrairement à ce qui se passe dans ce mécanisme. La minimisation des rayonnements parasites, la facilité de fabrication et l'efficacité de l'alimentation sont les avantages de la méthode d'alimentation coaxiale. L'alimentation de la sonde coaxiale est illustrée à la figure II.4. Beaucoup de bonnes conceptions ont été rejetées à cause d'une mauvaise alimentation. Le concepteur peut construire une antenne avec de bonnes caractéristiques, de bons paramètres de rayonnement et une efficacité élevée, mais si l'alimentation est mauvaise, l'efficacité totale peut être réduite à un faible niveau, ce qui entraîne le rejet de l'ensemble du système.

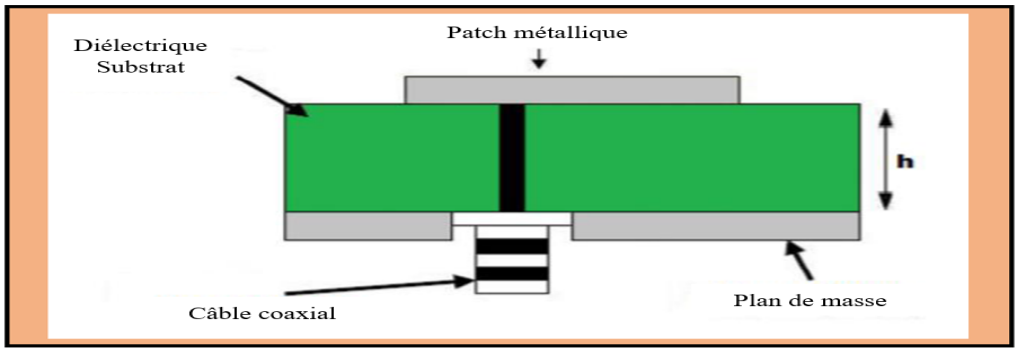


Figure II. 4: L'alimentation de la sonde coaxiale

2.3.3 Alimentation couplée à une ouverture

Le plan de masse est équipé d'une ouverture, qui peut être soit circulaire soit rectangulaire, et qui sépare deux substrats. Le substrat avec une permittivité relative εr1, sur lequel est posé le patch, se situe en haut, tandis qu'un autre substrat avec une permittivité relative εr2, qui contient une ligne d'alimentation en micro ruban, se trouve en dessous, comme représenté à la figure II.5. Cette méthode garantit une augmentation de la largeur de bande. Il offre par ailleurs la possibilité de réduire les radiations issues de la ligne d'alimentation grâce à la protection offerte par la masse du plan. Cela renforce les capacités de polarisation.

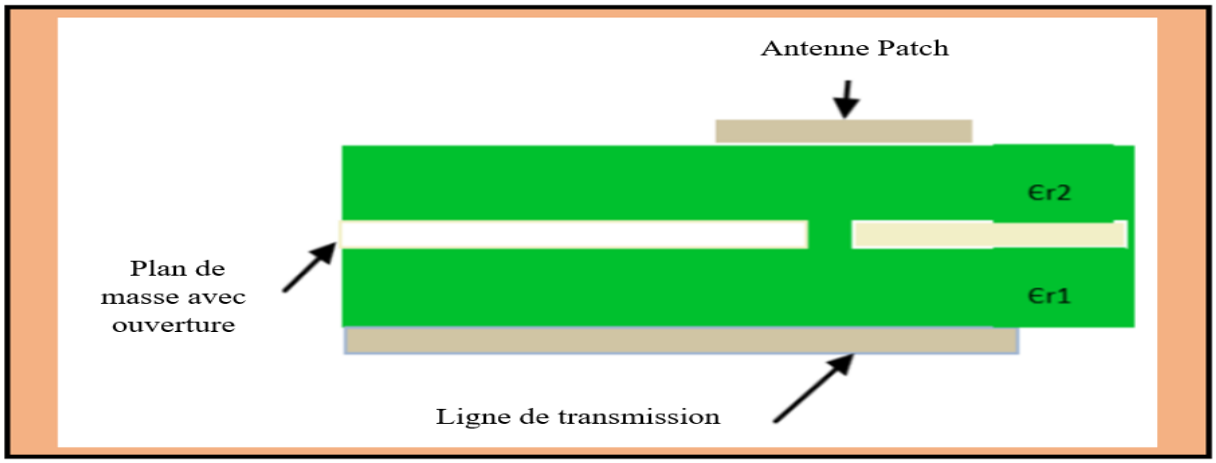


Figure II. 5: Alimentation couplée à une ouverture

Le substrat supérieur peut être fabriqué avec une permittivité plus faible pour produire des champs frangeants faiblement liés, produisant un meilleur rayonnement. Le substrat inférieur peut être fabriqué indépendamment avec une valeur de permittivité élevée pour obtenir des champs étroitement couplés qui ne produisent pas de rayonnements parasites. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle rend la fabrication plus difficile.

2.3.4 Couplage de proximité

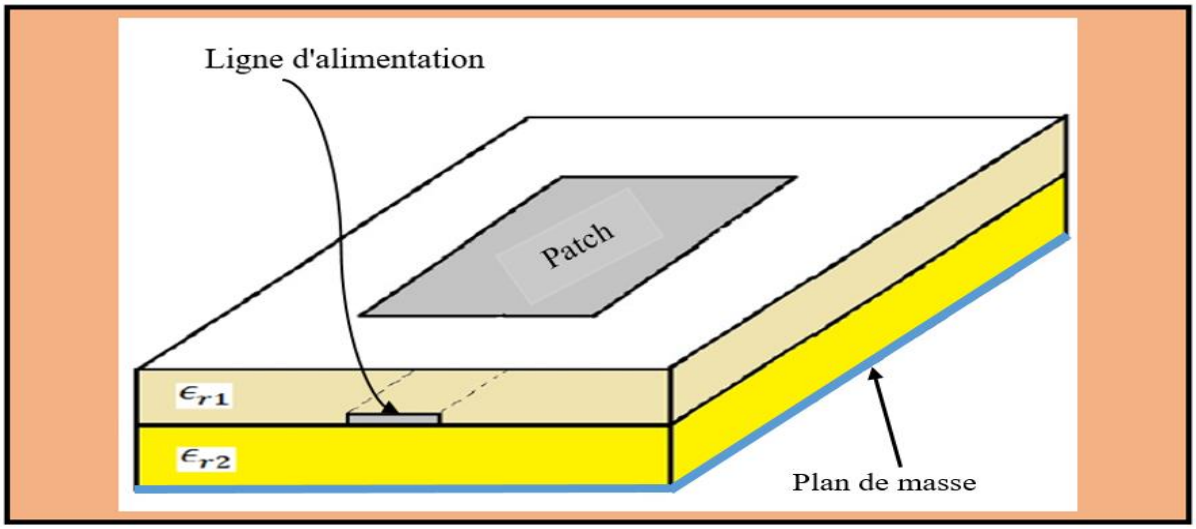


Figure II. 6: Méthode d'alimentation par couplage de proximité

Le couplage de proximité est utilisé dans deux substrats ε_{r1} et ε_{r2}. Le patch se trouve en haut, le plan de masse en bas, et une ligne microruban est connectée à la source d'alimentation et se trouve entre les deux substrats, comme le montre la figure II.6. Ce type est également connu sous le nom d'alimentation microruban à couplage électromagnétique". Le principe de ce mécanisme est que le comportement entre le patch et la ligne d'alimentation est capacitif. De plus, cette technique est plus complexe que les autres techniques d'alimentation, en ce sens que le concepteur doit tenir compte de la capacité de couplage entre la ligne d'alimentation et le patch, ainsi que du circuit de résonance RLC équivalent, qui représente le patch et les deux substrats. Le condensateur de couplage de cette antenne peut être conçu pour l'adaptation d'impédance de l'antenne.

Le tableau II-1 contient la comparaison des diverses méthodes utilisées pour les alimentations des antennes. Elle porte principalement sur les critères liés à la fabrication, au rayonnement, à la fiabilité, à l'adaptation de l'impédance et à la bande passante. Selon ce tableau, nous constatons que chaque technique a des avantages et des inconvénients.

Tableau II-1: Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Caractéristiques	Alimentations par lignes micro rubans	Alimentation par câble coaxiale	Alimentation couplée par proximité	Alimentation couplée par ouverture
Rayonnement parasite de l'alimentation	Plus	Plus	Minimum	Moins
Fiabilité	Meilleure	Pauvres à cause de soudure	Bonne	Bonne
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5%	2-5%	13%	2-5%

2.4 Adaptation d'impédance

Dans le cas de l'antenne patch qui est alimentée par une ligne de transmission présentant une impédance caractéristique Z_c, celle-ci est considérée simplement par une impédance complexe dont la forme correspond à $Z_A = R_A + jX_A$. Cette impédance est déterminé en fonction de la géométrie d'antenne, mais également au niveau du couplage existant entre la ligne et l'antenne.

Pour une alimentation directe (ligne coaxiale, ligne microruban, etc.), cette impédance d'entrée est également déterminée en fonction du positionnement du point d'alimentation sur l'antenne. En effet, cette impédance est plus faible lorsque le point d'excitation est proche du centre de l'élément, et elle augmente lorsqu'on se rapproche du bord de l'élément. Si l'on considère la forme carrée d'un élément, la valeur de l'impédance d'entrée de 50 ohms se situe à environ un tiers de la distance entre le centre et le bord de l'élément (côté central).

Lorsque l'antenne est alimentée par une sonde coaxiale, ses caractéristiques, son diamètre et sa longueur (entre le plan de masse et le patch), créent au niveau en entrée de l'antenne un effet réactif.

Pour calculer cette impédance d'entrée, on utilise principalement la méthode des moments. Pour les éléments présentant des formes simples montés sur un substrat fin, il est possible dans ce cas précis que l'antenne fonctionne comme un circuit résonant placé parallèlement, dont le facteur de qualité est lié aux pertes par rayonnement et par dissipation thermique.

2.5 Réseaux d’antennes imprimées

2.5.1 Définition

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes fonctionnant à proximité les unes des autres et conçues pour fonctionner simultanément. Il exploite le schéma d'interférence des champs rayonnant à partir des différents éléments pour obtenir un schéma de rayonnement souhaité comme le montre la figure II.7 [II.11]. Les réseaux d'antennes sont souvent utilisés pour obtenir une directivité plus étroite que celle qui pourrait être obtenue avec un seul élément.



Figure II. 7: Diagramme de rayonnement du réseau d'antennes produit par l'interférence d’antennes individuelles

En réalité, une antenne patch unique a souvent du mal à répondre aux exigences en matière de rayonnement. Un réseau d'antennes imprimées est utilisé pour cela, il se compose de plusieurs éléments rayonnants connectés entre eux grâce à des lignes en micro ruban. La plupart des antennes imprimées sont conçues pour fonctionner dans des conditions normales et sont disposées de manière récurrente dans une direction ou dans plusieurs directions. Par ailleurs, Il existe également plusieurs applications qui fonctionnent grâce à des réseaux d'antennes, tels que les radars, les téléphones portables et les satellites. Ces réseaux présentent plusieurs types de géométrie : linéaires et planaires (à deux dimensions), comme le montre la figure II.8 [II.12].

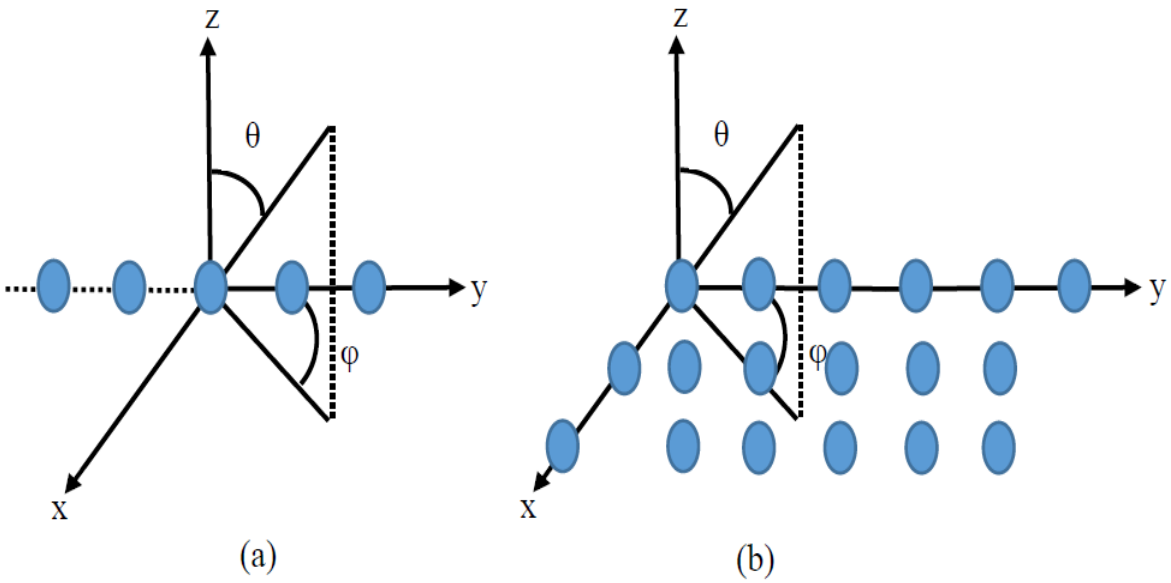


Figure II. 8: Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes multiples disposées selon un schéma géométrique spécifique afin d'obtenir un diagramme de rayonnement spécifique. Cette géométrie détermine l'espacement et l'orientation des éléments du réseau, ce qui influe directement sur le facteur du réseau. Parmi certaines géométries de réseau couramment utilisées dans l'ingénierie des antennes, on peut citer les suivantes :

- Réseau linéaire : Un réseau linéaire consiste en une série d'antennes disposées en ligne droite. L'espacement entre ces antennes est généralement égal à une demi-longueur d'onde ou moins.
- Réseau planaire : Un réseau planaire est un réseau bidimensionnel disposé dans un plan. Ces réseaux sont couramment utilisés dans les radars et les systèmes de communication par satellite.
- Réseau circulaire : Un réseau circulaire est un réseau bidimensionnel disposé de manière circulaire. L'espacement entre ces antennes est généralement égal à une longueur d'onde ou moins.
- Réseau en phase : Un réseau en phase est un type de réseau d'antennes qui utilise des techniques de déphasage pour orienter la direction du diagramme de rayonnement. Ces réseaux sont couramment utilisés dans les systèmes radar et les communications par satellite.

2.5.2 Techniques d’alimentation d’un réseau d’antennes imprimées

Pour alimenter une antenne, il convient de fournir de l'énergie aux différentes sources en suivant les règles de répartition. Les éléments rayonnants peuvent être alimentés grâce à des lignes micro ruban. Les configurations des réseaux d'excitation peuvent être ajustées en fonction des exigences. Pour distribuer de la puissance, on s'appuie sur le principe des lignes de micro ruban et de transformateurs d'impédance à quart d'onde. Dans un circuit d'alimentation, on peut avoir recours à un déphaseur constitué de matériaux supraconducteurs. Nous considérons qu'il y a une répartition uniforme de la puissance dans l'ensemble des circuits d'alimentation, ce qui signifie que chaque patch dispose de la même quantité d'énergie. Lors de l'émission de signaux à partir de sources données, il est crucial de noter que leur fréquence reste le même tout au long. Les configurations possibles des circuits d'excitation sont multiples. Il est possible de les classer en deux catégories :

- Alimentation en série ;
- Alimentation en parallèle.

Effectivement, le type d'alimentation adopté est influencé par divers critères :

- La loi de pondération souhaitée, en amplitude et/ou en phase ;
- La bande passante souhaitée.

Dans le cas d'une alimentation en série, la bande passante est généralement plus étroite en raison de la plus grande influence de la fréquence sur le principe de pondération, contrairement à une alimentation parallèle.

2.5.2.1 Alimentation parallèle

Par ailleurs, la longueur des tronçons du réseau en parallèle est plus élevée, de même que le nombre de coudes, ce qui entraîne une hausse des pertes, surtout dans la bande millimétrique. Au moment de la conception d'une antenne imprimée, il est impératif de prendre en compte l'importance de choisir le substrat diélectrique approprié. Par ailleurs, dans un réseau de $\mathbf{2^n}$ éléments rayonnants, ces éléments peuvent être alimentés en parallèle à l'aide de **n** étages de diviseurs de puissance, chacun contenant ($\mathbf{2^{m-1}}$) diviseurs pour chaque étage **m**. Afin de garantir que cette alimentation est idéalement adaptée, il est logique d'employer des diviseurs de type Wilkinson.

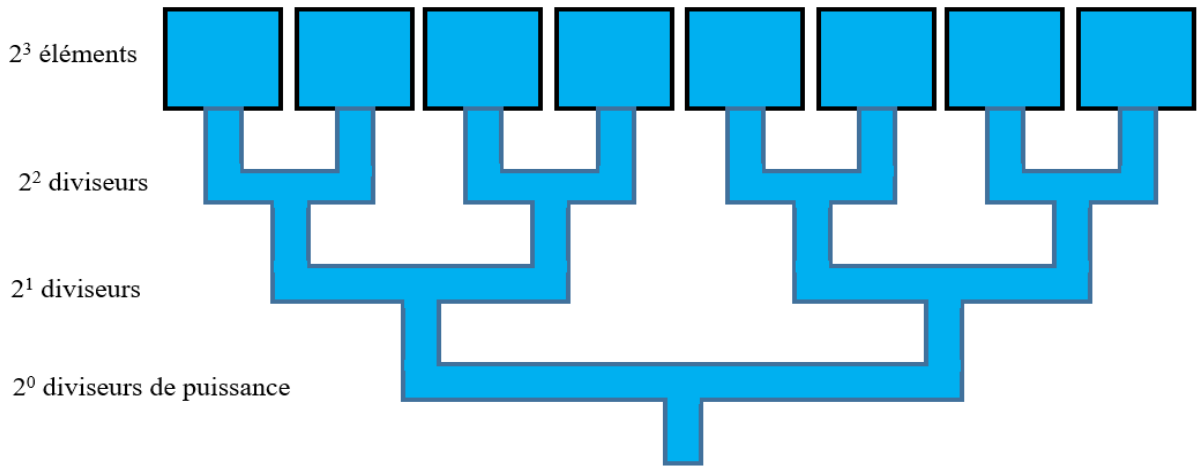


Figure II. 9: Alimentation parallèle d'un réseau linéaire

2.5.2.2 Alimentation série

Dans la figure II.10, on peut observer une ligne de transmission sur laquelle sont connectés en série des éléments rayonnants. À l'amorce de chaque ligne, un déphaseur est positionné de manière orthogonale par rapport à un guide d'alimentation unique. On trouve un élément déphaseur situé entre deux émetteurs rayonnants consécutifs. Il est impératif que la distance entre les raccordements des lignes sur la ligne principale soit régulière et que les signaux atteignent les déphaseurs en même temps pour prévenir les erreurs de phase.

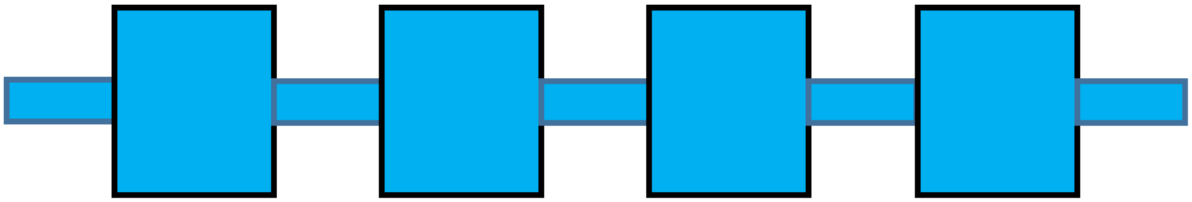


Figure II. 10: Alimentation série d'un réseau linéaire

2.5.3 Applications pratiques des réseaux d'antennes

Les réseaux d'antennes ont un large éventail d'applications pratiques dans le domaine des systèmes de communication et de radar. Parmi les applications les plus courantes, on peut citer :

- **Communications par satellite :** Les réseaux d'antennes sont couramment utilisés dans les systèmes de communication par satellite pour obtenir un gain élevé et des capacités d'orientation du faisceau. Les antennes réseau à commande de phase sont souvent utilisées dans les systèmes satellitaires pour suivre et communiquer avec plusieurs stations terrestres simultanément.

- **Réseaux sans fil :** Les réseaux d'antennes sont utilisés dans les réseaux sans fil tels que Wi-Fi, les réseaux cellulaires et Bluetooth pour obtenir un gain élevé et des capacités directionnelles. Les techniques de formation de faisceaux sont utilisées dans ces systèmes pour améliorer la qualité du signal et réduire les interférences.
- **Systèmes radar :** Les réseaux d'antennes sont couramment utilisés dans les systèmes radar pour obtenir une imagerie à haute résolution et des capacités de suivi des cibles. Les antennes à réseau phasé sont souvent utilisées dans les systèmes radar pour balayer l'environnement et détecter l'emplacement des objets.

2.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées bénéficient de la technologie des circuits imprimés, ce qui leur donne un avantage certain sur les antennes classiques comme les cornets ou les dipôles filaires.

➢ **Les avantages de l'antenne microruban**

- Elles fonctionnent à des fréquences micro-ondes pour lesquelles il n'est pas possible de concevoir des antennes traditionnelles.
- Ce type d'antenne a une taille réduite et permet donc d'obtenir des dispositifs finaux de petite taille.
- Les antennes à base de microruban sont faciles à graver sur n'importe quel circuit imprimé et permettent également un accès facile pour le dépannage pendant la conception et le développement. Cela est dû au fait que le motif du microruban est visible et accessible par le haut. Elles sont donc faciles à fabriquer et confortables sur les parties incurvées de l'appareil. Il est donc facile de les intégrer aux circuits intégrés hyperfréquences et circuits hyperfréquences monolithiques.
- Ils ont un coût de fabrication plus faible et peuvent donc être fabriqués en grande quantité.
- Ils sont capables de prendre en charge plusieurs bandes de fréquences (double, triple).
- Ils prennent en charge les types de polarisation double, à savoir linéaire et circulaire.
- Ils sont légers.
- Ils sont robustes lorsqu'ils sont montés sur les surfaces rigides des appareils.
- Capacité à se conformer à des surfaces courbes (ailes d'avion, missiles)

➢ **Elles présentent cependant quelques inconvénients tels que :**

- Le rayonnement parasite existe dans diverses antennes en microruban telles que l'antenne patch en microruban, l'antenne à fente en microruban et l'antenne dipôle imprimée.
- Elle offre une faible efficacité en raison des pertes diélectriques et des pertes dans le conducteur.

- Il offre un gain plus faible.
- Il présente un niveau plus élevé de rayonnement de polarisation croisée.
- Il a une capacité de gestion de la puissance plus faible.
- Il a une bande passante d'impédance intrinsèquement plus faible (1 à 5 %).
- La structure de l'antenne microruban rayonne à partir des alimentations et d'autres points de jonction.

2.7 Applications des antennes imprimées

Les concepteurs de systèmes de télécommunication cherchent essentiellement une solution permettant de remplacer les antennes conventionnelles par des antennes patch présentant des caractéristiques identiques, en raison des exigences et des besoins pour les utilisateurs. Il existe différentes applications réussies démontrant la possibilité de cette transition [II.13] :

- Télécommunication satellitaires.
- Commande et contrôle.
- Télémétrie (télémesure) par missile.
- Équipements portatifs.
- Éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Antenne d'émission utilisée en médecine.
- Récepteur satellite de navigation

2.8 Procédure de conception d'une antenne imprimée

Dans ce paragraphe, nous présentons la méthode la plus couramment utilisée pour concevoir des antennes imprimées micro ruban, y compris la procédure de détermination de leurs paramètres (largeur **W** et longueur **L**), ainsi que les dimensions du substrat (largeur $\mathbf{W_s}$, longueur $\mathbf{L_s}$ et la hauteur **h**), et celles des lignes d'alimentations (largeur $\mathbf{W_f}$ et longueur $\mathbf{L_f}$) et le type d'alimentation, et la façon de coller le patch sur le substrat comme le montre la figure II.11. De plus dans le cas d'un patch rectangulaire, sa longueur L est généralement comprise entre $\lambda_0/3$ et $\lambda_0/2$, où λ_0 est la longueur d'onde de l'espace libre, et son épaisseur **t** est très fine, de sorte que $\mathbf{t} << \lambda_0$. En outre la hauteur **h** du substrat est de $0{,}003\ \lambda_0 \leq h \leq 0{,}05\ \lambda_0$, et Sa constante diélectrique ε_r est généralement comprise entre 2,2 et 12 [II.14]. Pour déterminer ces paramètres, nous suivons les étapes suivantes [II.15] :

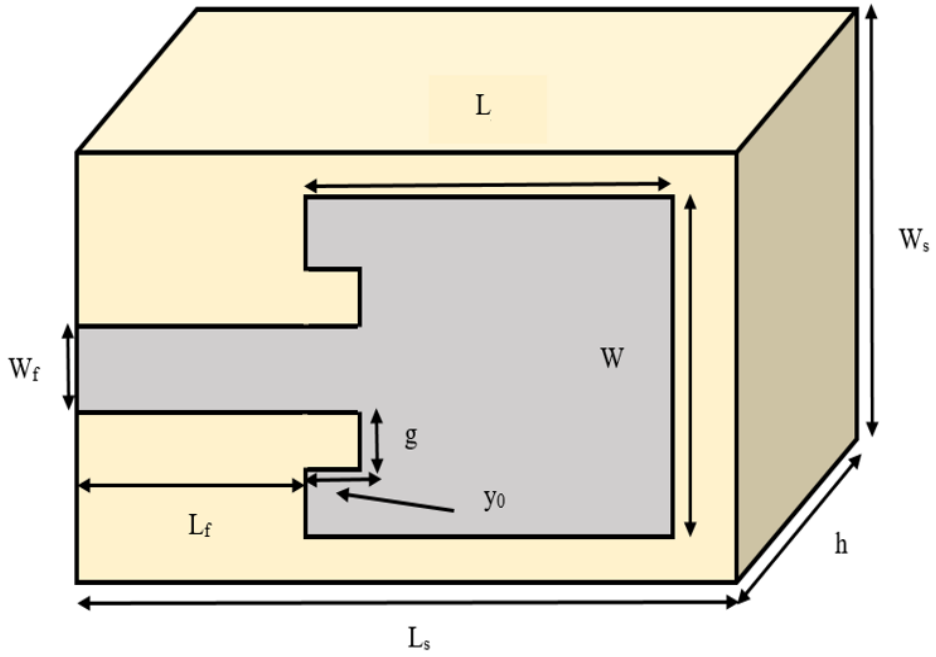


Figure II. 11: Antenne patch microruban rectangulaire

- **Première étape :** L'antenne est conçue pour fonctionner dans un système 5G. Le choix de l'épaisseur du substrat est l'une des étapes les plus importantes du processus de conception de l'antenne, car l'épaisseur du substrat affecte directement l'efficacité et la bande passante de l'antenne microruban. L'une des hypothèses pour cette antenne est d'obtenir la bande passante la plus large possible. Lorsque l'épaisseur du substrat augmente, la bande passante de l'antenne augmente, tandis que son efficacité diminue. La valeur supérieure de l'épaisseur du substrat a été déterminée à partir de la relation suivante [II.14], [II.15] :

$$h \leq 0 \frac{0.3c}{2\pi f_r \sqrt{\varepsilon_r}} \qquad \text{(II-1)}$$

Où **c** représente la vitesse de la lumière, f_r est la fréquence de résonance et ε_r constante diélectrique de substrat.

- **Deuxième étape** : Afin d'obtenir un rayonnement efficace, la largeur W d'un patch rectangulaire pratique peut être calculée par la relation (II.2) [II.15][II.16]:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \qquad \text{(II.2)}$$

- **Troisième étape :** Nous déterminons la longueur du patch L : Nous suivons les étapes suivantes :

- Pour déterminer la longueur de l'élément rayonnant, il faut d'abord calculer la permittivité effective ε_{reff}, du substrat. Elle est définie par la relation suivante [II.17][II.18] :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{\frac{-1}{2}} \quad ; \text{pour W/h} > 1 \qquad \text{(II.3)}$$

- Lorsque ε_{eff} est déterminé, la longueur effective du patch L_{eff} est obtenue en appliquant la relation (II.4) [II.17][II.18] :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r}\varepsilon_{eff}^{-\frac{1}{2}} \qquad \text{(II.4)}$$

- Nous calculons ensuite l'extension de la longueur du patch en appliquant la relation (II.5) [II.17][II.18]:

$$\Delta L = 0.412\frac{(\varepsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\varepsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \qquad \text{(II.5)}$$

- Nous déterminons ensuite la longueur du patch L, En appliquant l'équation (II-6) :

$$L \quad = L_{eff} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2\Delta L \qquad \text{(II.6)}$$

Lorsque la taille de l'élément rayonnant est déterminée, il faut également déterminer la taille du plan de masse. Ce plan de masse doit être supérieur à l'élément rayonnant d'environ six fois l'épaisseur du substrat, aussi bien en largeur qu'en longueur. On détermine les dimensions de ce plan de masse à l'aide de la relation suivante [II.17][II.18]:

$$W_g = W + 6h \; et \; L_g = L + 6h \qquad \text{(II.7)}$$

- **Quatrième étape :** Dans cette étape, nous déterminons l'écart d'alimentation de l'encart à partir des relations suivantes [II.17][II.18]:

$$\boldsymbol{g} = \frac{4.65\times10^{-18}\times c\times f_r}{\sqrt{2\varepsilon_{eff}}} \qquad \text{(II.8)}$$

$$y_0 = \frac{L}{\pi}cos^{-1}\left[\sqrt{\frac{Z_C}{R_e}}\right] \qquad \text{(II.9)}$$

- **Cinquième étape** : Détermination de la résistance d'entrée résonante R_e :

Nous commençons par le calcul de l'impédance caractéristique de ligne d'alimentation microruban Z_c (Ω) :

$$Z_C = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}}\ln\left(\frac{8h}{W_f} + \frac{W_f}{4h}\right) \qquad \text{Pour } W_f/h \leq 1 \qquad \text{(II.10)}$$

$$Z_C = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}}\left(\frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667\ln\left(\frac{W_f}{h} + 1.444\right)\right) \quad \text{Pour } W_f/h \geq 1 \qquad \text{(II.11)}$$

Puis nous déterminons la résistance d'entrée R_e par la relation :

$$R_e = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})}\cos^2\left(\frac{\pi}{L}g\right) \qquad \text{(II.12)}$$

Tels que G_1 est le coefficient de conduction du microruban, et G_{12} est la conductance réciproque du microruban. Dans le cas général le coefficient G_1 est la conductance du patch dans le modèle de ligne de transmission tandis que G_{12} est la conductance mutuelle due aux effets mutuels entre les fentes. Ces coefficients sont calculés par les formules suivantes :

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \qquad \text{(II.13)}$$

$$G_{12} = \frac{I_1}{120\pi^2}\int_0^{\pi}\left(\frac{\sin\left(\frac{kW}{2}\cos\theta\right)}{\cos\theta}\right)^2 J_0(kL\ \sin\theta)\sin^3\theta d\theta \qquad \text{(II.14)}$$

Où J_0 est la fonction de Bessel d'ordre zéro de la première espèce et k est la constante de phase pour l'espace libre. Elle est calculée par la relation suivante :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \text{(II.15)}$$

$$I_1 = \int_0^{\pi}\left(\frac{\sin\left(\frac{kW}{2}\cos\theta\right)}{\cos\theta}\right)^2 \sin^3\theta d\theta = -2 + \cos X + XSi(X) + \frac{\sin X}{X} \text{ Avec } X = kW \qquad \text{(II.16)}$$

Avec Si(x) est la fonction intégrale sinus définie comme suit :

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin(t)}{t}dt \qquad \text{(II.17)}$$

- **L'étape finale :** Le calcul des dimensions de ligne d'alimentation peuvent être calculées à l'aide des formules (II-18) et (II-19) [II.17][II.18]:

$$\frac{W_f}{h} = \frac{8e^x}{8e^{2x} - 2} \qquad \text{Pour } W_f/h < 2 \qquad \text{(II-18)}$$

$$\frac{W_f}{h} = \frac{2}{\pi}\left(y - 1 - \ln(2y-1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left(\ln(y-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r}\right)\right) \text{ Pour } W_f/h > 2 \qquad \text{(II-19)}$$

$$x = \frac{Z_C}{60}\left(\frac{\varepsilon_r+1}{2}\right)^{0.5} + \frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \quad \text{(II-20)}$$

$$y = \frac{60\pi^2}{z_c\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \text{(II-21)}$$

$$L_f = 3h \quad \text{(II-22)}$$

2.9 Travaux antécédents

Le travail proposé dans la référence [II.19] ont un gain de 12 dB dans la bande de fréquence de 28 GHz, mais ne garantissant pas une adaptation d'impédance parfaite (-15 dB). Sa taille est de 53×20mm^2, suffisamment grande pour être incorporée dans un téléphone portable.

Hwang [II.20] a proposé une conception de réseau Quasi-Yagi à 4 éléments qui a permis d'obtenir un gain maximal de 9,98 dBi avec une taille totale de 20×8,4 mm^2.

Prabu et al [II.21] proposent également de concevoir et de construire des réseaux d'antennes à huit éléments qui atteignent un gain de 9,89 dB mais ne sont pas adaptés à la technologie 5G.

Dans [II.22], l'antenne imprimée dans un boîtier métallique présente un gain de 11,21 dBi pour une fréquence de fonctionnement de 28 GHz, mais ce gain n'est pas suffisant pour un fonctionnement 5G, et la méthode de conception est très compliquée.

Ali et Sebak [II.23] ont présenté la conception d'un réseau d'antennes imprimées composé de quatre éléments avec le gain le plus élevé de 13,5 dBi.

Dans [II.24], il existe également un réseau d'antennes composé de 8 éléments, qui a atteint un gain de 9,57 dBi pour 28 GHz. Cette conception est très coûteuse. En raison de ces études concernant la conception d'antennes pour la 5G, on constate qu'il est toujours nécessaire de concevoir des antennes qui offrent de bonnes performances avec des tailles qui leur permettent d'être intégrées dans des dispositifs 5G tels que les téléphones cellulaires. Les chercheurs ont tenté de résoudre ce problème dans cette étude [II.25]. Pour concevoir et optimiser une antenne à fente rectangulaire bi-bande en microruban, il est nécessaire d'ajouter des stubs à l'élément rayonnant. Grâce à cette antenne, il est possible d'accéder à une largeur de bande étendue aux fréquences 27,214 - 34,445 GHz et 34,816 - 38,99 GHz.

Awan et al [II.16] ont proposé un réseau d'antennes linéaires à entrées et sorties multiples (MIMO) miniaturisées, à gain élevé et à commutation de fréquence, avec des stubs verticaux. Ces antennes fonctionnent en deux bandes de fréquence 24,8GHz et 28 avec des gains de 16,02 et 15,07 dB, ainsi qu'une bande passante de 2,1GHz et 1,9GHz, respectivement.

Zahra et al [II.17] ont présenté la conception d'une antenne hélicoïdale planaire libre à trou unique pour des applications à large bande à 28 GHz. Cette antenne offre une large bande passante d'impédance de 26,25 à 30,14 GHz, un gain mesuré jusqu'à 5,83 dB et une efficacité de rayonnement mesurée jusqu'à 85 %.

Awan et al [II.18] ont proposé une conception d'antenne reposant sur une paire de patchs parasites disposés linéairement à proximité de cette antenne classique. Elle offre une bande passante de 7,1 GHz, un large diagramme de rayonnement et un gain supérieur à 10 dB.

Hussain et al [II.19] ont proposé une antenne patch compacte à large bande et sa configuration MIMO pour des applications à 28 GHz. Ils ont ajouté une structure de déformation dans le plan de masse pour l'un des éléments de ce réseau afin d'améliorer de manière significative la bande passante.

Zahra et al [II.20] ont présenté une antenne à large bande inspirée d'une antenne hélicoïdale à 28 GHz et sa configuration MIMO pour des applications de diversité de motifs 5G. Cette antenne présente initialement une géométrie simple inspirée d'une antenne hélicoïdale planaire conventionnelle sans utiliser de vias. Elle offre une bande passante de 3,89 GHz, un gain de 5,83 dB, ainsi qu'une efficacité de rayonnement de 88 %. En effet, le système de communication sans fil 5G nécessite des antennes très performantes en termes de gain, de directivité, de coefficient de réflexion, de bande passante et d'efficacité. Par ailleurs, ces travaux permettent d'obtenir une image nette des antennes 5G.

2.10 **Cahier de charge pour les antennes imprimées de la 5G**

Pour concevoir les antennes imprimées pour la 5G, il est nécessaire de répondre aux caractéristiques présentées dans le tableau II-2 [II.15-II.20].

Tableau II- 2: Spécification pour les antennes imprimées dédiées à la 5G

caractéristiques	**Valeurs**
Coefficient de réflexion S_{11}	< - 10 dB
Gain	> 4 dB
Directivité	> 5 dB
Bande passante	> 0.4 GHz
ROS	$1 \leq ROS \leq 2$
Efficacité (%)	> 60

3 Etude et conception d'une antenne imprimée opérationnelle à 27,5 GHz

3.1 Méthode de conception

Depuis les succès des systèmes sans fil, des progrès technologiques rapides ont été réalisés au fil des ans. Des avancées technologiques gigantesques ont été observées au cours de la dernière décennie dans le domaine des communications cellulaires sans fil. Cette évolution a entraîné une pénurie de la bande passante mondiale, ce qui pose des problèmes aux fournisseurs de services. Toutes les applications sans fil ont été limitées à une gamme de fréquences de 700 MHz et 2,6 GHz. En raison de l'indisponibilité du spectre, qui est surchargé dans les basses fréquences, il est devenu nécessaire de passer à des hautes fréquences. Il convient de noter que pour surmonter les difficultés liées à l'obtention de la bande passante nécessaire aux systèmes sans fil de la 5G, il est nécessaire d'utiliser les bandes millimétriques.

La gamme de fréquence entre 24 GHz et 29 GHz est largement utilisée parce que les absorptions atmosphériques sont relativement plus faibles et que le taux d'atténuation est plus faible. Étant donné que le spectre de fréquences et la bande passante disponibles sont également mentionnés dans les bandes millimétriques, celles-ci représentent des solutions intéressantes aux systèmes 5G. Le problème le plus important est la perte de trajet. Par comparaison aux bandes de basses fréquences associées aux communications mobiles, la perte de trajet liée à la 5G est élevée. De ce fait, il est nécessaire de disposer des antennes adaptées à ces systèmes ayant des gains élevés. Pour cela, nous avons travaillé sur la conception d'une antenne patch rectangulaire avec deux fentes fonctionnant à 27,5 GHz dans le cadre de l'application 5G, comme illustré à la figure II-12. Le rôle de ces fentes S_1 et S_2 est d'obtenir les meilleurs performances [II.21]. L'antenne proposée a été imprimée sur un substrat de type polyamide de permittivité $\varepsilon r = 4,3$. Le convertisseur quart d'onde est une ligne micro ruban utilisé pour assurer une adaptation d'impédance correcte. Nous suivons la procédure précédente pour concevoir cette antenne. Les paramètres de cette antenne sont indiqués dans le tableau II-3. La conception de l'antenne développée, telle qu'elle a été calculée, est illustrée à la figure II.12. Ces données sont utilisées pour optimiser l'antenne en termes de bande passante et pour minimiser ses dimensions.

Tableau II- 3: Dimensions de l'antenne proposées dans cette étude

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
L_S	4,678	L_T	1,1
W_S	4,55	W_T	0,5
h	0,15	L_f	0,9
W	2,57	W_f	0,2
L	3,35	S_1	1,7mm×0,2mm
		S_2	0,6mm×0,3mm

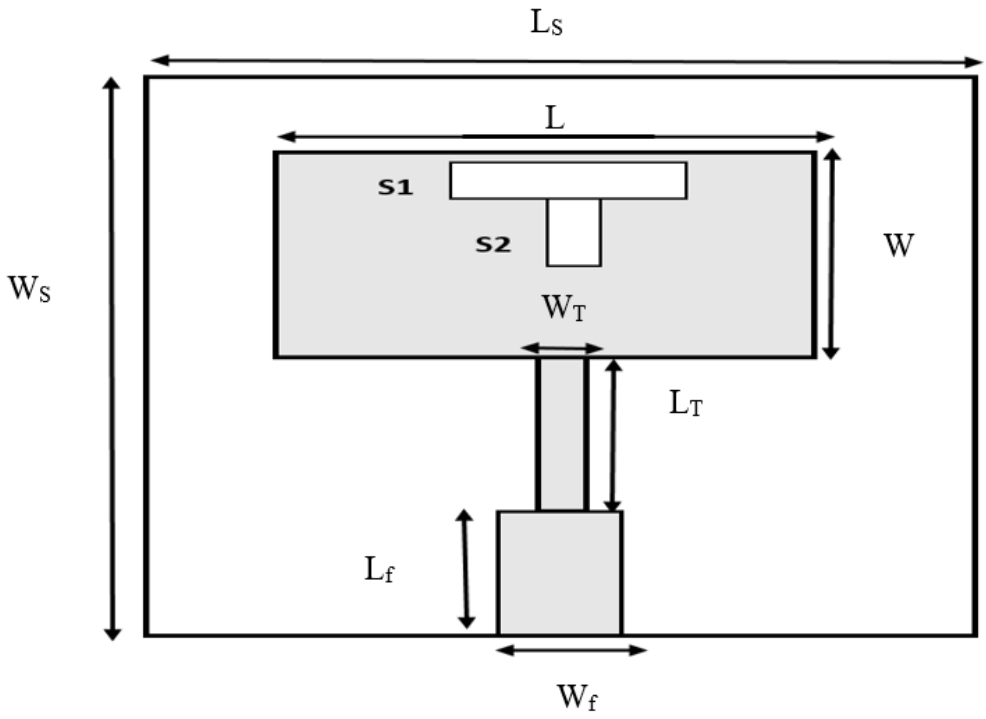


Figure II. 12: Structure de l'antenne patch en microruban conçue

3.2 Résultats des simulations

Dans cette section, nous présentons les simulations effectuées lors de la conception de l'antenne proposée, dont les principales caractéristiques sont : des caractéristiques électriques telles que le coefficient de réflexion S_{11}, le rapport d'ondes stationnaires ROS, et la bande passante, ainsi que des caractéristiques de rayonnement telles que le gain et la directivité. Nous avons effectué ce travail à l'aide de logiciel de simulateur de structure haute fréquence (HFSS).

Les caractéristiques électriques de cette conception sont représentées comme suit : La Figure II.13 illustre graphiquement le S_{11}. Il présente un décalage de 0,5 GHz par rapport à la fréquence

de fonctionnement 27,5 GHz. Celui-ci se produit à cause des problèmes d'adaptation. Nous avons amélioré ces problèmes dans le travail suivant. De plus, la Figure II.14 représente la courbe du ROS en fonction de la fréquence. On peut également constater que le ROS ne dépasse pas les spécifications liées au cahier de charge, à savoir la condition de $1 \leq ROS \leq 2$.

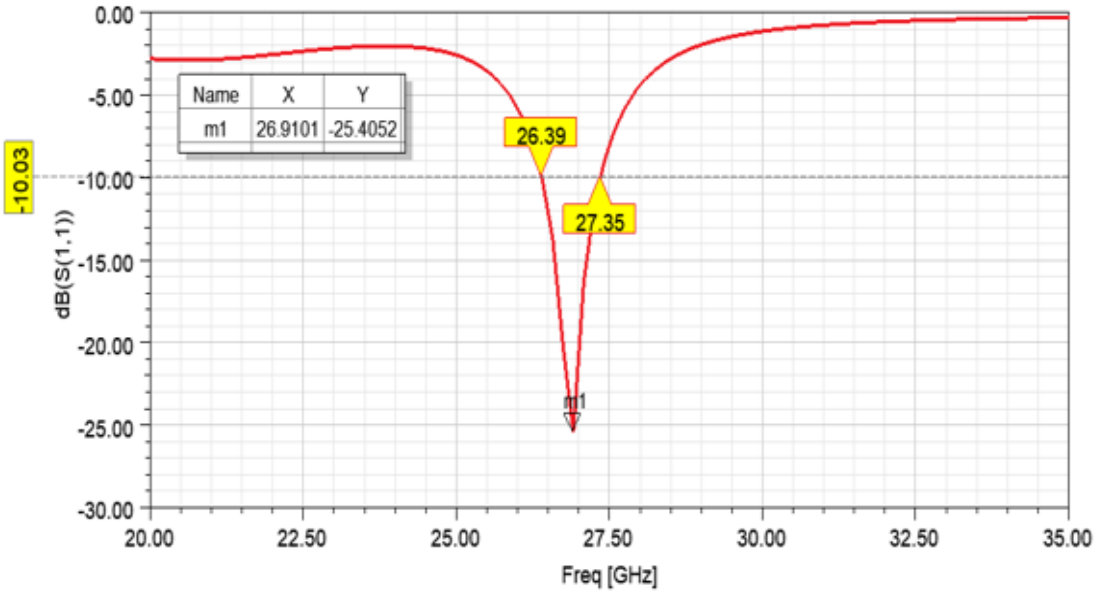


Figure II. 13: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne proposée dans cette recherche

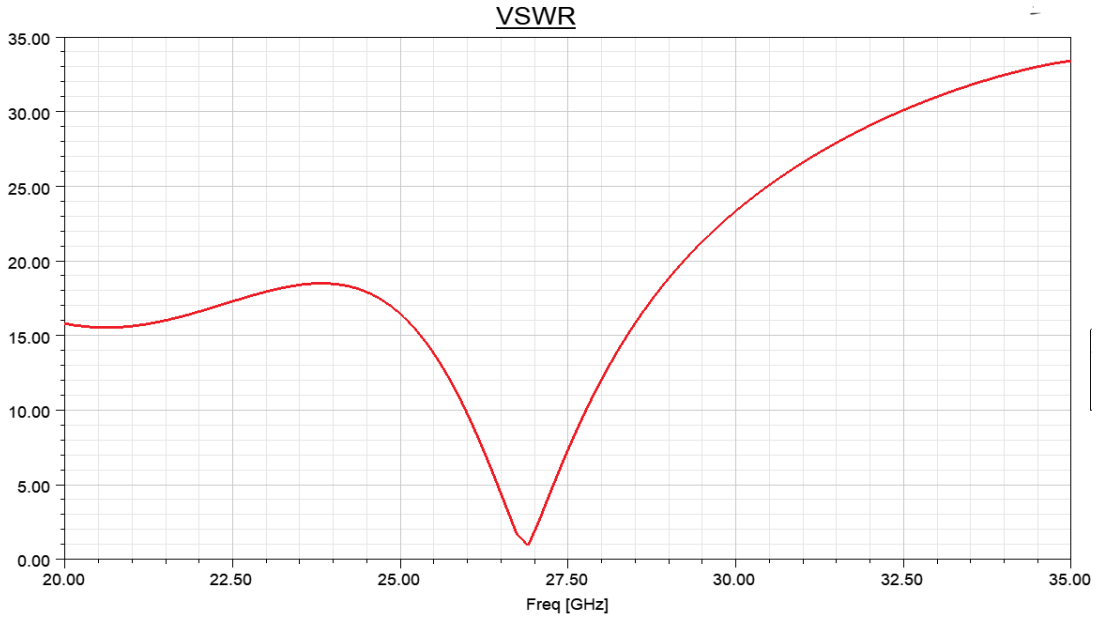


Figure II. 14: Rapport d'onde stationnaire de l'antenne conçue

Les caractéristiques de rayonnement de cette antenne sont présentes sur la Figure II.15 qui illustre graphiquement le diagramme de gain en trois dimensions et en deux dimensions. Et la Figure II.16 qui représente le diagramme de directivité en trois dimensions et en deux dimensions.

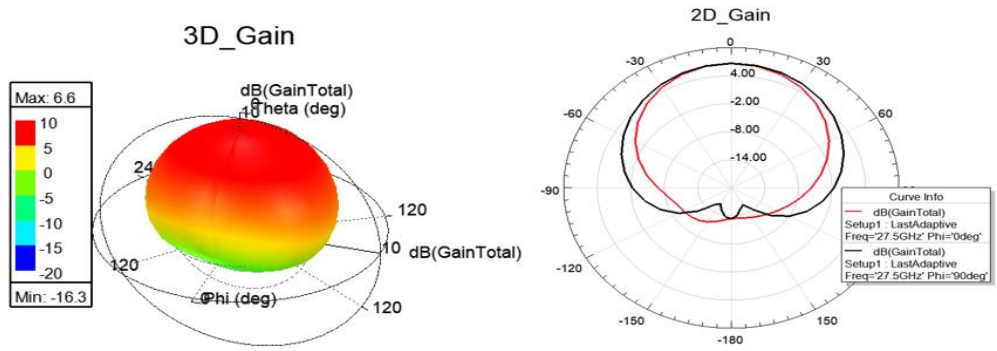


Figure II. 15: Diagramme de rayonnement de gain en 3D et en 2D

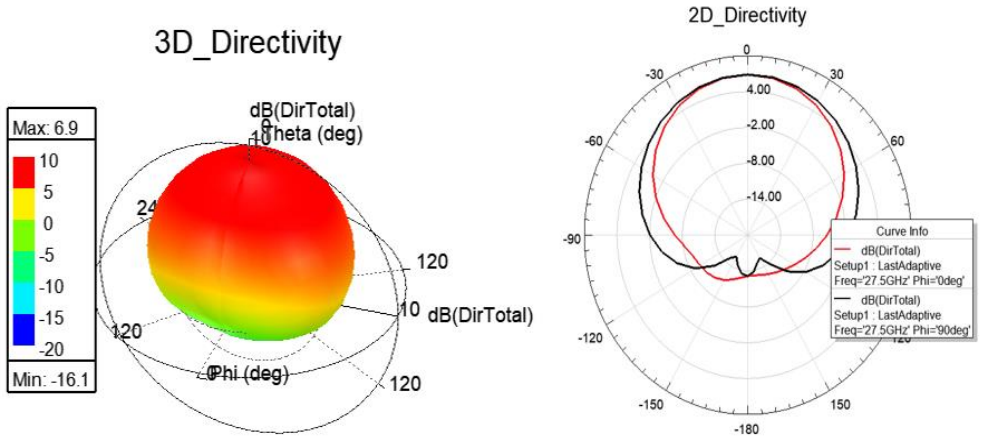


Figure II. 16: Diagramme de rayonnement de directivité en 3D et en 2D

Nous résumons les valeurs numériques de ces caractéristiques dans le tableau II-4 au-dessous :

Tableau II- 4: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Directivité (dB)	Gain (dB)	η (%)
Valeurs numériques	-25,40	1,09	0,96	6,9	6,6	95,65

Pour améliorer les performances de cette antenne, en particulier son gain, sa directivité et sa bande passante, nous proposons la conception d'un nouveau réseau d'antennes qui consiste en plusieurs éléments d'antenne en parallèle. Ils offrent une meilleure radiation, ainsi qu'un gain élevé et une efficacité plus élevés, et fonctionnent à la même fréquence (27,5 GHz) avec la même impédance d'entrée (50 Ω).

4 Étude et conception de réseaux d'antennes rectangulaires imprimées en microruban à une fréquence de fonctionnement de 27,5 GHz pour les applications 5G

Dans cette étude, nous avons amélioré l'antenne précédente à l'aide de la technique d'adaptation. Son objectif consiste à obtenir une bonne adaptation et à récupérer la fréquence de résonance comme indiqué dans le tableau II-5. Par ailleurs, nous utilisons cette antenne pour concevoir deux réseaux d'antennes, l'un sous forme (1×2) et l'autre sous forme (1×4).

Tableau II- 5: comparaison entre les caractéristiques de l'antenne précédente et celles de l'antenne améliorée

Caractéristiques	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Directivité (dB)	Gain (dB)	η (%)
Antenne précédente	26 ,91	-25,40	1,09	0,96	6,9	6,6	95,65
Antenne améliorée	27,08	- 28,15	1,08	1,03	6,3	6,7	92,64

En outre ce travail passe par deux étapes, la première étape est la conception d'un réseau d'antennes composé de deux éléments d'antenne identique présentée précédemment, ces éléments posés en parallèle entre eux. De plus nous utilisons ce réseau pour construire un autre réseau composé de deux réseaux posés parallèle entre eux comme le montre la figure II.17 ainsi leurs valeurs numériques illustrés dans le tableau II-6. Le but principal de ce travail est l'obtention de meilleures performances qui repondent aux besoins de la 5G.

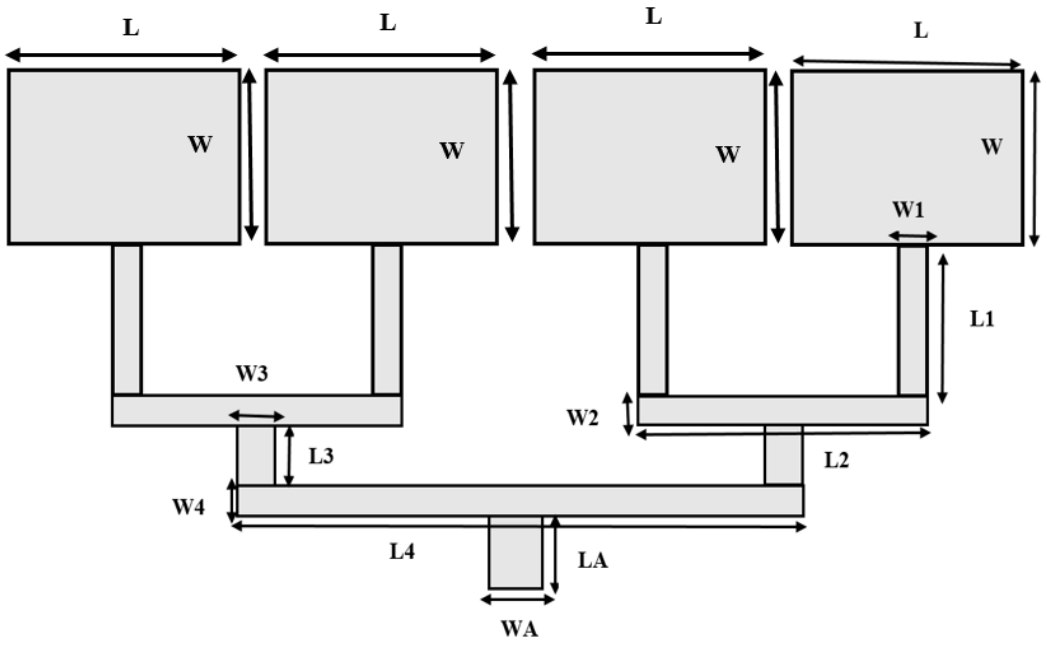
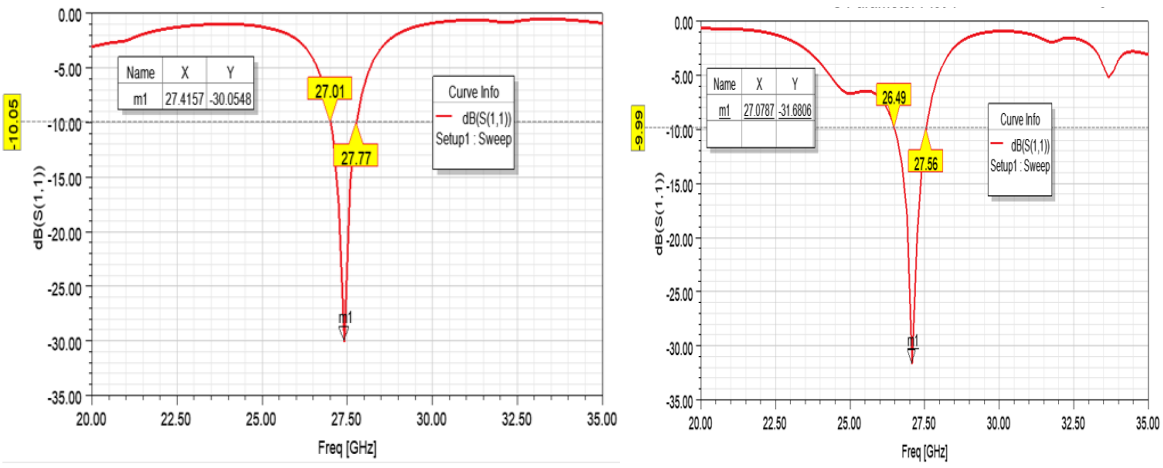


Figure II. 17: Réseau d'antennes conçus (1×4)

Tableau II- 6: paramètres de réseau d'antenne conçue

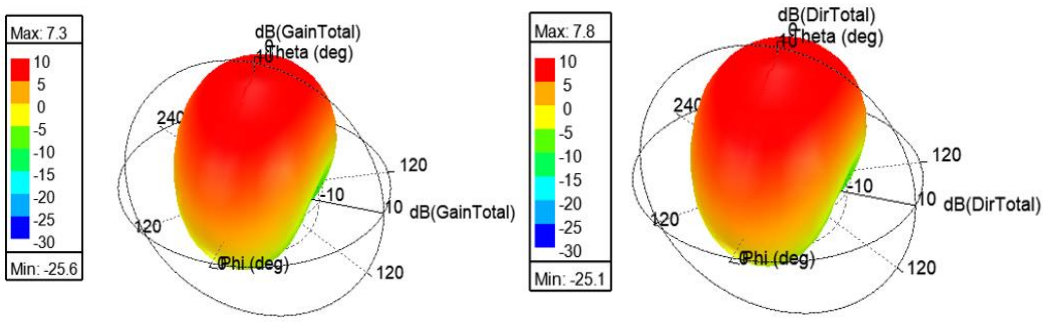
Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
Longueur de substrat L_s	9,1	L_2	4,95
Largeur de substrat W_s	4,5	W_2	0,2
Hauteur de substrat h	0,15	L_3	0,2
W	2,578	W_3	0,2
L	3,35	L_4	9,7
L_1	0,2	W_4	0,2
W_1	0,2	(W_A - L_A)	(1,022 - 0,3)

Pour les résultats simulation : L'antenne patch unique résonne à 27,0787 GHz avec une valeur de mesure de coefficient de réflexion (S_{11}) égale à - 28,1548 dB, une valeur de bande passante égale à 1,03 GHz, un ROS de 1,081, une valeur de gain égale à 6,3 dB, une valeur de directivité égale à 6,7 dB, et une efficacité de rayonnement de 92,64 %. Dans le cas d'un réseau d'antennes composé de deux éléments (1×2), il améliore considérablement les résultats réalisés avec une seule antenne, en particulier en termes de S_{11} comme le montre la figure II.18(a), de gain et de directivité comme le montre les figure II.19(a) et figure II.19(b). Ainsi, dans le cas d'un réseau d'antennes composé de 1×4, il améliore avec succès les performances suivantes : S_{11} comme le montre la figure II.18(b), gain, bande passante et directivité voir les figure II.19(a) et figure II.20(b), à une fréquence de résonance de 27,078 GHz. Les structures de ces réseaux sont citées dans [II.22]. Par ailleurs, ces antennes sont adaptées à la gamme de fréquences de 30 GHz et sont également applicables au système de communication mobile 5G.



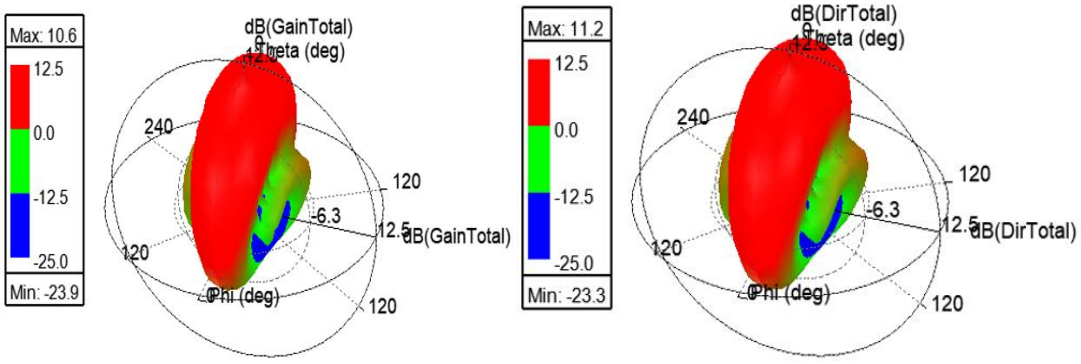
(a) (b)

Figure II. 18: (a) Courbe de S_{11} de réseau d'antenne 1×2, (b) Courbe de S_{11} de réseau d'antenne 1×4



(a) (b)

Figure II. 19: (a) diagramme de gain en 3D et (b) diagramme de directivité en 3D de réseau d'antenne 1×2



(a) (b)

Figure II. 20: (a) diagramme de gain en 3D et (b) diagramme de directivité en 3D de réseau d'antenne 1×4

Les valeurs numériques de ces caractéristiques sont résumées dans le tableau II-7 suivant :

Tableau II- 7: Caractéristiques de l'antenne conçue

antennes	f_{res} (GHz)	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Gain (dB)	Directivité (dB)	η (%)
unique	27,08	- 28,15	1,08	1,03	6,3	6,7	92,64
1×2	27,42	-30	1,06	-	7,3	7 ,8	93,6
1×4	27,08	-31,7	1,05	1,07	10,6	11,2	94,5

En effet, d'après nos recherches, nous trouvons que les antennes fonctionnant à la fréquence de 28 GHz sont plus utilisées que celles qui fonctionnent à la bande de fréquences de 27,5 GHz. Pour cette raison, nous avons proposé, la partie suivante, une antenne et un réseau d'antennes dont la fréquence de fonctionnement est de 28 GHz.

5 Etude et conception d’une antenne imprimée opérationnelle à 28 GHz

5.1 Méthode de recherche

Les antennes occupant le compartiment le plus grand dans la chaîne de communication, posent le problème de la taille qui empêche leur implantation dans les dispositifs électroniques de la 5G comme les téléphones cellulaire. Les concepteurs rencontrent plusieurs difficultés liées à la conception des antennes patches. Pour résoudre ces problèmes, nous avons utilisé les techniques permettant de miniaturiser celles-ci, notamment les encoches [II.23]. Dans cette partie, nous proposons la conception d`une antenne patch microruban rectangulaire dotée de fentes, pour améliore ses performances [II.24]. Cette antenne ayant des dimensions de 4,2 mm × 3,3 mm × 0,5 mm fournit des performances améliorées, pour une fréquence résonnante de 28 GHz, pour la technologie de communication sans fil 5G.

Pour concevoir une antenne patch microruban, il faut d'abord déterminer sa largeur et sa longueur. Ensuite, la première chose à faire est de sélectionner le substrat correspondant avec une hauteur (h) appropriée. Pour cette antenne, nous avons choisi un substrat de type plaque Roger RT duroid 5880 ; sa constante diélectrique est égale à 2,2, son coefficient ou tangente de dissipation est égal à 0,0009, et son épaisseur a été fixée à 0,5mm. De plus, nous définissons les dimensions du patch et de l'alimentation, et cette dernière est positionnée de manière appropriée pour un fonctionnement à 28 GHz. Puis, quelques modifications sont apportées à la structure de l'antenne pour obtenir un bon résultat de fonctionnement de celle-ci. Pour assurer une bonne performance de rayonnement, les caractéristiques du patch doivent être étudiées dans les phases suivantes ; la sélection de la hauteur du substrat est un point crucial dans la construction d'une antenne car elle influence de manière significative la performance de l'antenne microruban [II.28]. Pour cette antenne, l'une des hypothèses est d'obtenir la meilleure largeur de bande possible. En augmentant l'épaisseur du substrat, on obtient une meilleure bande passante de l'antenne alors que son efficacité diminue. Le calcul de la valeur maximale de la hauteur du substrat a été déterminé à partir de la relation précédemment expliquée. Le tableau II-8 présente tous les paramètres de cette antenne proposée, sa structure est présentée dans la figure II.21. On a utilisé les deux outils HFSS et CST pour vérifier et confirmer la fonctionnalité et les résultats des simulations de cette antenne.

Tableau II- 8: Dimensions de l'antenne proposées dans cette étude

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
L	3,3	(L_f - W_f)	(1,54 - 3,26)
W	4,2	g	0,77
W_S	10,3	W_{Fe}	0,15
L_S	9	L_{Fe}	0,06
h	0,5	y_0	1

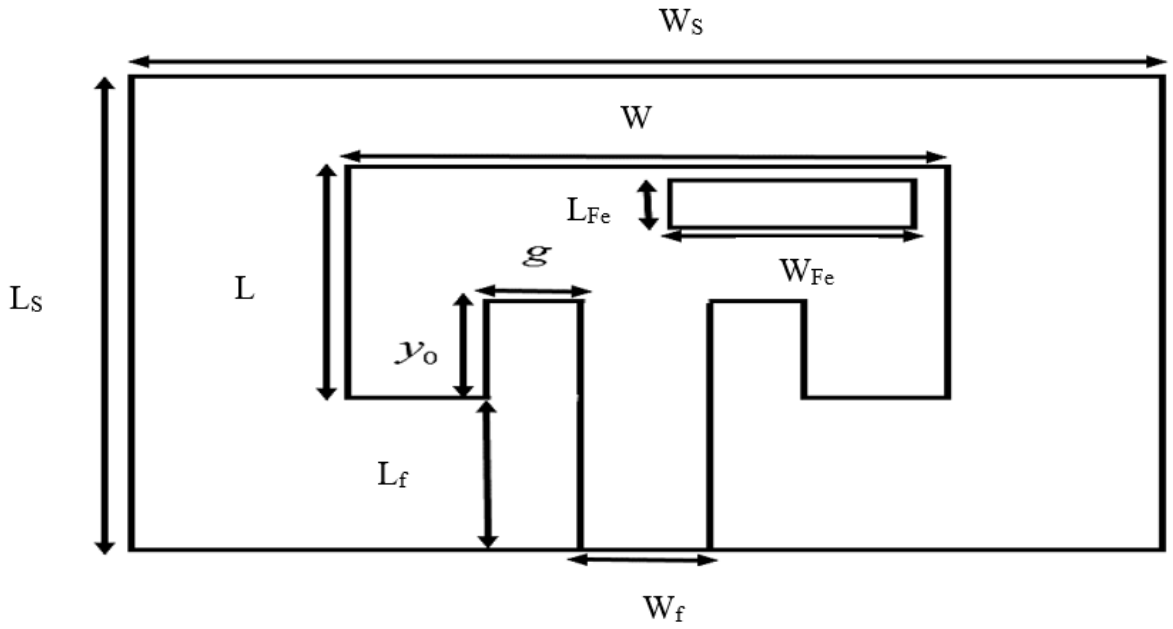
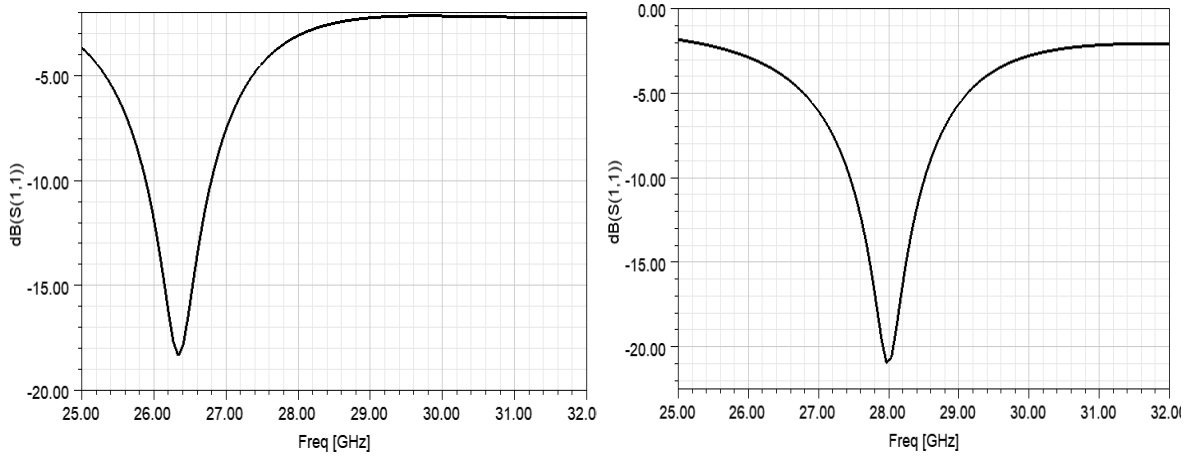


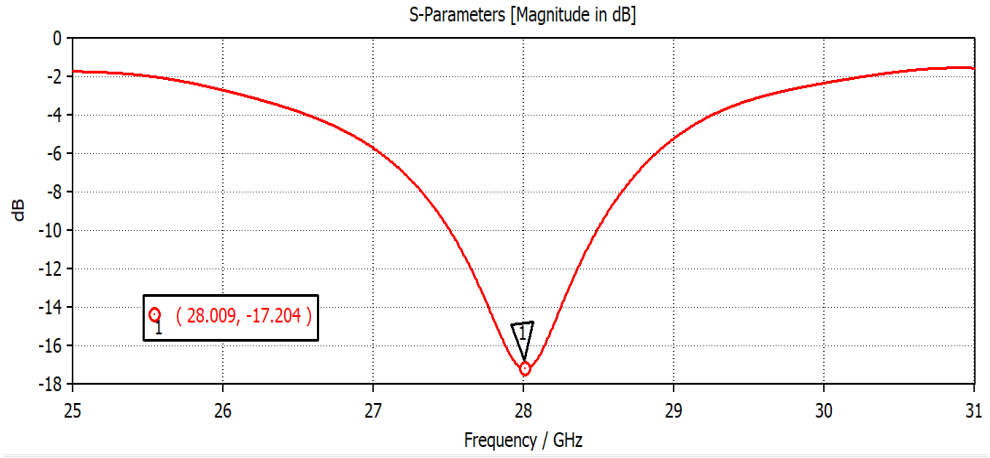
Figure II. 21: Structure de l'antenne présentée

5.2 Résultats des simulations et discussions

La figure II.22 (a), représente la courbe S_{11} de cette antenne proposée sans fente, avec une bande passante de 0,91 GHz (25,89 GHz - 26,8 GHz) pour la fréquence de résonance de 26,34 GHz. Lorsque nous ajoutons la fente, nous obtenons de meilleurs résultats que les précédents, comme le montrent les figures II.22(b) et II.22 (c). La fréquence de fonctionnement est de 27,97 GHz, S_{11} = -20,95 dB, la bande passante est de 1,06 GHz et le ROS = 1,197. Ce coefficient S_{11} simulé prouve que l'antenne résonne avec une large bande passante aux fréquences de communication de la 5G. La simulation du rapport d'ondes stationnaires (ROS) est réalisée par les simulateurs HFSS et CST (illustration de la figure II.23(a) et de la figure II.23(b). Dans la bande passante, ce ROS doit être compris entre 1 et 2. Ce rapport doit tendre vers 1 pour que la transmission de puissance de l'antenne soit maximisée. On constate que la valeur du ROS est de 1,197 pour la fréquence de fonctionnement de cette antenne.

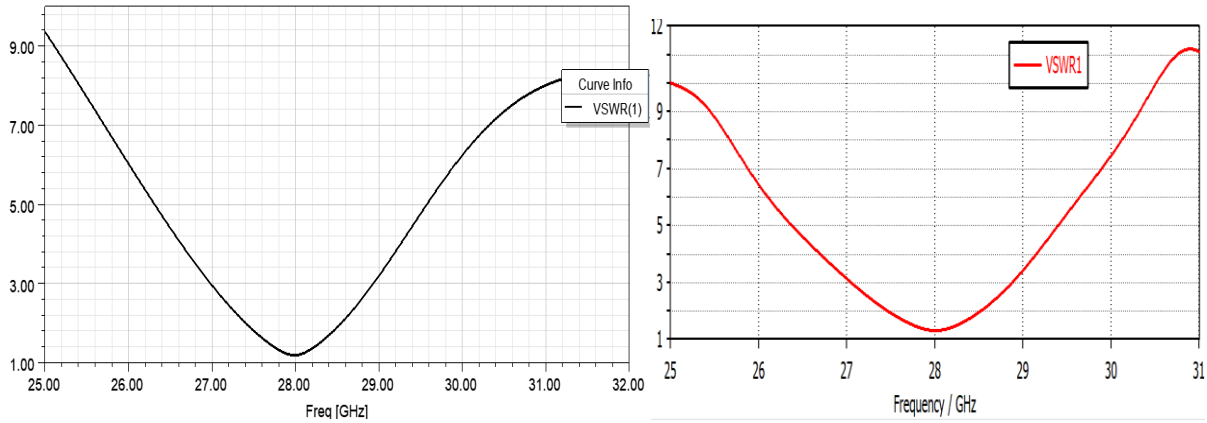


(a) (b)



(c)

Figure II. 22: Les courbes S_{11} sont obtenues par HFSS (a) et (b), et par CST (c).



(a) (b)

Figure II. 23: Courbe du ROS à l'aide de : (a) HFSS et (b) CST

Le diagramme de rayonnement est une autre caractéristique importante des performances de l'antenne. Ce diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions de l'espace. Il montre les directions de l'espace (θ_0, φ_0)

dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. Les figures (de II.24 à II.27) montrent les diagrammes de rayonnement tridimensionnel et bidimensionnel de l'antenne proposée.

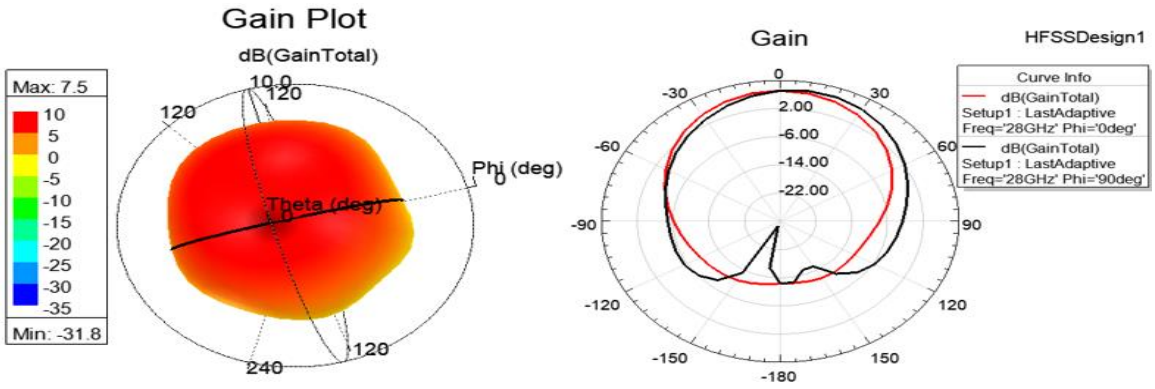


Figure II. 24: Représentation graphique du gain en 3D et en 2D, à l'aide de HFSS

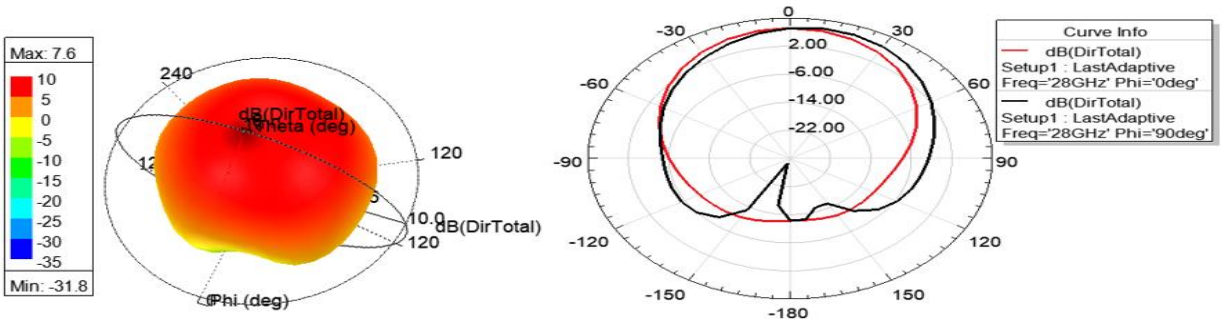


Figure II. 25: Représentation de la directivité en 2D et 3D à l'aide du logiciel HFSS

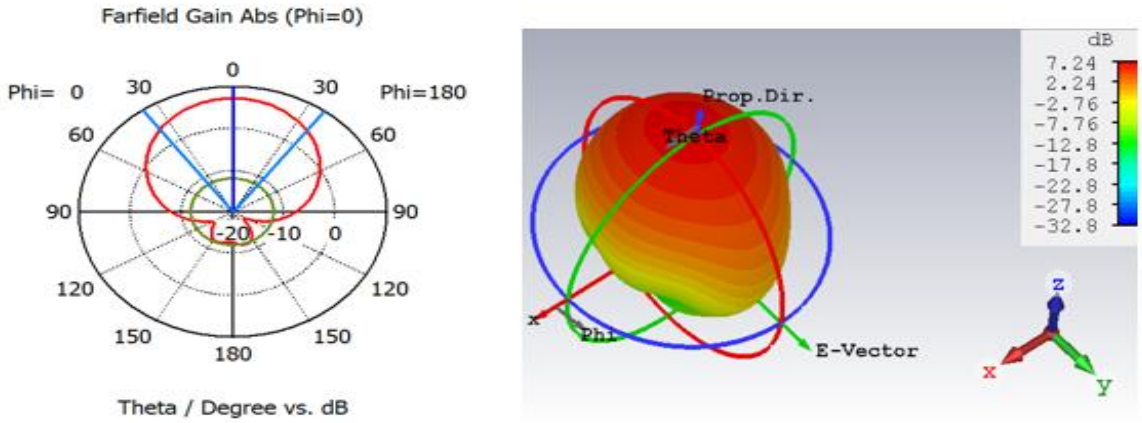


Figure II. 26: Diagramme de rayonnement du gain en 3D et en 2D sur CST

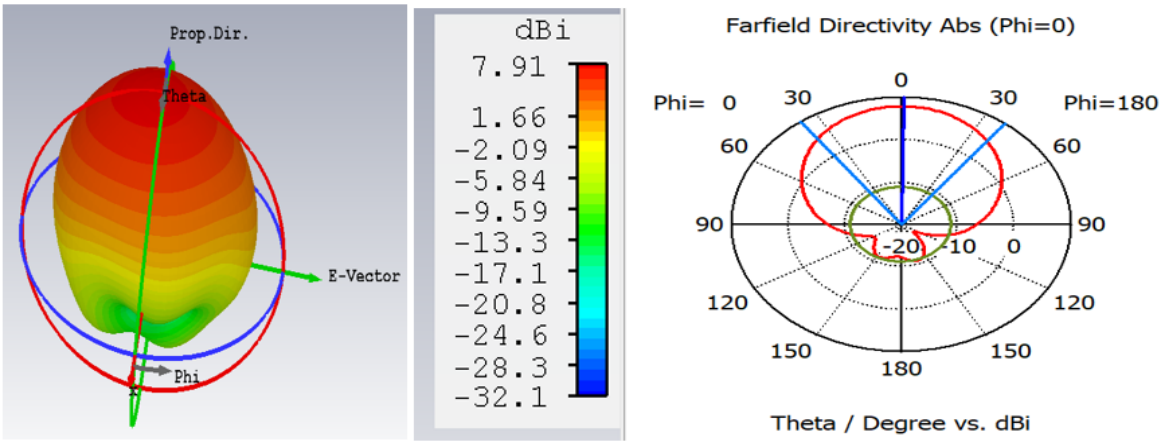


Figure II. 27: Représentation de la directivité en 3D et en 2D à l'aide du logiciel CST

Le tableau II-9 présente un résumé de tous les résultats de simulation autour de cette antenne avec et sans fente. Il compare les performances avec et sans fente de l'antenne proposée, y compris le gain, la directivité, la bande passante, le S_{11}, le ROS, la puissance rayonnée et la puissance acceptée. Les caractéristiques propres à une antenne sans fente, notamment le gain, la directivité et le ROS, sont meilleures que celles de l'antenne à fente, mais les caractéristiques de l'antenne à fente, telles que la bande passante, le S_{11}, la puissance rayonnée et la puissance acceptée, sont meilleures que celles de l'antenne sans fente. Par ailleurs, le tableau II-10 compare les performances de l'antenne proposée avec les outils HFSS et CST. Une fois de plus, les deux outils sont presque identiques dans leurs résultats de simulation.

Tableau II- 9: Résultats des simulations de cette antenne

Performances	Antenne sans fente	Antenne avec fente
Coefficient de réflexion (dB)	-18,35	-20,95
Bande passante (GHz)	0,91	1,06
ROS	1,275	1,19
Gain (dB)	8	7,5
Directivité (dB)	7,9	7,6
Efficacité (%)	99,48	99,83%
Puissance rayonnée (dBm)	27,23	29,90
Puissance acceptée (dBm)	27.09	29.95

Tableau II- 10: Comparaison des résultats des simulations avec les outils HFSS et CST

Performances	CST	HFSS
Fréquence de résonance (GHz)	28,008	27,97
Coefficient de réflexion (dB)	-17,2	-20,95
Bande passante (GHz)	0,97	1,06
ROS	1,32	1,19
Gain (dB)	7,24	7,5
Directivité (dB)	7,9	7,6
Efficacité (%)	87,75	99,83

Pour améliorer les performances de cette antenne, en particulier son gain, sa directivité et sa largeur de bande, nous proposons la conception d'un nouveau réseau d'antennes composé de deux éléments d'antenne en série, et nous l'utilisons également pour concevoir un nouveau réseau composé de deux antennes offrant un meilleur rayonnement, ainsi qu'un gain et une efficacité plus élevés, et fonctionnant à la même fréquence (28 GHz) avec la même impédance d'entrée (50 Ω).

6 Étude et conception de réseaux d'antennes rectangulaires imprimées microruban à 28 GHz pour les applications 5G

Dans cette section, nous proposons d'abord une conception d'antenne à patch microruban unique, y compris sa structure géométrique de format rectangulaire. Les paramètres de cette antenne illustrée dans le tableau II-8. Ensuite, nous utilisons ce composant pour réaliser la conception d'un réseau d'antennes patch microruban en deux antennes patch rectangulaires connectées en série sous la forme 1×2 que nous concevons, chacune ayant une fente rectangulaire en bande millimétrique pour la 5G avec une fréquence de fonctionnement de 28 GHz comme le montre la figure II.28. Ce réseau assure une meilleure performance en termes de S_{11}, de bande passante, de gain, de directivité et d'efficacité pour les systèmes de communication sans fil de la cinquième génération (5G). Nous utilisons la technique de la ligne d'alimentation microruban pour concevoir ce réseau d'antennes. Elle offre la meilleure bande passante, elle est facile à modéliser et présente un faible rayonnement parasite. Ainsi,

nous avons choisi un substrat de type Rogers RT/duroid® 5880, avec une permittivité relative de 2,2, une épaisseur de h = 0,5 mm et une tangente de perte de 0,0009. La simulation de ce réseau présente différents paramètres : Le coefficient S11 (voir figure II.30 (a)), le rapport d'ondes stationnaires (ROS) (voir figure II.30 (b)), le gain (voir figure II.31), la directivité (voir figure II.32), la puissance rayonnée : 29,94 dBm, la puissance acceptée : 29,99 dBm, et l'efficacité : 99,83 %. Le réseau d'antennes proposé a obtenu de meilleures performances que d'autres réseaux d'antennes récemment publiés dans des revues scientifiques en ce qui concerne la bande passante, le gain, le coefficient de réflexion, le ROS, la puissance rayonnée, la puissance acceptée et l'efficacité.

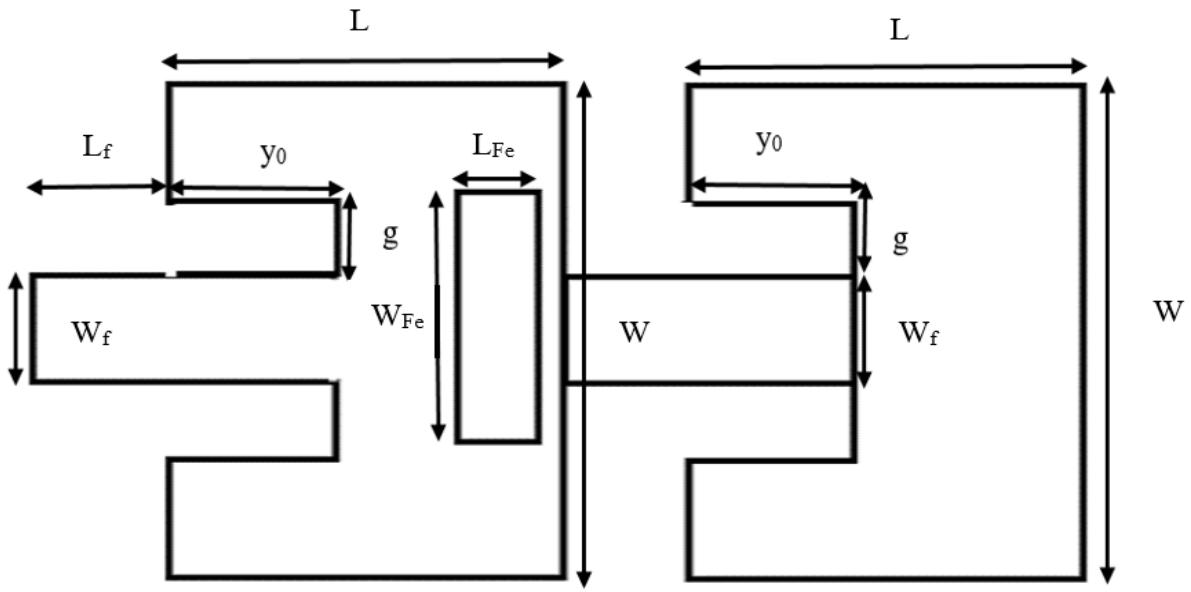
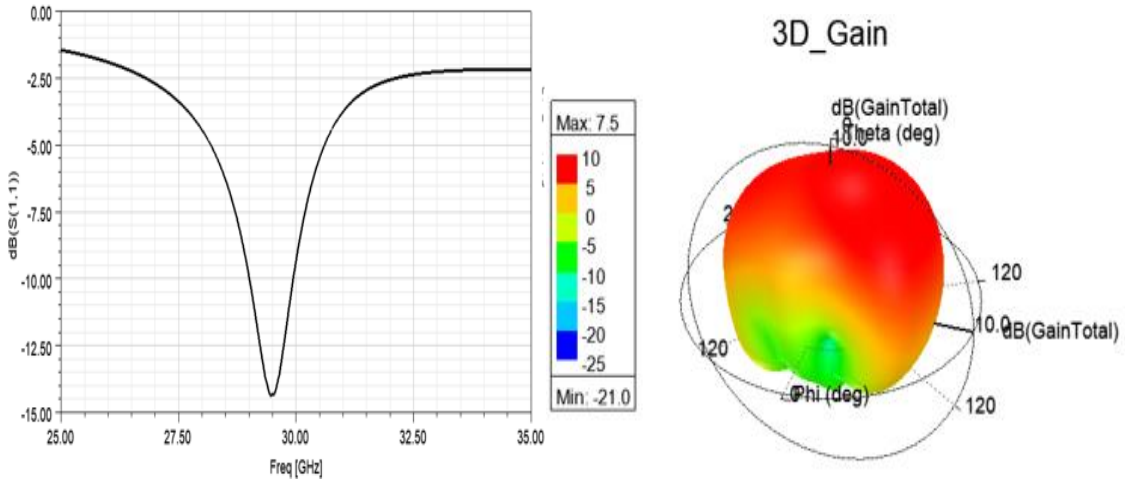
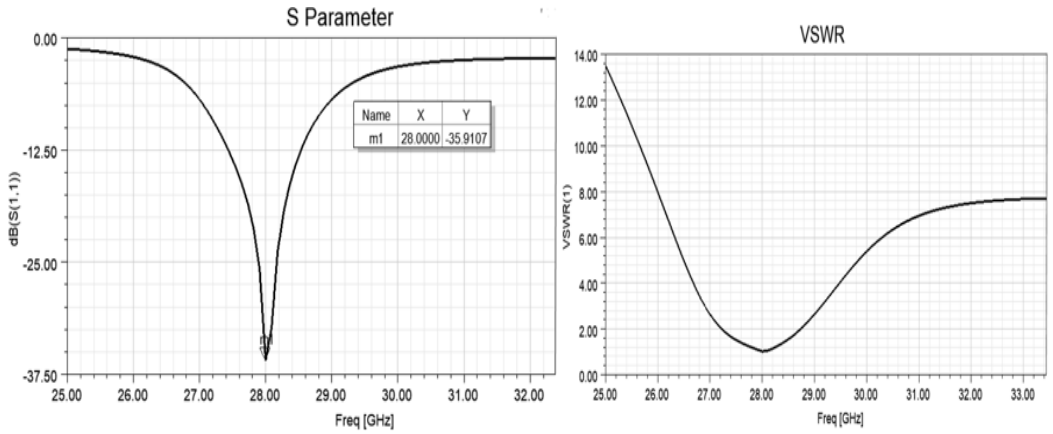


Figure II. 28: Géométrie du réseau d'antennes proposé



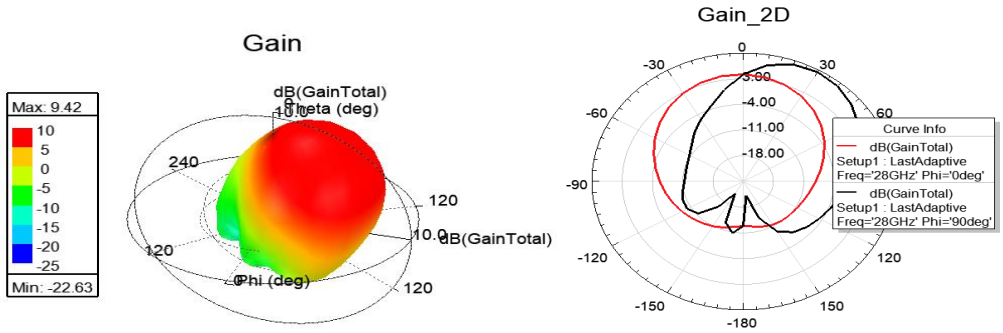
(a) (b)

Figure II. 29: (a) Courbe de S_{11} et (b) diagramme de gain 3D de l'antenne unique proposée



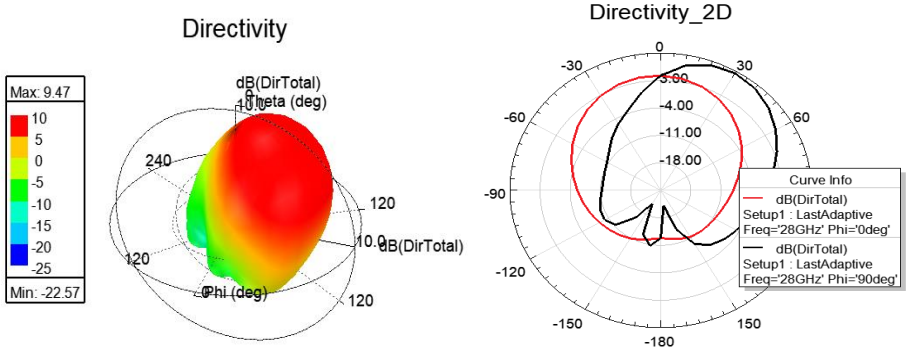
(a) (b)

Figure II. 30: (a) courbe S_{11} et (b) courbe VSWR du réseau d'antennes proposé



(a) (b)

Figure II. 31: (a) diagramme de gain 3D et (b) diagramme de gain 2D du réseau d'antennes proposé



(a) (b)

Figure II. 32: (a) diagramme de directivité 3D et (b) diagramme de directivité 2D du réseau d'antennes proposé.

Nous résumons les valeurs numériques de ces caractéristiques dans le tableau II-11 :

Tableau II- 11: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	**S_{11} (dB)**	**ROS**	**Bande Passante (GHz)**	**Directivité (dB)**	**Gain (dB)**	**η (%)**
Valeurs numériques	-35,91	1,03	1,43	9,47	9,42	99,83

7 Analyse comparative des résultats de ces travaux proposés par rapport aux résultats de la bibliographie

Le tableau II-12 présente une comparaison entre les performances de nos antennes conçues et celles publiés récemment par les revues scientifiques spécialises autour de la bande de fréquences de 30 GHz. Cette comparaison concerne les tailles des antennes, les nombres des éléments des réseaux d'antennes, les directivités, les gains, les coefficients de réflexion S_{11}, les rapports d'ondes stationnaires ROS, les bandes passantes et les efficacités. Dans ce tableau, nous constatons que les travaux proposés génèrent des performances meilleures que les autres études disponibles.

Tableau II- 12: Résultat de la comparaison entre cette antenne et les antennes des travaux existants.

Réf	**Tailles (mm^3)**	**Fr (GHz)**	**S_{11} (dB)**	**ROS**	**BP(GHz)**	**Gain (dB)**	**Directivité (dB)**	**η %**
[II.28]	7×7×0.8	28	-27.79	1.08	-	6.59	7.45	82.08
[II.29]	6.285×7.235×0.5	28	-13.48	1.53	0.847	6.63	-	70.18
[II.30]	19×25×0.5	28	-	-	0.445	7.88	-	92.2
[II.31]	59×97×1.6	28	-14	1.49	0.54	1.89	5.35	-
[II.32]	7×7×0.8	28	-35.73	1.03		5.57	-	-
[II.33]	5.3×5.35 ×0.127	28	-	-	0.47	6.61	-	-
[II.34]	5.4×7.6×2.9	-	-	-	0.4	6.21	-	-
	Elément : 1×1	28	-20.53	1.2	0.4	6.2	8	77.72
	Elément : 2×2	28	-19.66	1.23	0.4	8.39	10.13	82.85
[II.35]	13.59 × 12× 1.75	28	-22.5	1.16	5.57	5.06	-	80.18
[II.36]	6× 6 × 0.1	28	-18.062	-	-	-	6.94	-
[II.37]	5.5 × 5.4× 0.4	28	-18.25	-	1.074	6.83	-	-
[II.38]	Elément : 1×1	28	-32.54	1.04		6.01	-	-
	Elément : 2×2	28	-31.61	1.05		7.18	-	-
[II.39]	-	28	-31.61	1.05	4.127	6.01	-	-
[II.40]	-	28	-22	1.17	1.3	10	-	85
[II.41]	-	28	-20.31	1.21	0,526	10.2	10.79	97.94
[II.42]	2*2	28	-87	˜1	1.14	14	14.3	93.5
[II.43]	1*2	28	-24	1.13	-	9.66	-	-
[II.44]	5	28	-30	1.06	1.06	11.2	-	-

[II.45]	13	28	-22	1.17	0.9	8.42	-	93
A.P	4.55×4.678×0.15	27.5	-25.4	1.11	0.96	6.6	6.9	-
	4.2 × 3.3×0.5	28	-20.95		1.06	7.5	7.6	99.83
	Elément : 1×1	27.5	-30	1.06	0.76	7.3	7.8	90.4
	Elément : 2×2	27.5	-31.68	1.05	1.07	10.6	11.3	88.79
	1*2	28	-35.91	1.03	1.43	9.42	9.5	99.8

Avec : **A.P** : Antenne proposée, Fr : Fréquence de résonance, BP : Bande passante, PA : Puissance Accepté, et PR : Puissance Rayonnée.

8 Conclusion

Dans ce chapitre, notre travail se résume en trois parties : La première partie comprend l'introduction générale ainsi que toutes les études concernant l'antenne imprimée telles que la définition, le principe de fonctionnement, les mécanismes de rayonnement, les techniques d'alimentation, l'adaptation d'impédance, les caractéristiques, les réseaux d'antennes imprimées, les avantages et les inconvénients, les applications, la procédure de conception, et les travaux antérieurs.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé une conception de l'antenne patch microruban, de structure géométrique rectangulaire. Ensuite, nous avons utilisé ce composant pour réaliser la conception d'un réseau d'antennes patch microruban, composé de deux antennes patch rectangulaires, puis de quatre antennes patch en bande millimétrique pour la 5G dont la fréquence de fonctionnement est de 27,5 GHz.

Dans la troisième partie, nous avons conçu une antenne unique de type patch microruban, y compris sa structure géométrique de format rectangulaire. Ensuite, nous avons utilisé ce composant pour réaliser la conception d'un réseau d'antennes patchs microruban à deux antennes patchs rectangulaires, chacune ayant une fente rectangulaire à bande millimétrique pour la 5G avec une fréquence de fonctionnement de 28 GHz. Nous avons terminé ce chapitre par une analyse comparative.

Les résultats obtenus dans ce travail sont bien meilleurs et compatibles avec la 5G. Le prochain chapitre se concentrera sur la conception d'antennes imprimées dans la bande 60 GHz.

Références de chapitre 2

[II.1] W. Hong et al. “Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6231–6249, Dec. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2712819.

[II.2] M. J. Marcus, “5G and ‘IMT for 2020 and beyond’ [spectrum policy and regulatory issues],” IEEE Wireless Communications, vol. 22, no. 4, pp. 2–3, Aug. 2015, doi: 10.1109/MWC.2015.7224717.

[II.3] S. Sridevi and K. Mahendran, “Design of millimeter-wave microstrip patch antenna for MIMO communication,” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 4, no. 10, pp. 1513–1518, 2017.

[II.4] A. T. Mohammad, G.H. Alijani, “Development of an analytical method for pattern synthesizing of linear and planar arrays with optimal parameters,” AEU International Journal of Electronics and Communications, Vol. 146, 2022, doi:10.1016/j.aeue.2022.154135.

[II.5] S. K. Ezzulddin, S. O.Hasan, M. M. Ameen,” Microstrip patch antenna design, simulation and fabrication for 5G applications,” Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 116, Elsevier, April 2022, doi: 10.1016/j.simpat.2022.102497.

[II.6] E. M. Eldesouki, K. M. Ibrahim, A. M. Attiya,” On the applicability of numerical tools for simulating wave-ports close to the cutoff frequency,” International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 12, No. 2, pp. 1724~1731, 2022, doi : 10.11591/ijece.v12i2.pp1724-1731.

[II.7] M. M. M. Ali and A. Sebak, “Printed RGW circularly polarized differential feeding antenna array for 5G communications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 5, pp. 3151–3160, May 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2900411.

[II.8] Zitouni Ahmed, « Etude et concept des antennes standards et bandes refusées de l'ULB », Thèse de doctorat, Université Abu Bakr Belkaid - Tlemcen, Faculté de Technologie, 2014.

[II.9] David Bidou," Contribution à l'étude d'antennes fort gain : Applications dans le domaine millimétrique," Thèse de doctorat, Université de LIMOGES, Faculté des sciences et techniques, 2003.

[II.10] Y. Huang, K. Boyle," Antennas: From Theory to Practice," A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2008.

[II.11] H. J. Visser, "Array and phased array antenna basics " John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2005.

[II.12] « Broadband microstrip antennas», IEE Electromagnetic. [En ligne]. Disponible sur: https://scholar.google.com/citations?user=mD2ROjMAAAAJ&hl=fr&oi=sra (Consulté le 28 aout 2023).

[II.13] S.E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, Y. Balboul, S. Mazer, and M. El Bekkali, “Design of a microstrip antenna patch with a rectangular slot for 5G applications operating at 28 GHz,” Telecommunication Computing Electronics and Control (TELKOMNIKA), vol. 20, no. 3, Jun. 2022, doi: 10.12928/telkomnika.v20i3.23159.

[II.14] A. Saad and H. Mohamed, “Printed millimeter-wave MIMO-based slot antenna arrays for 5G networks,” AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 99, pp. 59–69, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.11.029.

[II.15] I.-J. Hwang, B. Ahn, S.-C. Chae, J.-W. Yu, and W.-W. Lee, “Quasi-yagi antenna array with modified folded dipole driver for mmWave 5G cellular devices,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 5, pp. 971–975, May 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2906775.

[II.16] M. Roodaki-Lavasani-Fard, S. Sinha, C. Soens, G. A. E. Vandenbosch, K. Mohammadpour-Aghdam, and R. Faraji-Dana, “Shared aperture dual-wideband planar antenna arrays using any-layer PCB technology for mm-wave applications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 2, pp. 1087–1096, Feb. 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3111313.

[II.17] M. M. M. Ali and A. Sebak, “Printed RGW circularly polarized differential feeding antenna array for 5G communications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 5, pp. 3151–3160, May 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2900411.

[II.18] P. N. Ojaroudi et al., “Frequency reconfigurable antenna array for MM-wave 5G mobile handsets,” In: International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems. BROADNETS, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol. 263, pp 438–445, Springer, Cham (2019), doi: 10.1007/978-3-030-05195-2_43.

[II.19] L. G. Ayalew and F. M. Asmare, “Design and optimization of pi-slotted dual-band rectangular microstrip patch antenna using surface response methodology for 5G applications,” Heliyon, vol. 8, no. 12, pp. 1-14, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12030.

[II.20] W. A. Awan, M. Soruri, M. Alibakhshikenari, and E. Limiti, “On-demand frequency switchable antenna array operating at 24.8 and 28 GHZ for 5G high-gain sensors applications,” Progress in Electromagnetics Research M, vol. 108, pp. 163–173, 2022, doi: 10.2528/PIERM21121102.

[II.21] H. Zahra, W. Abbas Awan, N. Hussain, S. Muzahir Abbas, and S. Mukhopadhyay, “Helix inspired 28 GHz broadband antenna with end-fire radiation pattern,” Computers, Materials and Continua, vol. 70, no. 1, pp. 1935–1944, 2022, doi: 10.32604/cmc.2022.019495.

[II.22] W. A. Awan, M. Alibakhshikenari, and E. Limiti, “High gain dual parasitic patch loaded wideband antenna for 28 GHz 5G applications,” in International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1–2, IEEE, Taipei, Taiwan(2021), doi: 10.23919/ISAP47258.2021.9614441.
[II.23] N. Hussain, W. A. Awan, W. Ali, S. I. Naqvi, A. Zaidi, and T. T. Le, “Compact wideband patch antenna and its MIMO configuration for 28 GHz applications,” AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 132, pp.1-8, 2021, doi: 10.1016/j.aeue.2021.153612.
[II.24] H. Zahra, W. A. Awan, W. A. E. Ali, N. Hussain, S. M. Abbas, and S. Mukhopadhyay, “A 28 GHz broadband helical inspired end-fire antenna and its MIMO configuration for 5G pattern diversity applications,” Electronics, vol. 10, no. 4, pp. 1-15, 2021, doi: 10.3390/electronics10040405.
[II.25] R. T. Prabu, M. Benisha, V. T. Bai, and R. Ranjeetha, “Design of 5G mm-wave antenna using line feed and corporate feed techniques,” In: in Proceedings of the second international conference on SCI, Smart Intelligent Computing and Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 104. pp. 367–380, Springer, Singapore(2019), doi: 10.1007/978-981-13-1921-1_37.
[II.26] M. Roodaki-Lavasani-Fard, S. Sinha, C. Soens, G. A. E. Vandenbosch, K. Mohammadpour-Aghdam, and R. Faraji-Dana, “Shared aperture dual-wideband planar antenna arrays using any-layer PCB technology for mm-wave applications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 2, pp. 1087–1096, Feb. 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3111313.
[II.27] M. M. M. Ali and A. Sebak, “Printed RGW circularly polarized differential feeding antenna array for 5G communications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 5, pp. 3151–3160, May 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2900411.
[II.28] P. M. Teresa and G. Umamaheswari, “Compact slotted microstrip antenna for 5G applications operating at 28 GHz,” IETE Journal of Research, vol. 68, no. 5, pp. 3778-3785, 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1779620.
[II.29] O. Darboe, D. B. O. Konditi, and F. Manene, “A 28 GHz rectangular microstrip patch antenna for 5G applications,” International Journal of Engineering Research and Technology, vol. 12, no. 6, pp. 854-857, 2019.
[II.30] I. Ahmad, S. Houjun, Q. Ali, and A. Samad, “Design of Umbrella shape single element patch antenna with high gain and high efficiency for 5G wireless communication in 28 GHz,” 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), pp. 710-713, IEEE, Islamabad, Pakistan (2020), doi: 10.1109/IBCAST47879.2020.9044577.
[II.31] Y. S. H. Khraisat,” Increasing microstrip patch antenna bandwidth by inserting ground slots,” Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, Vol. 10, no. 1, pp. 1-11, 2018, doi: 10.4236/jemaa.2018.101001.
[II.32] J. Saini, S. K. Agarwal,” T and L slotted patch antenna for future mobile and wireless communication,” 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), pp. 1-5, IEEE , Delhi, India. 2017, doi: 10.1109/ICCCNT.2017.8203922.
[II.33] D. N. A. Cusicuna , J. L. A. Cusicuna , M. C. Arenas ,” High Gain 4x4 Rectangular Patch Antenna Array at 28GHz for Future 5G Applications,” XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pp. 1-4, IEEE, Lima, Peru(2018), 10.1109/INTERCON.2018.8526451.
[II.34] S. Johari, M. A. Jalil, S. I. Ibrahim, M. N. Mohammad, N. Hassan,” 28 GHz Microstrip Patch Antennas for Future 5G,” Journal of Engineering and Science Research, Vol. 2, no. 4, pp. 01-06, 2018, doi: 10.26666/rmp.jesr.2018.4.1.
[II.35] R. Przesmycki, M. Bugaj, and L. Nowosielski, “Broadband Microstrip Antenna for 5G Wireless Systems operating at 28 GHz,” Electronics, vol. 10, no. 1, pp. 1-19, 2021, doi: 10.3390/electronics10010001.
[II.36] B. Hiçdurmaz, Ö. F. Gümüş, “Design and analysis of 28 GHz microstrip patch antenna for different typez fr4 claddings,” Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, vol. 24, no. 2, pp. 265-288, 2019, doi: 10.17482/uumfd.548410.
[II.37] R. K. Goyal, U. Shankar Modani, “A Compact Microstrip Patch Antenna at 28 GHz for 5G wireless Applications,” in 3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), pp. 1-2, IEEE, Jaipur, India(2018), doi: 10.1109/ICRAIE.2018.8710417.
[II.38] Y. Rahayu, L. Fitria, Y. Hakiki, A. Kurniawan," A New 2x4 Array Design of Dual-Band Millimeter-Wave Antenna for 5G Applications," International Workshop on Antenna Technology (iWAT), pp. 1-4, IEEE, Nanjing, China(2018), doi: 10.1109/IWAT.2018.8379210.
[II.39] Y. Rahayu and M. I. Hidayat, “Design of 28/38 GHz dual-band triangular-shaped slot microstrip antenna array for 5G applications,” in 2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN), pp. 93–97, IEEE, Jul. 2018, doi: 10.1109/TAFGEN.2018.8580487.
[II.40] M. S. Sharawi and M. Ikram, “Slot-based connected antenna arrays for 5G mobile terminals,” in International Workshop on Antenna Technology, iWAT2018-Proceedings, pp. 1–3, IEEE, Nanjing, China(2018), doi: 10.1109/IWAT.2018.8379256.
[II.41] D. Mungur and S. Duraikannan, “Design and analysis of 28 GHz millimeter wave antenna array for 5G communication systems,” Journal of Science Technology Engineering and Management-Advanced Research and Innovation, vol. 1, no. 3, pp. 1–10, 2018.

[II.42] M. Nabil and M. M. A. Faisal, “Design, simulation and analysis of a high gain small size array antenna for 5G wireless communication,” Wireless Personal Communications,” vol. 116, no. 4, pp. 2761–2776, 2021, doi: 10.1007/s11277-020-07819-9.
[II.43] J. Khan, D. A. Sehrai, and U. Ali, “Design of dual band 5G antenna array with SAR analysis for future mobile handsets,” Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 14, no. 2, pp. 809–816, Mar. 2019, doi: 10.1007/s42835-018-00059-9.
[II.44] H.-C. Huang, Y. Wang, and X. Jian, “Novel integrated design of a dual-band dual-polarization 5G mm-wave antenna array fed by FPCs with a U-slotted full-metal case for a cellular phone,” in International Workshop on Antenna Technology (iWAT), pp. 50–53, IEEE, Miami, FL, USA(2019), doi: 10.1109/IWAT.2019.8730623.
[II.45] C. K. Ali and M. H. Arif, “Dual-band millimeter-wave microstrip patch array antenna for 5G smartphones,” in 2019 International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE), pp. 181–185, IEEE, Zakho - Duhok, Iraq(2019) , doi: 10.1109/ICOASE.2019.8723719.

Chapitre 3 : Étude et conception des antennes Imprimées en bande millimétrique pour la 5G au voisinage de 60 GHz

1 Introduction

La technologie sans fil d'aujourd'hui est considérée comme l'un des domaines les plus sensibles des systèmes de communication. La technologie 5G utilise des fréquences élevées et une large bande passante pour augmenter les taux de transmission, permettant une meilleure couverture avec une faible consommation de batterie à un faible coût [III.1]. Dans le cadre de l'attribution des fréquences, la Conférence mondiale des radiocommunications de 2015 (CMR-15) a attribué des fréquences d'identification dans la gamme comprise entre 24 GHz et 86 GHz pour les futurs systèmes cellulaires et systèmes sans fil à ondes millimétriques [III.2].

Le domaine des télécommunications connaît un essor sans précédent depuis plusieurs décennies. De nombreux systèmes offrent des services de plus en plus variés (téléphonie mobile, services multimédias interactifs, etc.). Dans le cadre d'un système de communication, l'antenne est un élément essentiel pour assurer la transmission et la réception des informations matérialisées par les ondes se propageant dans l'atmosphère. Par conséquent, les antennes doivent disposer de larges bandes passantes pour assurer une vitesse et un gain élevés afin de permettre des communications à courte et longue portée en raison d'applications liées aux nouvelles technologies. De plus, la bande millimétrique offre une très large bande passante [III.3].

Actuellement, les antennes microrubans sont largement utilisées, leurs applications couvrent une large gamme de fréquences allant de 100 MHz à 100 GHz, et leur configuration et leurs dimensions favorisent leur intégration sur de nombreux éléments mobiles (avions, voitures, missiles). Dans le domaine des télécommunications, une antenne microruban désigne généralement une antenne fabriquée à l'aide de la technique photo lithographique autour de 60GHz sur un circuit imprimé. Il s'agit d'une sorte d'antenne interne. Elles sont principalement utilisées à des fréquences micro-ondes. La structure de cette antenne se compose de trois parties : le patch, le substrat et le plan de masse. Ces antennes microrubans sont très populaires en raison des avantages suivants : faible poids, petite taille, configurations possibles, faible coût de fabrication, production de masse facile, rayonnement de polarisation linéaire et circulaire possible, antennes multibandes, multipolarisation, compatibilité avec les circuits hybrides, réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués avec l'antenne. Cependant, les antennes microrubans ont aussi de limitations que les antennes conventionnelles n'ont pas : une bande passante étroite, souvent associée à des problèmes de tolérance de fabrication, et un gain généralement faible (6 dB). Sur un grand plan de masse, ces antennes ne rayonnent que dans un demi-plan, ne supportent que de faibles puissances (<100 W) et ont des pertes de

rayonnement dues aux ondes de surface dans le substrat diélectrique. Cependant, ces performances peuvent être améliorées par différentes méthodes. Pour augmenter la bande passante, la technique de superposition est appliquée, l'utilisation de structures de déformation du plan de masse [III.4] [III.5]. Nous proposons donc de concevoir une antenne patch privée d'une partie en forme de **T** pour de meilleures performances.

Au cours de la dernière décennie, la bande de fréquences des 60 GHz a suscité un grand intérêt pour la prise en charge des transmissions à très haut débit, principalement en raison de la bande passante inégalée disponible dans la bande ISM (industriel, scientifique et médical). Ce rayonnement de faible puissance permet d'utiliser la fréquence pour une propagation à courte distance, ce qui rend le système de communication plus sécurisé [III.6]. En effet, la bande de fréquences de 60 GHz présente une atténuation du trajet entre l'émetteur et le récepteur mille fois (30 dB) plus importante que la même atténuation subie par un signal de 2 GHz en espace libre. Elle est destinée à soutenir les applications de réseaux sans fil nécessitant des taux de transfert de données très élevés. Par exemple, cette bande permet d'échanger des fichiers volumineux, de diffuser des vidéos hautes qualités, etc. Dans les réseaux locaux sans fil (WLAN), les réseaux personnels sans fil (WPAN) et la liaison point à point [III.7].

Dans l'industrie des télécommunications, le plus grand compartiment est celui des antennes, ce qui crée une contrainte liée à leurs dimensions qui empêche leur intégration dans les appareils électroniques de la 5G. Nous proposons une méthode pour réduire les dimensions des antennes en utilisant des fentes, ce qui résout partiellement ce problème. Cette étude présente un modèle d'antenne patch en microruban avec une fente en forme de T connectée au stub. Ces fentes sont disposées au milieu du patch. Elle fonctionne pour une fréquence de résonance de 60 GHz. Elle est destinée pour la technologie de communication sans fil 5G.

2 La bande de fréquence de 60 GHz

La bande de fréquences autour de 60 GHz offrant des débits de données très rapides de plusieurs Gbps, il y a d'autres avantages à prendre en compte qui peuvent être considérés comme des inconvénients lorsqu'il s'agit de l'utiliser. Réduction importante de l'intensité du signal dans les zones ouvertes, dimension de l'antenne : La courte longueur d'onde de la bande des 60 GHz facilite considérablement l'intégration de divers éléments, dont les filtres, les composants passifs et les antennes. Dans le but d'avoir le même gain d'antenne à 60 GHz qu'à 6 GHz, la dimension de l'antenne à 60 GHz doit être cent fois plus petite que celle à 6 GHz. Les

applications WLAN sont particulièrement intéressées par la bande de 60 GHz en raison des caractéristiques d'atténuation spécifiques de 10 à 15 dB/km liées à l'absorption des ondes par l'oxygène. Atténuation dans un environnement intérieur : L'atténuation de l'onde à 60 GHz dans les matériaux courants à l'intérieur des bâtiments est plus importante qu'à des fréquences plus basses, comme le montre l'étude [III.8] [III.9], qui compare les coefficients d'atténuation mesurés pour différents matériaux (plâtre, verre,...) à 2,5 GHz et à 60 GHz. Les liaisons à 60 GHz subissent une forte atténuation, ce qui permet une réutilisation des fréquences dans des zones très éloignées. De cette façon, il est envisageable de mettre en place de nombreux terminaux fonctionnant à la même fréquence dans une configuration à haute densité, sans risque d'interférence. La forte atténuation permet de garantir la sécurité des liaisons à large bande sur des distances restreintes.

La bande autour de 60 GHz est la bande de fréquences choisie pour la nouvelle norme de réseau WLAN, et WiGig (Wireless Gigabit). Son principal avantage pour les applications à très haut débit, telles que la diffusion en continu de contenus multimédias sans compression, est la large bande passante disponible. WiGig fournit des spécifications techniques pour les communications à 60 GHz pour les applications à haut débit et à courte portée, telles que le type de modulation, le taux de codage et la puissance [III.10]. Dans le passé, ces fréquences n'étaient pas envisageables pour les réseaux de zone corporelle (BAN). La bande des 60 GHz est intéressante pour les applications de réseaux de zone corporelle (BAN) en raison de sa forte réduction atmosphérique, de ses faibles interférences avec d'autres réseaux, de la compacité des composants, de la bande passante disponible et de la faible absorption de la peau par le corps humain [III.11] [III.12]. Néanmoins, grâce à l'évolution des solutions d'intégration des circuits, plusieurs barrières technologiques et financières ont été levées.

Les communications sans fil dans le corps humain pourraient être potentiellement favorisées par la bande millimétrique, en particulier la bande de fréquences autour de 60 GHz [III.13]. En outre, cela s'applique également à tous les domaines du spectre millimétrique. Les longueurs d'onde dans le vide $\lambda 0$ sont faibles (seulement 5 mm à 60 GHz). Cette caractéristique facilite l'intégration des antennes dans le corps en leur donnant des dimensions centimétriques, voire millimétriques. Le deuxième point fort est l'augmentation de la vitesse d'absorption atmosphérique à 60 GHz, soit 16 dB/km, qui diminuent le risque d'interférence avec les réseaux voisins [III.14]. Il peut être indispensable d'avoir cette isolation pour des applications spécifiques, telles que dans le domaine militaire. Le troisième avantage est que la bande des 60 GHz est libre de droits et s'étend sur plusieurs GHz (57-64 GHz en Amérique du Nord, 57-66

GHz en Europe et 59-66 GHz au Japon). Cet avantage permet des débits de données allant jusqu'à plusieurs Gbit/s [III.15], ce qui a répondu à l'augmentation des besoins de transferts de données plus rapides.

Le spectre avec sa large bande passante libre de 7GHz, les interférences réduites et d'autres caractéristiques techniques permettent de considérer la bande de fréquences de 60 GHz comme le meilleur compromis pour assurer des débits de données de plusieurs gigabits. La conception et la fabrication d'antennes à la fréquence de 60 GHz de très petites dimensions ont constitué un obstacle important en raison de la faible distance entre le composant rayonnant, les couches métalliques environnantes et le substrat. Étant donné que le substrat a une capacité d'absorption élevée ainsi que des courants de conduction, les pertes par rayonnement, ainsi que les pertes par conduction, sont très élevées. Cela explique pourquoi les antennes patch microruban présentent à la fois des pertes considérables et des gains faibles [III.16]. Les antennes patch microruban présentent plusieurs avantages pour les communications sans fil de 5G, notamment leur faible coût, leur petite taille et leur facilité de réalisation. Ces antennes font l'objet de nombreux débats au sein de la communauté scientifique. Pour résoudre le problème posé par la bande passante limitée et la disparition progressive des signaux de surface, les chercheurs ont mené plusieurs études, telles que la conception de patchs empilés ou la création d'une cavité d'air dans des substrats multicouches. Néanmoins, ces procédés restent coûteux et complexes à fabriquer [III.17].

La bande passante des antennes patch est très étroite et ne dépasse pas 10 %, ce qui explique pourquoi il est difficile de couvrir les zones de 60 GHz sans licence. Dans ce cas, certains chercheurs ont proposé une technique pour améliorer cette bande passante, comme un patch avec une fente en forme de U [III.18], une antenne patch en forme de E [III.19], une antenne patch avec une sonde en forme de L [III.20], l'ajout de patchs parasites [III.21] et une structure d'antenne à cornet [III.22]. L'amélioration de la bande passante de l'antenne patch en forme de U atteint 15 % grâce à l'ajout d'une fente. La bande passante d'impédance est améliorée de 21,7 % avec le patch en forme de E. Cette amélioration est due à la présence d'une fente dans le patch et de l'encoche en forme de E. L'antenne à cornet permet d'améliorer la largeur de bande, mais sa structure complexe entraîne des coûts supplémentaires.

Les propriétés intéressantes liées à la technologie des systèmes de communication sans fil fonctionnant dans la bande de fréquences des 60 GHz sont autant de critères pris en compte dans la conception de ce type de système. Dans les systèmes sans fil, l'un des éléments importants est l'antenne, car elle a des effets significatifs sur la sensibilité globale du récepteur,

et donc sur la conception bidirectionnelle, la sélection des schémas de modulation numérique et le bilan de liaison. Par conséquent, la recherche dans le domaine du développement de la technologie des antennes à 60 GHz a suscité beaucoup d'intérêt et, de manière significative, la conception et l'analyse de ces antennes sont décrites en détail dans divers travaux de recherche [III.23].

La technologie des guides d'ondes incorporés au support (SIW), particulièrement adaptée, constitue une étape essentielle dans le secteur de la recherche concernant les ondes millimétriques. Les nouveaux développements et applications concernent les antennes ainsi que les circuits de filtrage et les dispositifs de couplage pour l'entrée RF [III.24], l'orientation des faisceaux et les systèmes MIMO [III.25]. Jusqu'à présent, la plupart des conceptions de l'antenne SIW de la bande 60GHz proposées dans la documentation ont dû choisir entre la fourniture d'une bande passante adéquate. Il a été démontré que les réseaux d'antennes à fente SIW produisent d'excellentes bandes passantes [III.26]. Dans [III.27], nous avons la conception d'un élément de réseau d'antennes microruban couplé à une ouverture à bande V alimenté par une cavité et soutenu par un SIW pour des applications dans les réseaux corporels. Il peut réaliser une bande passante de 14,25%, entre 56,16GHz et 64,8GHz, et un gain de 5,6dB. Dans [III.28], les résultats de l'élément de réseau de patchs microstrip à polarisation circulaire pour les applications corporelles fournissent une large bande passante de 8,64 GHz ainsi qu'un gain maximal de 7,2 dB. Une autre antenne proposée dans [III.29], offre un gain très élevé de 10,55 dB et une bande passante de 7,23 GHz. Elle présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel.

3 Revue de la conception d'une antenne et des réseaux d'antennes dans la bande de fréquence de 60 GHz pour la 5G

La technologie moderne mobile s'améliore rapidement en raison de son influence considérable sur notre vie. Il est donc nécessaire d'étudier l'évolution des dispositifs d'antenne, car ils sont considérés comme essentiels pour la technologie sans fil. Dans ce qui suit nous présentons une revue des résultats des recherches antérieures sur différentes antennes et réseaux d'antennes à 60 GHz pour les systèmes de la cinquième génération (5 G). Nous présentons ensuite une étude comparative des différents types de conception. Pour les applications technologiques de la cinquième génération, il est important de concevoir des antennes présentant des caractéristiques essentielles telles qu'un large bande passante, un gain et une directivité importante, une

miniaturisation de la taille et un profil plat, ainsi qu'une facilité d'intégration dans l'emballage ou sur la puce avec d'autres éléments.

3.1 Analyse de la situation et des coûts liés aux liaisons à 60 GHz

Les fréquences comprises entre 30 et 300 GHz sont appelées "ondes millimétriques". Ces fréquences sont très attrayantes en raison des services de communication multi-gigabits, tels que les systèmes multimédias et vidéo numériques de haute qualité, l'internet à haut débit, la transmission de données sans fil en gigabits et les capteurs radar automobiles à courte portée. Néanmoins, la mise en œuvre des bandes de fréquences d'ondes millimétriques suscite des inquiétudes en raison des effets d'interférence plus importants dus à la pénétration, à la pluie et au feuillage. Ces pertes de propagation supplémentaires varient en fonction des matériaux de construction, de l'intensité de la pluie ou de la hauteur des arbres [III.30].

En raison des pertes de propagation et de l'absorption d'oxygène plus élevées, de l'ordre de 10-15 dB/km, au voisinage de la bande des 60 GHz, la portée des liaisons à 60 GHz est réduite, ce qui permet une réutilisation plus fréquente des fréquences afin d'obtenir un débit plus élevé. Il s'agit d'une propriété intéressante pour la conception et le développement de systèmes dédiés au système de communication sans fil 5G, mais des antennes à gain élevé sont également nécessaires. Par conséquent, la conception du système doit utiliser des réseaux d'antennes avec un bon gain et des propriétés de haute efficacité afin de réduire les coûts globaux et d'améliorer les performances du système. Compte tenu de la faible puissance d'émission et de l'atténuation élevée du trajet dans la bande des 60 GHz, il est nécessaire d'utiliser des antennes directives pour obtenir des débits plus élevés. Le tableau III-1 montre les gammes de fréquences avec puissance d'émission maximale et gain maximal pour un système à 60 GHz dans certains pays.

Tableau III- 1: Gamme de fréquences avec puissance d'émission maximale et gain maximal pour un système à 60 GHz

pays	Fréquences (GHz)	Puissance (mW)	Gain (dB)
USA	57 - 64	500	-
Japan	59 - 66	10/250	47
Europe	57 - 66	20	37
China	59 - 64	10	34
Canada	57 - 64	500	-

3.2 Aspects de la conception des antennes à ondes millimétriques

La 5G exige de concevoir et de mettre en œuvre des vitesses de transmission élevées et des débits de données très haut pour les systèmes de communications, notamment les réseaux de capteurs et les bâtiments intelligents. Les autres caractéristiques préférées pour la réalisation d'antennes sont meilleur diagrammes de rayonnement, et une stabilité sur toute la bande de fréquence, des dimensions réduites et des faibles profils avec une intégration facile. L'amélioration du gain et de l'efficacité des antennes doit être prise en compte lors de la conception du système, car les pertes de propagation sont plus importantes aux fréquences élevées, ce qui se traduit par une meilleure réception du signal. Le choix des lignes d'alimentation est l'élément essentiel et vital suivant à prendre en considération pendant la phase de conception. Les lignes d'alimentation conventionnelles telles que les lignes microruban et les guides d'ondes sont soumises à des influences indésirables lors de la transmission et du rayonnement à des fréquences d'ondes millimétriques, ce qui diminue les performances de rayonnement totales et réduit considérablement les gains générés par les différentes antennes et réseaux d'antennes.

4 Etat de l’art et des technologies d'antenne 60 GHz analyse comparative

Les antennes à réflecteur, à lentille ou à cornet pour les systèmes de communication à ondes millimétriques ne conviennent pas aux systèmes radio de 60 GHz en raison de leur prix élevé, de la difficulté à les intégrer dans un composant et de leur grande taille, mais elles ont un gain élevé. C'est pourquoi les chercheurs ont décidé de se concentrer sur la conception d'antennes imprimées pour les systèmes à ondes millimétriques. Ces antennes imprimées présentent plusieurs caractéristiques : faible profil, petite taille, faible coût et facilité d'intégration dans le corps humain. En raison de leur simplicité de conception, plusieurs structures d'antennes à fente sont employées pour augmenter les performances de l'antenne. Dans cette partie, nous présentons plusieurs types d'antennes pour la bande des 60 GHz, qui offrent une flexibilité considérable et un faible coût. Les capacités de conception à faible profil sont présentées dans le tableau III-2, ce qui permet de comparer les performances de ces antennes.

Tableau III- 2: Comparaisons des performances des différentes antennes existantes.

Ref	Sub	Sizes (mm^3)	Types	NA	ET	BP (GHz)	Gain (dB)	S11 (dB)	PT
[III.31]	RT	8×8×1,6	AP	-	IS	4.028	5.6	-40.99	-
[III.32]	RT	3,6×4,3×0,127	AP	-	IS	-	7.55	-29.23	-
[III.33]	RT	9,5×7,5×0,508	AP	-	IS	7	7,73	-	-
[III.34]	RT	1,48×1.5×1.575	AP	-	IS PF	11.3	9.52	-41	C-P
[III.35]	RHF	10×100×100	Yagi-Uda	-	-	7	11.9	-	P-P
[III.36]	UL	33.5×20×0.05	AP	-	IS	-	2.19 4.43	-13.99 -19.26	-
[III.37]	FR4	-	AP	-	IS PF	11.9 /12	-	-13.55 -13.76	-
[III.38]	FR4	5×5×0.127	Yagi-Uda	8	PF	0.4085	2.86	-23	-
[III.39]	Tex	-	RA	4	-	-	8.6	-	C-P
[III.40]	Si	-	RA	2	IS	5.88	8.83	-30.4	-
[III.41]	TLY	-	RA	8	PF	-	14,8	-27.5	-

Où **Sub** est le terme désignant le support utilisé pour la conception, **RT** désigne le substrat RT5880 de Rogers avec une permittivité relative de εr = 2,2, **RHF** désigne le substrat Rohacell 51 HF avec une permittivité relative de εr = 1,05, **UL** désigne le substrat ULTRALAM® 3850HT avec une permittivité relative de εr = 3. 14, **Tex** désigne un substrat textile, **SI** désigne un substrat de silicium, **TLY** désigne le substrat TaconicTLY, **AP** signifie qu'il s'agit d'une antenne patch, le terme **RA** indique qu'il s'agit d'un réseau d'antennes, Les symboles sont les suivants : ET : améliorations techniques, **PF** : alimentation de la sonde, **IS** : insertion de la fente, **PT** : type de polarisation, **C-P** : polarisation croisée, **P-P**: polarisation parallèle, et **NA** : nombre d'éléments du réseau d'antennes.

Le tableau III-2 ci-dessus détaille les résultats précédents obtenus avec les différentes antennes, ainsi que le type d'antenne, le nombre d'éléments dans le réseau d'antennes, le type de polarisation de l'antenne et les méthodes d'amélioration de la performance de l'antenne. Le tableau III.2 montre que le réseau d'antennes mentionné dans [III.40] a une meilleure bande passante et un coefficient de réflexion S_{11} plus important que ceux mentionnés dans [III.41] [III.39] [III.38], et que le nombre d'éléments d'antenne est plus petit que les réseaux mentionnés

dans [III.41] [III.39] [III.38], mais le réseau mentionné dans [III.41] présente un gain élevé par rapport aux autres réseaux d'antennes. Les performances de l'antenne [III.34], y compris la largeur de bande, le gain et S11, sont meilleures que celles des autres antennes mentionnées dans [III.31] [III.32] [III.33] [III.35] [III.36] [III.37] [III.41], ainsi que sa taille plus petite que ces dernières. Les travaux réalisés sur le mode de propagation dans la bande de fréquence des 60 GHz montrent que la technique des insertions de fentes au niveau des antennes permet d'obtenir des résultats très performants, comme le montre le tableau III.2.

Au cours des dernières décennies, la discipline de la radiodiffusion a connu une période de croissance considérable. Les progrès techniques de certaines nouvelles antennes, telles que les antennes à ondes millimétriques, à large bande, à double/multibande, ou les structures reproductibles, ainsi que la réduction des dimensions, la compacité, le profil réduit, la bande passante d'impédance, l'augmentation du gain, ou les applications de polarisation linéaire et circulaire, etc. ont tous contribué à cette croissance. Même si un niveau de maturité suffisant a été atteint, plusieurs problèmes restent à résoudre. L'antenne patch microruban peut être conçue pour s'intégrer à une grande partie de l'architecture afin de développer les caractéristiques du système d'application 5G.

Dans nos recherches, nous somme parvenue à la conclusion que la bande de 60 GHz, qui se caractérise par de nombreux avantages, conviendrait très bien à la 5G. Par conséquent, nous proposons de concevoir de nouvelles antennes fonctionnant dans cette bande de fréquence.

5 Conception d'une nouvelle antenne patch microruban pour la 5G au voisinage de 60 GHz

Nous avons étudié et conçu une nouvelle antenne patch microruban avec une géométrie rectangulaire à laquelle une partie en forme de T est soustraite. Cette partie permet à la fois de réduire les dimensions et d'optimiser les performances de cette antenne. Ce dispositif assure une meilleure qualité de performance liée au fonctionnement du système de communication sans fil 5G. La conception est réalisée en utilisant la technique d'alimentation par ligne microruban. Ce type d'alimentation offre une excellente bande passante, elle est simple à concevoir et présente un faible rayonnement parasite. La distance entre la ligne d'alimentation et le patch peut être adaptée à l'impédance de l'antenne. En outre, la conception et les simulations de l'antenne proposée sont réalisées à l'aide du logiciel de simulation HFSS. L'antenne proposée est mise en œuvre sur le substrat RTduroid 5880 de Rogers, avec une

permittivité relative de 2,2 ; une épaisseur de h =0,16mm, et une tangente de perte de 0,0009. Le profil de cette antenne est de 2mm×1,6mm×0,16mm.

5.1 Procédures de modélisation et de conception d'antenne

La méthode de conception des antennes patch Microstrip est basée sur des équations magnétiques pour lesquelles des hypothèses sont faites afin d'obtenir des modèles simples. Néanmoins, les résultats sont approximatifs. Les modèles fréquemment utilisés pour analyser les antennes imprimées sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité électromagnétique. Cette étude se base sur le modèle de la ligne de transmission. La conception d'une antenne patch nécessite essentiellement les éléments suivants : la fréquence de résonance, le type de substrat à utiliser et son épaisseur. Nous avons choisi le type de matériau Rogers RT/duroid 5870 (tm), en raison de sa qualité par rapport à son prix et de sa permittivité, qui est de 2,2, parfaite. Les caractéristiques retenues sont donc Fréquence de résonance : f_{res} = 60 GHz, Type de substrat : Rogers RTduroid 5870 "de permittivité relative εr = 2,2 et sa hauteur h = 0,16mm. Pour s'adapter à 50 Ohm, nous avons utilisé l'alimentation par ligne micro ruban.

Bien que la méthode de la ligne de transmission soit meilleure parmi les méthodes de modélisation des antennes patch, elle reste la plus simple à appliquer. En effet, l'antenne patch rectangulaire est modélisée par une plaque métallique de largeur W et de longueur L, comme le montre la figure III.1. Pour calculer les paramètres de cette antenne patch, nous utilisons les formules données dans [III.42-III.44]. Ainsi, la Figure III.1 et le tableau III-3 présentent une géométrie de cette antenne ainsi que ses valeurs numériques.

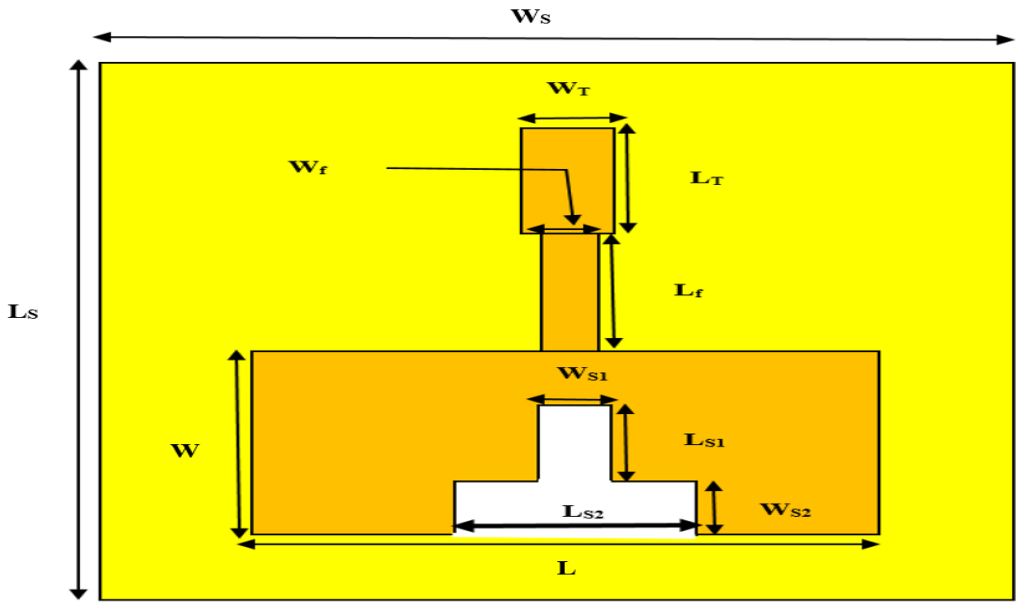


Figure III. 1: Géométrie de l'antenne proposée

La figure III.1 montre la structure de la nouvelle antenne proposée, avec :

- Les dimensions du substrat (longueur L_S, largeur W_S),

- Les dimensions du patch (longueur L, largeur W),

- Les dimensions de la ligne d'alimentation (longueur L_f, largeur W_f),

- Les dimensions de la partie manquante de l'élément rayonné (longueur L_{S1}, largeur W_{S1}), (longueur L_{S2}, largeur W_{S2}).

Tableau III- 3: Paramètres de l'antenne proposée

Paramètres	**Valeurs (mm)**	Paramètres	**Valeurs (mm)**
L_S	5,8	L_f	1,74
W_S	4	W_f	0,1
h	0,16	L_{S1}	0,9
W	1,6	W_{S1}	0,4
L	2	W_{S2}	0,2
L_T	1,52	L_{S2}	0,9
W_T	0,62		

5.2 Résultats de simulation et interprétations

Dans cette étude, l'antenne proposée présente les meilleurs résultats en termes de coefficient de réflexion S_{11} et de ROS comme l'illustre la figure III.2. De plus, une excellente performance en termes de gain et de directivité comme le montre la figure III.3.

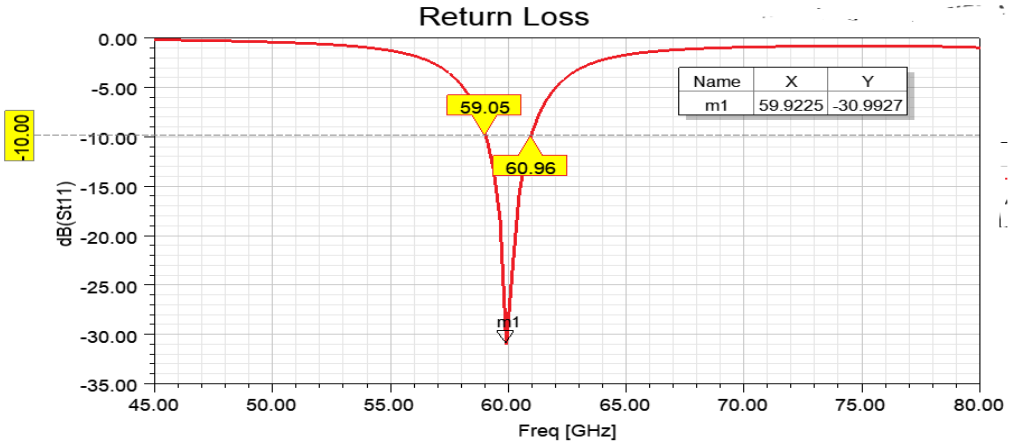
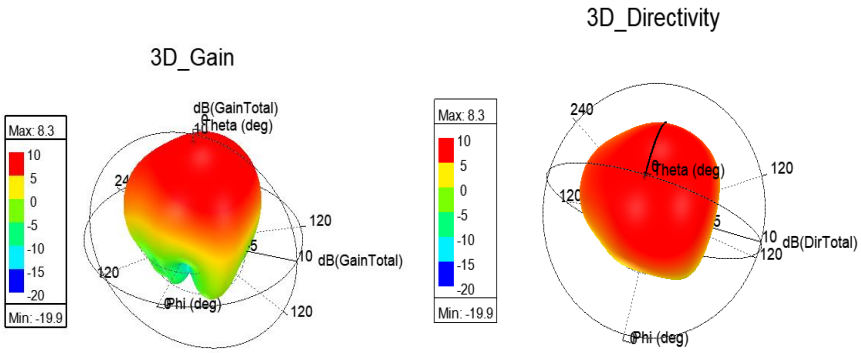


Figure III. 2: Représentation graphique de la courbe S_{11}



(a) (b)

Figure III. 3: (a) Représentation graphique du gain en 3D, (b) Représentation graphique de la directivité en 3D.

Les résultats de simulation obtenus sont résumés dans le tableau III-4 au-dessous :

Tableau III- 4: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Directivité (dB)	Gain (dB)	η (%)
Valeurs numériques	-30,99	1,05	1,91	8,3	8,3	99,74

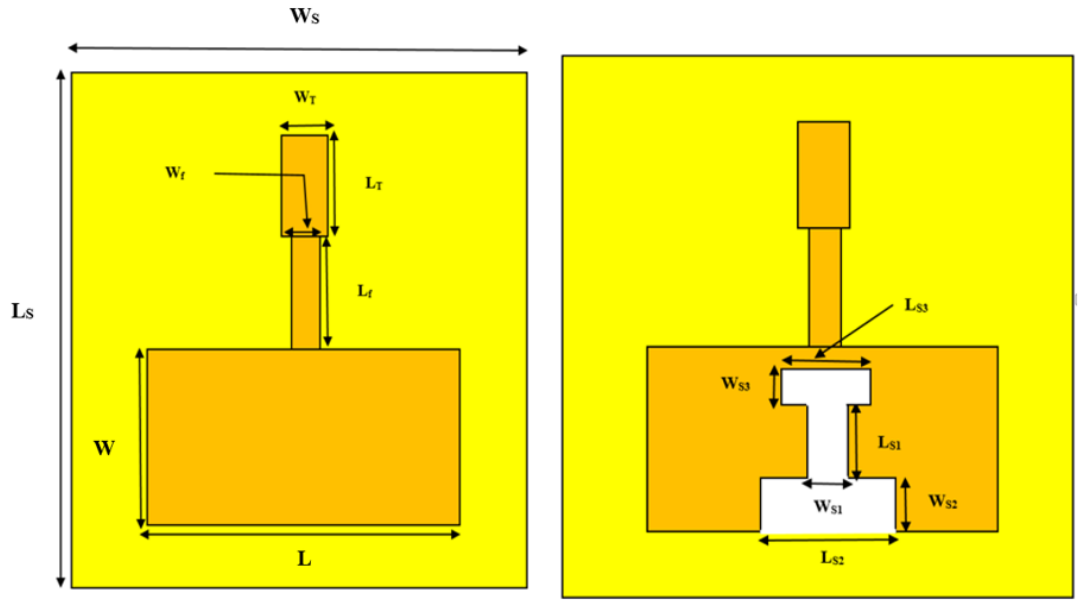
En effet, il est clair que les caractéristiques offertes par notre antenne sont meilleures compare à celles des autres travaux récents. Pour améliorer encore plus les performances, en particulier le gain, la directivité et la bande passante, nous proposons la conception d'une nouvelle antenne patch fonctionnant à la même fréquence (60 GHz) avec la même impédance d'entrée (~50Ω).

6 Etude et conception d'une antenne patch en bande millimétrique de fréquence de résonance de 60 GHz

Comme évoquer précédemment à améliorer dans ce qui suit l'étude et la conception d'une antenne patch en bande millimétrique pour la 5G avec une fréquence de résonance de 60 GHz améliorée. Pour cela, nous avons proposé une technique qui consiste à découper un morceau du support de l'antenne proposée, comme la montre la figure III.4. Nous utilisons le substrat Roger RT duroid 5880, qui a une permittivité relative égale à 2,2, une hauteur de h = 0,16 mm, et une tangente de perte de 0,0009. Le format de l'élément rayonné (le patch) est le suivant : longueur : 2 mm, largeur : 1,6mm. Nous utilisons le logiciel de simulation de structures à haute fréquence (HFSS) pour obtenir les caractéristiques de cette antenne.

6.1 Géométrie de l'antenne proposée

La figure III.4 (a) montre une structure d'antenne non optimisée, en revanche dans la figure III.4 (b), la même structure est optimisée. Et le tableau III-5 présent les paramètres de cette antenne et ses valeurs numériques. Nous suivons la procédure précédente pour déterminer ces paramètres.



(a) (b)

Figure III. 4: (a) antenne proposée sans optimisation, (b) géométrie d'antenne optimisée.

Tableau III- 5: Paramètres de l'antenne proposée

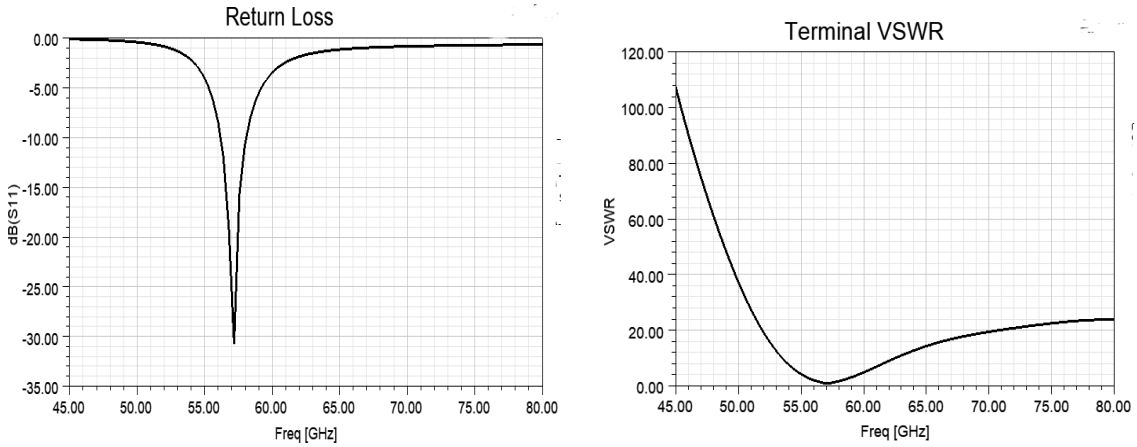
Paramètres	Values (mm)
(L_S – W_S)	(5,8 - 4)
h	0,16
(W - L)	(1,6 - 2)
(W_T - L_T)	(0,62 – 1,52)
(W_f - L_f)	(0,1 – 1,74)
(W_{s1} - L_{s1})	(0,4 – 0,9)
(W_{s2} - L_{s2})	(0,2 – 0,9)
(W_{s3} - L_{s3})	(0,15 – 0,4)

6.2 Résultats et l'interprétation

6.2.1 Résultats des simulations effectuées avant l'optimisation

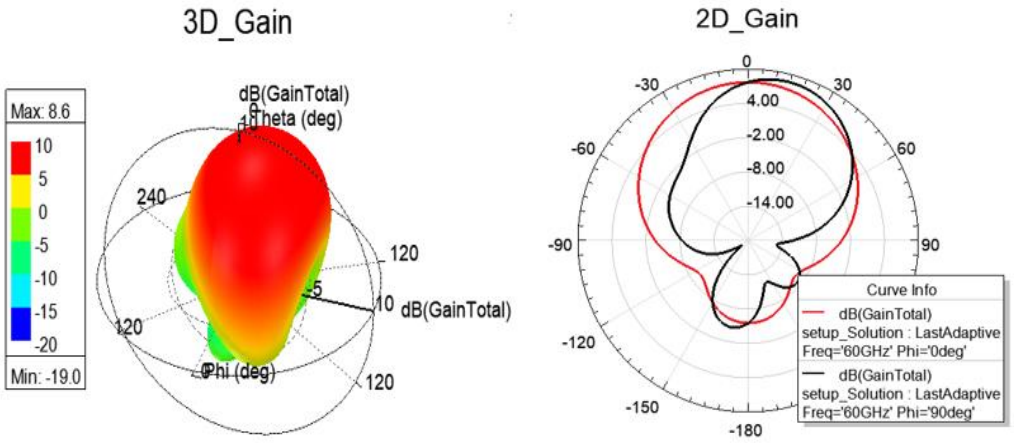
Les simulations effectuées sur une antenne non optimisée donnent les résultats suivants : Le coefficient de réflexion S_{11} = - 30,71 dB à la fréquence de résonance de 57,19 GHz, et ROS =

1,06 comme le montrent les figures III.5. Le diagramme de la figure III.6 montre le graphique de gain 3D et 2D, qui a une valeur de 8,6 dB.



(a) (b)

Figure III. 5: (a) la courbe de S_{11} et (b) celle du ROS de cette nouvelle antenne non-optimisée.

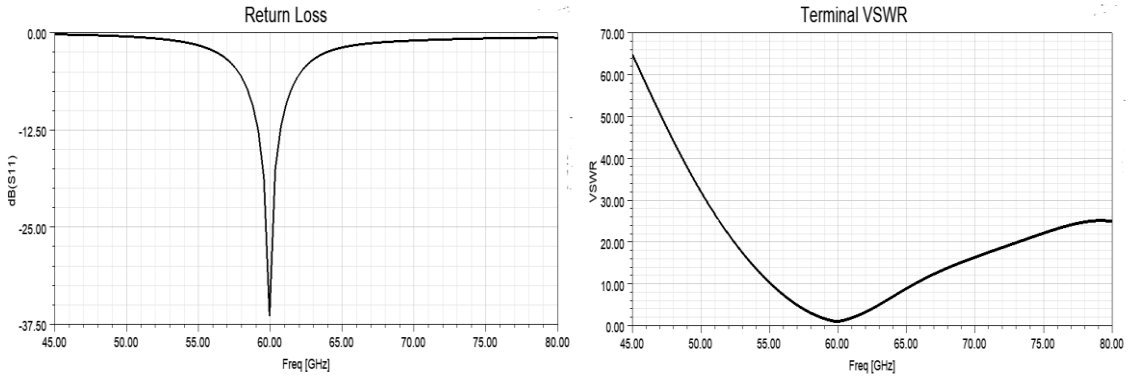


(a) (b)

Figure III. 6: (a) Le diagramme de gain 3D et (b) 2D de la proposition d'antenne non optimisée.

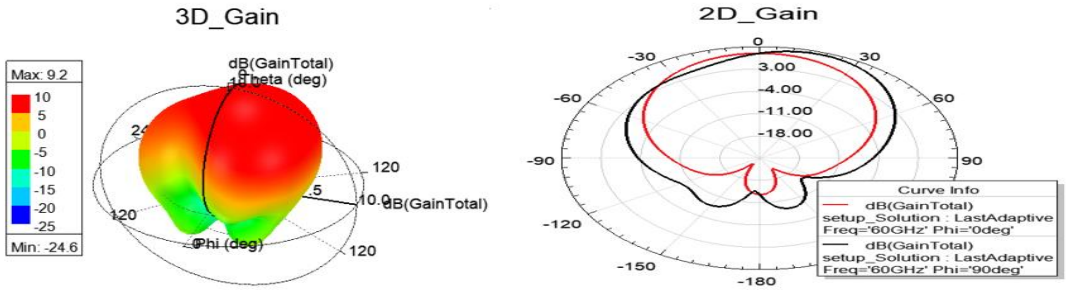
6.2.2 Résultats des simulations effectuées lors de l'optimisation

Les résultats de simulation obtenus à partir de l'antenne proposée après l'optimisation offrent de bons résultats, notamment un coefficient de réflexion S_{11} et un ROS comme le montrent les figures III.7. Le diagramme de la figure III.8 montre le graphique de gain 3D et 2D. Le diagramme de la figure III.9 montre le graphique de directivité 3D et 2D.



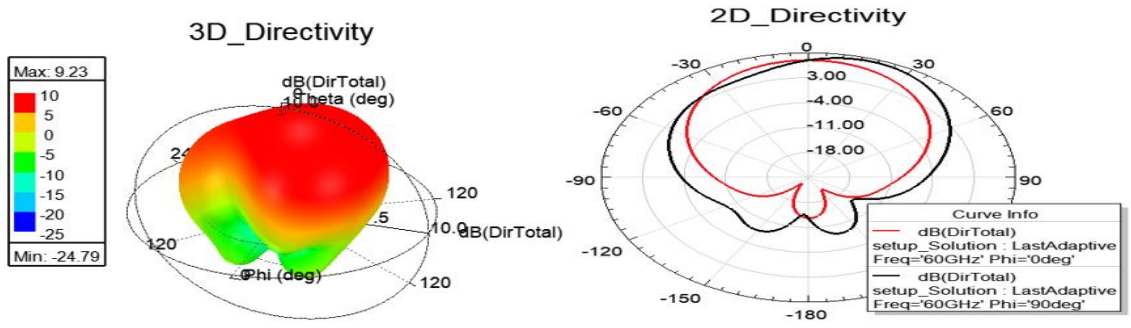
(a) (b)

Figure III. 7: (a) la courbe de S11 et (b) celle du ROS de cette nouvelle antenne optimisée.



(a) (b)

Figure III. 8: (a) diagramme de gain 3D et (b) diagramme de gain 2D de la proposition d'antenne optimisée.



(a) (b)

Figure III. 9: (a) Diagramme de directivité 3D et (b) 2D de la proposition d'antenne optimisée.

Les résultats de simulation obtenus sont résumés dans le tableau III-6 au-dessous :

Tableau III- 6: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Directivité (dB)	Gain (dB)	η (%)
Valeurs numériques	- 36,41	1,03	2,15	9,23	9,2	99,67

7 Conception d'une antenne portable souple en forme de bouton dans la bande millimétrique de la 5G de fréquence opérationnelle 60 GHz

La réalisation d'antennes millimétriques avec des substrats rigides est compliquée en raison de leur petite taille. Dans la bande V (57 à 64 GHz), de nombreuses utilisations sont possibles, comme WiGig. La littérature scientifique dans le domaine des communications sans fil ne se concentre pas suffisamment sur les antennes souples portables millimétriques. Par conséquent, nous proposons de concevoir une antenne patch flexible dont la forme correspond à un bouton portable et dont la fréquence de fonctionnement est de 60 GHz dans la bande millimétrique 5G.

7.1 La procédure de conception

Cette antenne est imprimée sur un substrat en polyamide de permittivité relative εr = 4,3, de tangente de perte σ = 0,004, d'épaisseur 1,6 mm et de rayon 5,2 mm. La hauteur du bouton (BH) est une couche métallique d'épaisseur 0,1 mm et de rayon de 3,2 mm qui reliée par une alimentation coaxiale. Ce bouton a la forme d'un cylindre de diamètre (BD). La structure de cette antenne est illustrée à la figure III.10. Nous calculons les paramètres de cette antenne à l'aide des formules citées dans [III.45].

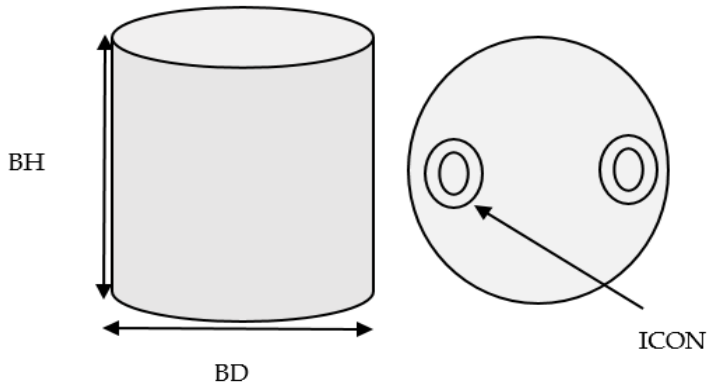
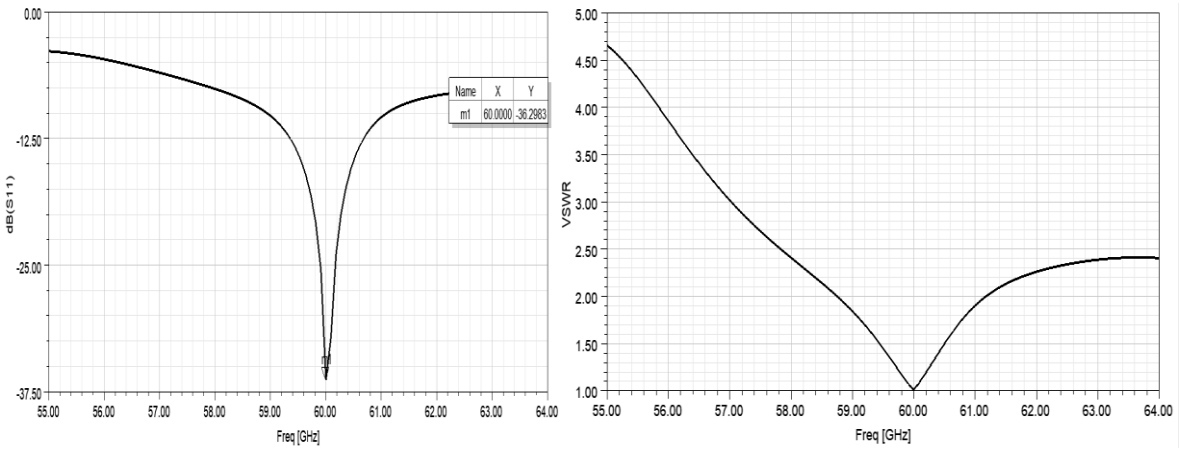


Figure III. 10: Structure de la proposition d'antenne

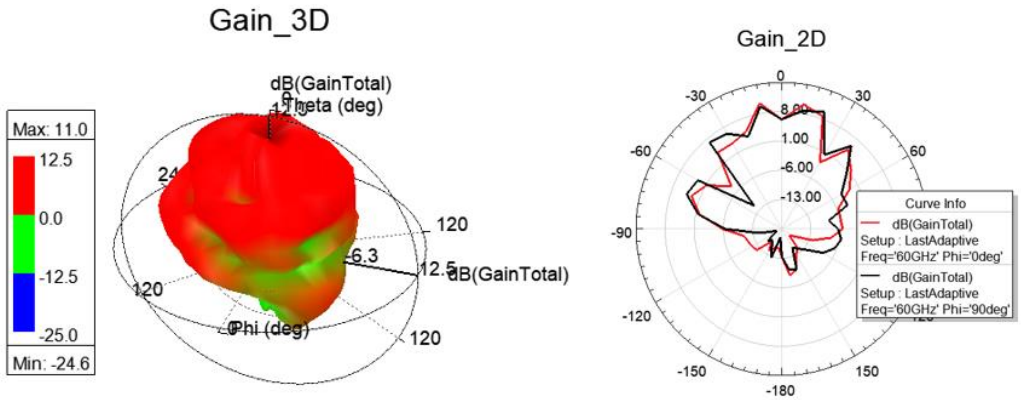
7.2 Résultats et interprétation

L'antenne conçue donne des résultats intéressants en ce qui concerne les coefficients de réflexion S_{11}, et ROS comme le montrent les figures III.11. De plus les Figures III.12, et Figure III.13 montrent le diagramme de Gain et de directivité.



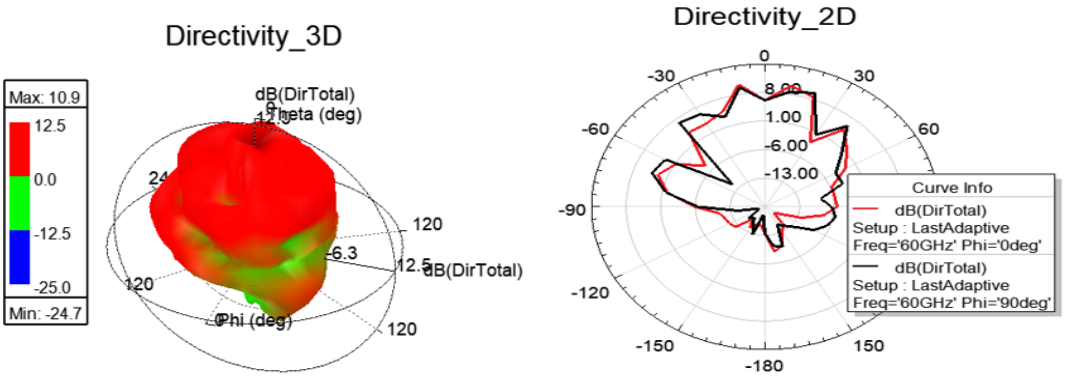
(a) (b)

Figure III. 11: (a) la courbe de S_{11} et (b) celle du ROS de cette nouvelle antenne optimisée.



(a) (b)

Figure III. 12: (a) diagramme de gain 3D et (b) diagramme de gain 2D de la proposition d'antenne optimisée.



(a) (b)

Figure III. 13: (a) Diagramme de directivité 3D et (b) 2D de la proposition d'antenne optimisée.

Le tableau suivant résume les caractéristiques résultantes :

Tableau III- 7: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Directivité (dB)	Gain (dB)
Valeurs numériques	- 36,29	1,03	2,15	10,9	11

8 Analyse comparative des résultats de ces travaux proposés par rapport aux résultats existants

Le tableau III-8 détaille les résultats des simulations effectuées par les travaux de recherche récentes publiés dans des revues spécialisées ainsi que par nos travaux, ayant comme fréquence de fonctionnement 60 GHz dans les applications liées à la technologie 5G. Ces travaux ont largement répondu aux exigences des technologies de télécommunications 5G

Tableau III- 8: Analyse comparative des résultats de cette antenne avec les résultats existants

Ref	**surface (mm^2)**	**S_{11} (dB)**	**f_{res} (GHz)**	**BP (GHz)**	**ROS**	**Gain (dB)**	**η (%)**
[III.46]	2×3	-47	-	2,5	1,85	5,5	-
[III.47]	1,97×1,63	-12	59,85	1,05	1,67	7.15	-
[III.48]	1,117×0,68	-20	-	5	1,22	6,01	-
[III.49]	3,51×2,9	−28,36	-	-	1,07	6,61	-
[III.50]	3,43×3,83	-25	-	0,643	1,11	6,75	-
[III.42]	2×1,66	-29,6	59,74	2,62	1,07	5,17	-
[III.51]	2×1,66	-24	60,06	12,11	1,5	8,61	82,15
[III.52]	5×9	-32,66	59,5	4,26	1,05	9,73	77,01
[III.53]	-	-20,2	60,1	0,3	1,21	8,4	
[III.54]	-	-60	60	2,82	1	5,25	92,5
Antennes	2×1,6	-30,99	59,92	1,91	1,05	8,3	-
	2×1,6	-36,41	59,95	2,15	1,03	9,2	99,67
proposées	-	-36,29	60	2,15	1,03	11	99,4

L'article de référence [**III.**51] offre une bande passante très large par rapport aux autres travaux. Il offre aussi un meilleur gain que toutes les recherches, à l'exception de [**III.**52] et de celle que nous proposons. En outre, l'efficacité de [**III.**51] est supérieure à celle de [III.52], mais celle que nous proposons est plus élevée, comme le montre le tableau III-8. L'article en [III.48] représente une antenne avec une largeur de bande plus large que toutes les autres publications, ainsi qu'un autre avantage : sa taille est minuscule, comme l'illustre le tableau III.8. D'autre part, l'antenne [**III.**52] présente un gain très élevé par rapport aux autres et une largeur de bande plus large que les autres, à l'exception de [**III.**48], [**III.**51], mais elle présente un inconvénient en raison de sa taille plus importante. L'antenne proposée donne de meilleurs résultats en termes de gain, d'efficacité, de largeur de bande, de S11 et de taille, comme le montre le tableau III-8.

9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la conception des antennes imprimées dans la bande de fréquence 60 GHz de la 5G. Par la suite nous avons présenté une étude de la bande de fréquences de 60GHz.

Dans la troisième partie, nous avons présenté une revue de la conception d'une antenne et des réseaux des antennes dans la bande de fréquence de 60 GHz pour la 5G.

Dans la quatrième partie, nous avons proposé une conception d’une nouvelle antenne patch microruban pour la 5G au voisinage de 60 GHz. Nous avons optimisé également cette antenne dans une cinquième partie pour obtenir la meilleure qualité de performance possible. Ces antennes proposées sont plus adaptées pour les composants électroniques de la 5 G. Plus encore, nous avons proposé également une antenne souple portable par le corps humain dans la bande de fréquences 60 GHz et ayant une forme similaire au bouton relié aux deux cônes. Finalement, nous avons terminé ce chapitre par une analyse comparative. Le prochain chapitre se concentrera plus particulièrement à la conception des antennes et des réseaux d’antennes imprimées en Téra hertz.

Reference de chapitre 3

[III.1] M. Mohammed, M. Fattah, Y. Farhaoui, '' Internet of things: Energy Consumption and Data Storage, '' Procedia Computer Science, Vol. 175, P. 609- 614, 2020, doi : 10.1016/j.procs.2020.07.088.

[III.2] F. Iskandar, T. A. A. Akbar, "A New Gridded Parasitic Patch Stacked Microstrip Antenna for Enhanced Wide Bandwidth in 60 GHz Band‖, " in International Conference on Broadband Communication, Wireless Sensors and Powering (BCWSP), pp. 1-4, IEEE, Jakarta, Indonesia(2017), doi: 10.1109/BCWSP.2017.8272571.

[III.3] I. Halkhams, M. Mahmoud, S. Mazer, M. El Bekkali, W. El Hamdani, F. Temcamani," A Wide Tuning Range Active Filter for the 5G in CMOS Technology," International Journal on Communications Antenna and Propagation, Vol. 6, no, 1, pp. 50-55, 2016, 10.15866/irecap.v6i1.8318.

[III.4] K. Islam , T. Hossain , M. Monirujjaman Khan, M. Masud and R. Alroobaea. '' Comparative Design and Study of A 60 GHz Antenna for Body-Centric Wireless Communications ''. Computer Systems Science & Engineering(CSSE), vol.37, no.1.pp. 19-32, 2021, doi: 10.32604/csse.2021.015528.

[III.5] S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali, D. Sudipta," Study and Design of the Microstrip Patch Antenna Operating at 120 GHz". In: (eds) Terahertz Wireless Communication Components and System Technologies, pp. 175-190, Springer, Singapore, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-9182-9_12.

[III.6] G. Narmadhaa, M. Malathi, S. Ashok Kumar, T. Shanmuganantham, S. Deivasigamani," Performance of implantable antenna at ISM band characteristics for the biomedical base," ICT Express, vol. 8, no. 2, pp. 198-201, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.icte.2021.05.009.

[III.7] M.H. Sharaf, A.I. Zaki, R.K. Hamad, A Novel Dual-Band (38/60 GHz) Patch Antenna for 5G Mobile Handsets," Sensors, vol. 20, no. 9, pp. 1-9, 2020, doi: 10.3390/s20092541.

[III.8] A.S.W. Ghattas, A.A.R. Saad, E.E.M. Khaled," Compact Patch Antenna Array for 60 GHz Millimeter-Wave Broadband Applications," Wireless Pers Commun, vol. 114, pp. 2821–2839, 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07505-w.

[III.9] C. HAMOUDA, " Etude d'une architecture d'émission/réception impulsionnelle ULB pour dispositifs nomades haut débit à 60 GHz," These de doctorat, PARIS-EST UNIVERSITY MSTIC DOCTORAL SCHOOL, 2014.

[III.10] I. Kohei, H. Jiro, S. Kimio, A. Makoto, " Metal Cap with Two Slots covering an Edge of a Mobile Device Substrate for 60GHz Band," in International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings. pp. 223-224, IEEE, Kaohsiung, Taiwan(2014), doi: 10.1109/ISANP.2014.7026611.

[III.11] R. Solofo, S. Julien, D. Philippe, B. Aziz, "Horn antenna design for BAN millimetre-wave on body communication," Conference APS, pp. 1-3, IEEE , Memphis, United States(2014).

[III.12] D. Daghouj, et al "UWB waveform for Automotive Short Range ", International Journal on Engineering on Engineering Applications (IREA), Vol 8, No 4, pp. 158-164, 2020, doi: 10.15866/irea.v8i4.18997.

[III.13] H. R. Raad, A. I. Abbosh, H. M. Al-Rizzo, D. G. Rucker," Flexible and Compact AMC Based Antenna for Telemedicine Applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 2, pp. 524-531, Feb. 2013, doi: 10.1109/TAP.2012.2223449.

[III.14] A.J. I. Arriola, J. I. Sancho, S. Brebels, M. Gonzalez, W. De Raedt," Stretchable dipole antenna for body area networks at 2.45 GHz," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 5, no. 7, p. 852-859, 2011, doi: 10.1049/iet-map.2010.0436.

[III.15] U. Masood, A. Nabeel, X. Y. Malik, H. A. Qammer, ," A Low Profile Antenna for Millimetre-Wave Body-Centric Applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 65. No. 12. pp. 6329 – 6337, 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2700897.

[III.16] K. Chandra, A. Doff, Z. Cao, R. V. Prasad, I. Niemegeers, 60 GHz MAC standardization: Progress and way forward," in 12th Annual Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), pp. 182-187, IEEE, Las Vegas, NV, USA(2015), doi: 10.1109/CCNC.2015.7157974.

[III.17] P. Merlin Teresa & G. Umamaheswari, Compact Slotted Microstrip Antenna for 5G Applications Operating at 28 GHz," IETE Journal of Research, Vol. 68, no. 5, pp. 1-9, 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1779620.

[III.18] T. Jang, C.S. Park," 60-GHz Wideband L-Probe Circular Slotted E Shaped Patch Antenna Array," IEEE Access, vol. 10, pp. 79939 – 79947, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3194708.

[III.19] J. Yin, Q. Wu, C. Yu, H. Wang, W. Hong," Broadband Symmetrical E-Shaped Patch Antenna With Multimode Resonance for 5G Millimeter-Wave Applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 7, pp. 4474 – 4483, 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2911266.

[III.20] S.R. Govindarajulu, R. Hokayem, E.A. Alwan," A 60 GHz Millimeter-Wave Antenna Array for 3D Antenna-in-Package Applications," IEEE Access, vol. 9, pp. 143307 – 143314, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3121320.

[III.21] J.-F. Lin, Q.-X. Chu," Enhancing Bandwidth of CP Microstrip Antenna by Using Parasitic Patches in Annular Sector Shapes to Control Electric Field Components," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 5, pp. 924-927, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2825236.
[III.22] H.Y. Kim, T.H. Jang, H.H. Bae, C.S. Park," A 60 GHz Compact Multidirectional-Beam Antenna-in-Package for Mobile Devices," IEEE Anten. Wireless Propag. Letters, vol. 18, no. 11, pp. 2434-2438, 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2939630.
[III.23] H. Younger, C. Jaehoon," 60-GHz Patch Antenna Array with Parasitic Elements for Smart Glasses," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 17, no. 7, pp. 1252 – 1256, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2841512.
[III.24] F. F. He, k, Wu, H. Wei, H. Liang, C. Xiao-Ping," Low-Cost 60-GHz Smart Antenna Receiver Subsystem Based on Substrate Integrated Waveguide Technology," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 4, pp. 1156-1165, 2012, doi: 10.1109/TMTT.2012.2184127.
[III.25] L. Sam, C. Thijs, V. Patrick, V. Thomas, V. Jan, D. Piet, V. Dries. R. Hendri," Threefold Rotationally Symmetric SIW Antenna Array for Ultra-Short-Range MIMO Communication," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, no. 5, pp. 1689-1699, 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2536163.
[III.26] J. Cyril, C. Antonio, H. Mathieu, K. Julien B. Cyril L. Thierry, P. Laurent, " Wideband Linearly-Polarized Transmitarray Antenna for 60 GHz Backhauling," IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 65, no. 3. pp. 1440-1445, 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2655018.
[III.27] A. M. H. Carlos, A. R. S Rafael," Design of V-Band SIW Fed Cavity Backed Aperture Coupled Microstrip Patch Array Element for Applications in Body Area Networks," International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). pp. 1235-1236, IEEE, Fajardo, Puerto Rico, USA (2016), doi: 10.1109/APS.2016.7696325.
[III.28] F.M. D. Rubén, A. R. Rafael," Design of a V-band circularly polarized microstrip patch antenna array element for applications in body area networks," IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 2309-2310, IEEE, San Diego, CA, USA(2017).
[III.29] M. A. M. Samuel, J. R. S. Alexandre, S. G. Ivana, C. S. F. Raimundo, F. S. Paulo, E. E. C S. Júnior, H. F. S. Paulo, G. P. Post, " Aperture-Koch fractal aperture patch antenna for the 60 GHz ISM band," IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018), pp. 1-3, IEEE, Arequipa, Peru(2018), doi: 10.1109/LAMC.2018.8699059.
[III.30] A. I. Sulyman, A. T. Nassar, M. K. Samimi, G. R. Maccartney, T. S. Rappaport, A. Alsanie, "Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimetre-wave bands," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 9, pp. 78-86, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6894456.
[III.31] S. Jyoti, S. K. Agarwal, "Design of a 60 GHz millimetre-wave single-band microstrip patch antenna for a 5G application," IEEE International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), pp. 227-230, IEEE, Jaipur, India(2017), doi: 10.1109/COMPTELIX.2017.8003969.
[III.32] A. S. Aishah, M. R. C. Beson, S. N. Azemi, S. A .Al Junid," 2017. 60 GHz Milimetre-Wave Antennas for Point-to-Point 5G Communication System," International Conference on Emerging Electronics Solutions for IoT (ICEESI). Volume 140, pp. 1-4, 2017, doi : 10.1051/matecconf/201714001006.
[III.33] L. Y. H. Hang, W. Hang, "Printed U-slot Patch Antenna for 60GHz Applications," Iin International Workshop on Electromagnetics, Applications and Student Innovation Competition, pp. 153-155, IEEE, Kowloon, China(2013), doi: 10.1109/iWEM.2013.6888796
[III.34] M. S. Alam, M. T. Islam, N. Misran, J. S. Mandeep," Wideband Microstrip Patch Antenna for 60 GHz Wireless Applications," Electronica Air Electrotechnica, Vol. 19, no. 9, pp. 65-70, 2013, doi: 10.5755/j01.eee.19.9.5651.
[III.35] C. Nacer, S. Ronan, " Wearable Endfire Textile Antenna for On-Body Communications at 60 GHz," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 11, pp. 799-802, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2207698.
[III.36] M. I. Ahmed, M. F. Ahmed,"A Wearable Flexible antenna integrated on a Smart Watch for 5G Applications," Journal of Physics: Conference Series, Fourth International Conference on Advanced Technology and Applied Sciences (ICaTAS), Vol. 1447, pp. 1-7, Cairo, Egypt(2019), doi: 10.1088/1742-6596/1447/1/012005.
[III.37] B. Saravanya," A miniaturized portable button antenna for WiGig applications," 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). pp. 1-4, IEEE, Coimbatore, India (2017), doi: 10.1109/ICACCS.2017.8014661.
[III.38] L. Seongkyu, C. Jaehoon," A 60-GHz Yagi-Uda circular array antenna with the omni-direcitional pattern for millimetre-wave WBAN applications," International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 1669-1670, IEEE, Boston, MA, USA(2018), doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609346.
[III.39] C. Nacer, A. M. Shoaib, L. C. Laurent, S. Ronan, "60 GHz textile antenna array for body-centred communications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, no. 4, pp. 1816-1824, 2013, doi: 10.1109/TAP.2012.2232633.

[III.40] P. F. D. S. Júnior, F. E. E. C. Santana, M. S. S. Pinto, A. J. R. Serres, C. C. R. de Albuquerque, R. C. S, Freire, " Bio-inspired antenna-on-chip array for 60 GHz ISM band application," Journal of Integrated Circuits and Systems, vol. 14, n. 2, pp. 1-6, 2019, doi: 10.29292/jics.v14i2.53.
[III.41] H. Younger, C. Jaehoon," 60-GHz Patch Antenna Array with Parasitic Elements for Smart Glasses," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 17, no, 7, pp. 1252 – 1256, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2841512.
[III.42] M. Monirujjaman Khan, K. Islam, Md. Nakib Alam Shovon, B. Mohammed , M. Mehedi, Design of a Novel 60 GHz Millimeter Wave Q-Slot Antenna for Body Centric Communications," International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2021, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1155/2021/9795959.
[III.43] J. Haarla, V. Semkin, K. Zheng, A. Dhananjay, M. Mezzavilla, J. Ala-Laurinaho, V. Viikari, Characterizing 60 GHz Patch Antenna Segments for Fully Digital Transceiver," 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, IEEE, Copenhagen, Denmark (2020), doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135803.
[III.44] D. Salah-Eddine, H. Imane, F. Mohammed, B. Younes, M. Said, EL. Moulhime, " Study and Design of Printed Rectangular Microstrip Antenna Arrays at an Operating Frequency of 27.5 GHz for 5G Applications", Journal of Nano- and Electronic Physics. Vol. 13 No 6, 06035(5pp), 2021, doi: 10.21272/jnep.13(6).06035.
[III.45] J. Colaco, R. lohani," Design and Implementation of Microstrip Circular Patch Antenna for 5G Applications," International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), pp. 1-4, IEEE, Istanbul, Turkey(2020), doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179263.
[III.46] M. H. Sharaf, A. I. Zaki, R. K. Hamad, M. M. M. Omar," A Novel Dual Band (38/60 GHz) Patch Antenna for 5G Mobile Handsets," Sensors, vol. 20, no. 9, pp. 1-19, 2020, doi: 10.3390/s20092541
[III.47] E. Dheyab, Q. Nidal," Design and Optimization of Rectangular Microstrip Patch Array Antenna Using Frequency Selective Surfaces for 60 GHz," International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, no. 7, pp. 4679-4687, 2016.
[III.48] M. R. Kota, A. E. Abejide, S. Pandey, O. Aboderin, A. Teixeira," Silicon nitride 60 GHz antenna for IoT applications," IEEE, International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing(CNSDSP), pp. 1-6, IEEE, Porto, Portugal(2020), doi: 10.1109/CSNDSP49049.2020.9249629.
[III.49] K. Ghanendra, K. Chakresh," Design and Analysis of Alphabetical Slots of Patch Antenna for Mobile Optical Communication at 60 GHz," Journal of Optical Communications. pp. 1-9, 2019, doi: 10.1515/joc-2019-0110.
[III.50] E. Thakur, N. Jaglan, S. Dev Gupta, S. Srivastava," Compact microstrip antenna design at 60 GHz for next generation communication systems," International Journal of Microwave and Optical Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 209-2015, 2018.
[III.51] H. M. Marhoon, N. Qasem," Simulation and optimization of tuneable microstrip patch antenna for fifth-generation applications based on graphene," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 10, No. 5, pp. 5546~5558, October 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i5.pp5546-5558.
[III.52] K. Islam, T. Hossain, MM. Khan, M. Masud, R. Alroobaea," Comparative Design and Study of A 60GHz Antenna for Body-Centric Wireless Communications," Computer Systems Science & Engineering (CSSE), vol. 37, no. 1, pp. 19-32, 2021, doi: 10.32604/csse.2021.015528.
[III.53] G. Zhang, S. Pu, X. Xu; Y. Liu, C. Wang," Design of 60-GHz microstrip antenna array composed through circular 177 contour feeding line," Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp. 1010-1013, IEEE, Shenzhen(2016), doi: 10.1109/APEMC.2016.7522931.
[III.54] A. Jabbar, Q. H. Abbasi, M. A. Imran and M. U. Rehman," Design of a 60 GHz Microstrip Antenna for 171 MultiGigabit Industrial Communication in Viewpoint of Industry 4.0," International Workshop on Antenna Technology (iWAT), pp. 235-238, IEEE, Dublin, Ireland (2022), doi: 10.1109/iWAT54881.2022.9810999.

Chapitre 4 : Étude et conception des antennes imprimées en bande Terahertz

1 Introduction

La gamme des Téra hertz désigne les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 100 GHz et 10 THz, ou dont les longueurs d'onde sont comprises entre 3 mm et 30 μm. La lumière située entre les ondes radio et l'infrarouge possède des propriétés uniques. Grâce aux Téra hertz, il est possible de "regarder à l'intérieur" des plastiques et des textiles, du papier et du carton. De nombreuses biomolécules, protéines, explosifs ou stupéfiants présentent également des lignes d'absorption caractéristiques, appelées "empreintes digitales" spectrales, à des fréquences comprises entre 0,1 THz et 5 THz. Les deux principaux avantages du rayonnement Téra hertz sont d'une part, la pénétration de matériaux traditionnellement opaques et, d'autre part, une grande sélectivité chimique.

La nécessité d'une électronique fonctionnant à des fréquences de l'ordre du térahertz contribue grandement à son développement. On a vu apparaître ces dernières années des systèmes de transmission et de réception fonctionnant dans une gamme de fréquences allant de quelques centaines de gigahertz à plusieurs térahertz. Dans la future génération de communications sans fil, la transmission rapide et efficace d'informations entre différents composants électriques est essentielle [IV.1]. La bande de fréquence spéciale comprise entre 0,1 THz et 10 THz, appelée bande Téra hertz (THz), est probablement la meilleure option pour la transmission rapide de données, car elle réduit les coûts de transmission. Cette bande fait l'objet de recherches constantes pour les procédures fluoroscopiques, les biopsies (Une biopsie est une procédure qui consiste à prélever un morceau de tissu ou un échantillon de cellules de corps afin de les analyser en laboratoire) non destructif, ainsi que pour les communications à haute fréquence, les observations à très haute dépendance temporelle [IV.2] [IV.3], etc. Le problème de l'étude de la diffusion et de la détection des signaux dans la gamme THz est plus aigu que celui de l'optique et de l'électronique. La haute sensibilité et la réponse rapide à température ambiante ne sont pas évidentes pour les capteurs THz, car leur principe de fonctionnement essentiel réside dans la transformation de signaux optiques en signaux électriques.

Les procédures de fluoroscopie sont effectuées pour aider à diagnostiquer une maladie ou pour guider les médecins pendant certaines procédures de traitement. Certaines procédures de fluoroscopie peuvent être réalisées en ambulatoire pendant que le patient est éveillé - par exemple, une série gastro-intestinale supérieure pour examiner l'œsophage, l'estomac et l'intestin grêle, ou un lavement baryté pour examiner le côlon. En outre, la fluoroscopie peut être pratiquée le jour même ou parfois en hospitalisation, généralement sous sédation. C'est le

cas, par exemple, du cathétérisme cardiaque, qui permet d'examiner le cœur et les artères coronaires qui irriguent le muscle cardiaque.

Dans le cas des hautes fréquences ("Téra hertz"), le succès du système de communication sans fil Téra hertz exige le développement et la conception d'antennes performantes, qui minimisent les effets parasites sur le trajet des ondes de transmission du signal électrique [IV.4]. Diverses techniques sont utilisées pour améliorer les performances, telles que le gain et la bande passante ; l'une de ces techniques consiste à réduire la permittivité diélectrique (εr) du substrat [IV.5]. Les réseaux de réflecteurs permettent de générer de nombreuses résonances et d'augmenter le gain aux fréquences Téra hertz. Pour améliorer le gain de l'antenne, un deuxième élément de patch peut également être ajouté devant le premier élément, ce que l'on appelle une antenne à patch superposée [IV.6].

Dans la gamme de fréquences Téra hertz, les antennes les plus couramment utilisées sont de type planaire et les dipôles (dipôles d'Hertz) construits de manière monolithique sur le substrat. Sur ce substrat se trouvent des composants actifs pour la génération ou la détection de rayonnement avec une lentille hémisphérique en silicium placée à l'arrière de ce substrat. Bien que ces antennes ne soient pas vraiment "à large bande", elles ont jusqu'à présent donné les meilleurs résultats en spectroscopie Téra hertz pulsée. En revanche, leur faible efficacité les rend inadaptées à une utilisation en continu, lorsque les puissances impliquées sont faibles.

Les antennes patch micro ruban ont plusieurs caractéristiques positives importantes telles que leur profil compact et leur petite taille, elles sont résistantes aux chocs électriques ainsi qu'aux mouvements violents, et elles sont adaptables et économiques pour un faible coût [IV.7]. Ces caractéristiques positives des APMT (Antennes patchs microstrip Terahertz) ont suscité une grande curiosité chez de nombreux chercheurs scientifiques pour ses applications possibles dans le domaine des térahertz [IV.8].

Ce chapitre vise à surmonter les problèmes associés aux antennes imprimées et aux réseaux d'antennes en proposant des conceptions d'antennes patch et de réseaux d'antennes présentant les meilleures performances électriques et de rayonnement. Ce travail est structuré autour de quatre axes : Le premier concerne les applications des fréquences térahertz. Le deuxième concerne composants de Téra hertz. Le troisième les antennes adaptées aux fréquences térahertz. Le quatrième l'étude et la conception d'une antenne patch en microruban fonctionnant à 120 GHz. Nous avons terminé ce chapitre par une conclusion.

2 Applications des fréquences Téra hertz

Les applications potentielles du rayonnement Téra hertz sont nombreuses et diverses, allant de la sécurité et de la science des matériaux aux communications et à la médecine. Si les défis technologiques liés à la réalisation de composants systèmes pouvaient être relevés, le rayonnement Téra hertz pourrait avoir un impact profond sur de nombreux aspects de notre vie.

Le rayonnement THz peut pénétrer profondément dans les matériaux non polaires et non métalliques tels que le papier, le plastique, les vêtements, le bois et la céramique, qui sont généralement opaques aux longueurs d'onde optiques. Ces matériaux sont souvent utilisés pour l'emballage, ce qui fait de l'imagerie THz un outil utile pour les essais non destructifs et la détection d'objets cachés, car elle n'est pas nocive pour l'homme, contrairement aux rayons X.

En outre, la région THz est riche en caractéristiques spectrales liées à divers processus physiques, tels que les transitions rotationnelles des molécules, les mouvements vibratoires des composés organiques et les vibrations du réseau dans les solides. Ces caractéristiques rendent la technologie THz efficace pour la détection d'armes, d'explosifs et d'agents chimiques et biologiques dissimulés sous divers matériaux de couverture. Elle est également utile pour des applications telles que les essais non destructifs dans le contrôle des processus industriels, où elle peut être utilisée pour inspecter la structure interne des matériaux sans les endommager.

La technologie Téra hertz a un large éventail d'applications, et de nouvelles possibilités sont découvertes au fur et à mesure que la recherche dans ce domaine continue de progresser. Voici quelques exemples spécifiques de l'utilisation actuelle de la technologie Téra hertz ou des recherches menées dans ce domaine

2.1 Biomédical

Les ondes térahertz représentent la partie des ondes électromagnétiques située entre la région des micro-ondes et celle des infrarouges. La recherche récente s'est concentrée sur l'application des ondes térahertz dans les applications biomédicales telles que la détection du cancer. Les méthodes de diagnostic actuelles dans le traitement du cancer impliquent l'imagerie par IRM (imagerie par résonance magnétique) et la biopsie. En raison de la faible énergie photonique que possèdent les térahertz, il n'y a pas de risques pour la santé, contrairement aux méthodes traditionnelles. Les cellules cancéreuses peuvent être détectées en surveillant l'irrigation sanguine des tissus affectés et le niveau d'eau dans les tissus locaux. L'imagerie térahertz permet

de diagnostiquer ce phénomène. Le rayonnement THz peut être généré et détecté à l'aide de divers systèmes commercialisés.

Le diagnostic de maladies potentiellement mortelles telles que le cancer à un stade précoce reste un problème de recherche. Parmi les méthodes actuelles de diagnostic se trouvent les techniques d'imagerie telles que l'IRM, l'imagerie par rayons X et la biopsie. Les méthodes d'imagerie microscopique présentent des résolutions ainsi que des spécificités moindres, ce qui rend la détection difficile. Il est donc nécessaire de disposer de méthodes efficaces pour détecter et différencier les cellules normales des cellules malignes. La technologie térahertz a été utilisée dans des applications allant de la communication à grande vitesse au diagnostic de maladies mortelles telles que le cancer.

La détection des maladies potentiellement mortelles est une préoccupation majeure. Selon les rapports de l'organisation mondiale de la Santé (OMS), près de 50 % des décès dans les pays du monde entier sont dus à des maladies non transmissibles telles que les maladies cardiaques, le cancer et le diabète, et 23 % d'entre eux sont des décès prématurés, faute de mécanismes de détection adéquats. Le diagnostic précoce d'une maladie peut réduire le taux de mortalité.

Les méthodes de détection actuelles imposent une variation des modèles cellulaires en cas d'exposition prolongée aux rayonnements, ce qui entraîne des effets secondaires chez les êtres humains. En outre, l'équipement disponible pour la détection est volumineux et n'est pas rentable. Le cancer peut être détecté par la présence de formol dans les cellules. Pour une détection correcte, une combinaison d'imagerie macroscopique et microscopique des marges cellulaires est nécessaire. Pour permettre une détection efficace, on utilise le rayonnement térahertz. La faible énergie des photons du rayonnement THz ne modifie pas les propriétés des cellules et ne les endommage pas. Sa sensibilité aux substances polaires en fait une méthode populaire d'imagerie des cellules malignes. Une antenne métamatériau dans la gamme THz augmente la sensibilité de la détection moléculaire grâce à ses propriétés précises.

Plus récemment, la technologie Téra hertz n'a été utilisée que dans quelques applications scientifiques en radioastronomie et en recherche de laboratoire, et ces systèmes Téra hertz étaient des solutions coûteuses et encombrantes. En effet, chaque projet de recherche a ses exigences spécifiques.

2.2 Imagerie

L'imagerie Téra hertz, également connue sous le nom d'imagerie de rayon T, peut être utilisée pour créer des images de la structure interne de matériaux opaques à la lumière visible et à

d'autres formes de rayonnement électromagnétique. Par exemple, des chercheurs ont utilisé l'imagerie Téra hertz pour analyser de manière non destructive la structure interne de peintures, comme la "Joconde" de Léonard de Vinci.

2.3 Spectroscopie

La spectroscopie Téra hertz peut être utilisée pour identifier la composition chimique des matériaux. Par exemple, des chercheurs ont utilisé la spectroscopie Téra hertz pour détecter des traces d'explosifs et de drogues illégales, ainsi que des gaz nocifs, des pesticides, des antibiotiques et des composés chimiques toxiques.

2.4 Sécurité et défense

La technologie Téra hertz fait l'objet de recherches en vue de son utilisation dans des applications de sécurité et de défense, telles que la détection d'armes et d'explosifs dissimulés. Par exemple, des chercheurs ont utilisé l'imagerie Téra hertz pour détecter à distance des armes dissimulées sur des individus.

2.5 Le contrôle de la qualité et les tests non destructifs

La technologie Téra hertz peut être utilisée pour les essais non destructifs et le contrôle de la qualité dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et l'électronique. Par exemple, des chercheurs ont utilisé l'imagerie Téra hertz pour inspecter la structure interne de composants électroniques et détecter des défauts tels que des fissures et des vides. Un autre exemple est l'utilisation de scanners THz pour le contrôle de qualité non destructif des composés de fibre de verre et des revêtements de peinture dans les composants aérospatiaux.

2.6 Détection chimique

Les spectres vibrationnels Téra hertz représentent les empreintes digitales caractéristiques de nombreuses substances chimiques ; cette technologie peut donc être utilisée pour l'identification de substances sans contact.

2.7 Alimentation et agriculture

La technologie Téra hertz peut être utilisée pour le contrôle de la qualité et la sécurité alimentaire dans les secteurs de l'agriculture et de l'alimentation. Par exemple, la spectroscopie THz peut être une solution efficace pour la détection des résidus de pesticides, car de nombreux produits chimiques présentent des signatures spectrales distinctes dans la gamme THz. De même, les signatures spectrales THz peuvent être utilisées pour détecter les additifs alimentaires ou les antibiotiques.

2.8 Astronomie

La technologie Téra hertz peut être utilisée pour étudier les objets célestes et le milieu interstellaire. Par exemple, des chercheurs ont utilisé des télescopes Téra hertz comme le télescope HEAT (High Elevation Antarctic Terahertz) pour étudier les propriétés des régions de formation d'étoiles et la chimie de l'univers.

2.9 Conservation de l'art

La technologie Téra hertz peut être utilisée pour l'analyse non destructive d'œuvres d'art et d'artefacts. Par exemple, des chercheurs ont utilisé l'imagerie Téra hertz pour étudier la structure interne de poteries anciennes et identifier les techniques de fabrication utilisées.

2.10 Contrôle des processus industriels

La technologie térahertz peut être utilisée pour contrôler les processus industriels et identifier les défauts des produits. Par exemple, des chercheurs ont utilisé l'imagerie térahertz pour inspecter la structure interne de pièces métalliques au cours du processus de fabrication et détecter des défauts tels que des fissures et des vides.

2.11 Télécommunications

Pour l'instant, les fréquences Téra hertz ne sont pas exploitées et ne sont pas attribuées au-delà de la bande de fréquence de 275 GHz. Par conséquent, la gamme de fréquences comprise entre 275 GHz et 1 THZ est possible pour mettre en place des communications de données à haut débit. Les pertes observées au cœur de l'atmosphère sont dues à la fréquence des ondes diffusées [IV.9][IV.10] ainsi qu'aux pics de résonance de tous les composants chimiques qui la composent. Le mouvement des molécules d'eau provoque plusieurs pics d'absorption dans la bande des Téra hertz, mais certaines gammes de fréquences peuvent être utilisées et sont présentées dans le tableau IV-1. Les fréquences supérieures à 1 THz ne sont pas classées en raison des nombreux pics associés à des phénomènes dits d'absorption qui rendent ces fréquences inacceptables pour les communications à grande vitesse et à longue portée. La perte subie par les ondes Téra hertz à travers l'atmosphère implique que nous avons besoin des sources Téra hertz robustes et compactes pour une utilisation dans des environnements réels.

Tableau IV-1: Bandes de fréquences utilisables pour les communications sans fil jusqu'à 1 THz

Bande de fréquence	**Bande passante**	**Atténuation**
215 – 315 GHz	100 GHz	2 à 4 dB/km
330 – 365 GHz	35 GHz	5 dB/km
390 – 435 GHz	45 GHz	9 dB/km
450 – 515 GHz	65 GHz	11 à 12 dB/km
625 – 725 GHz	100 GHz	11 dB/km
790 – 900 GHz	110 GHz	12 dB/km
925 – 950 GHz	25 GHz	15 dB/km

Les communications ultrarapides non filaires nécessiteront probablement des transferts de données à la fois à faible et à longue distance. En effet, ces transmissions à très courte distance ont diverses propriétés dans les systèmes électroniques qui leur sont très applicables. Les augmentations de fréquence ont un effet significatif sur la quantité de pertes subies lorsque l'information circule dans les circuits électriques, augmentant la demande d'énergie, et les phénomènes liés aux effets thermiques tout en réduisant les caractéristiques des dispositifs [IV.11].

Les systèmes de communication sans fil qui ont des débits de données très élevés et de faibles porteuses de données sur de courtes distances de moins d'un mètre permettent de télécharger rapidement des données, comme des magazines ou des films HD, à partir d'un kiosque de téléchargement. En augmentant la longueur de la couverture à une distance comprise entre 1 mètre et 100 mètres et plus, ces utilisations sont susceptibles d'impliquer un quartier ou un appartement contenant des voies de transmission isolées du point de vue environnemental [IV.12]. La littérature scientifique mentionne également la possibilité de réaliser des transferts de données à des taux allant de 100 à 120 Gbps [IV.13]. La distance nécessaire pour atteindre ces objectifs peut être estimée entre 0,5 et 20 mètres.

Le réseau de liaison principal est essentiellement constitué de communications non filaires couvrant une zone plus large de plus de cent mètres et permettant des flux de transmission importants avec des débits de données considérables. Le développement progressif de ce type de réseau consiste à compenser le passage des foyers à micro-ondes aux foyers à plus haute

fréquence. Dans un avenir plus lointain, et pour répondre aux besoins des utilisateurs en matière de flux de données et d'informations, il faut envisager une évolution progressive de la technologie, notamment en direction des fréquences et des sources Téra hertz. Des recherches scientifiques font état de performances élevées atteignant 10 Gbps à 120 et 140 GHz pour des distances comprises entre 5,8 km et 1,5 km [IV.14].

3 Composants de THz

3.1 Sources de rayonnement Téra hertz

Bien que le rayonnement térahertz (THz) ait été observé pour la première fois il y a une centaine d'années, la partie correspondante du spectre électromagnétique a longtemps été considérée comme une région peu explorée, à la frontière entre les micro-ondes et l'infrarouge. Cette situation a changé au cours des dix dernières années avec le développement rapide de sources THz cohérentes, telles que les oscillateurs à l'état solide, les lasers à cascade quantique, les dispositifs à l'état solide pompés optiquement et les nouveaux dispositifs à électrons libres, qui ont à leur tour stimulé une grande variété d'applications allant de la science des matériaux aux télécommunications, de la biologie à la biomédecine.

Les ondes THz peuvent être générées par différents types de sources. Nous en décrivons ici les principales :

- Le rayonnement du corps noir peut être utilisé comme source thermique. Il émet dans la bande THz à une intensité extrêmement faible à partir de 2k [IV.15]. Le spectre d'une lampe à mercure couvre toute la plage THz. Cependant, son énergie est faible et les ondes produites ne sont pas cohérentes.
- Les diodes Gunn, les transistors à haute fréquence et les multiplicateurs de fréquence sont des sources électroniques qui produisent une onde monochromatique jusqu'à 1 THz. Il est aussi à noter l'existence d'oscillateurs à ondes rétrogrades qui permettent d'obtenir un rayonnement stable cohérent jusqu'à 2 THz.
- Dans le domaine des térahertz, les lasers quantiques en cascade, qui émettent des ondes monochromatiques grâce à des transitions inter-sous-bandes dans des puits quantiques semi-conducteurs, peuvent générer des fréquences spécifiques en fonction de la conception du semi-conducteur.
- La génération d'une onde THz par pompage optique des molécules de gaz est également réalisée par les lasers à gaz. La présence d'une transition rotationnelle importante dans le domaine THz rend possible une transition laser entre deux niveaux vibrationnels et

l'émission d'un photon dans le domaine THz. On utilise principalement le CH3F, le CH3OH, le NH3, le COOH et le CH2F2. [15]. Ils sont accessibles dans le commerce.

- Actuellement, on utilise principalement des sources optoélectroniques pour créer une onde THz. On parle ici d'une antenne THz. Il est constitué de deux électrodes métalliques séparées de quelques dizaines de microns et placées sur un substrat semi-conducteur, tel qu'illustré dans la figure IV.1 (a) [IV.15]. La propagation est assurée par l'application d'un courant continu de polarisation aux électrodes, ce qui fait que l'antenne agit comme un condensateur dans le circuit montré à la figure IV.1 (b). Une impulsion infrarouge ultra-courte, avec une focalisation de 20 à 200 fois entre les deux électrodes, arrête le circuit pour un court moment. Quand le courant de polarisation change brusquement, cela provoque la création d'un rayonnement THz. L'onde THz produite par une antenne a un spectre très large, pouvant s'étendre de 0,1 à 5 THz en utilisation d'impulsions femtosecondes très courtes. Cela s'explique par le fait qu'un courant de polarisation est mis en place sur les électrodes de l'antenne pendant la durée Δt de l'impulsion laser. À mesure que le Δt diminue, le spectre devient plus large. La durée de vie des porteurs du semi-conducteur utilisé [IV.16] est également un paramètre essentiel.

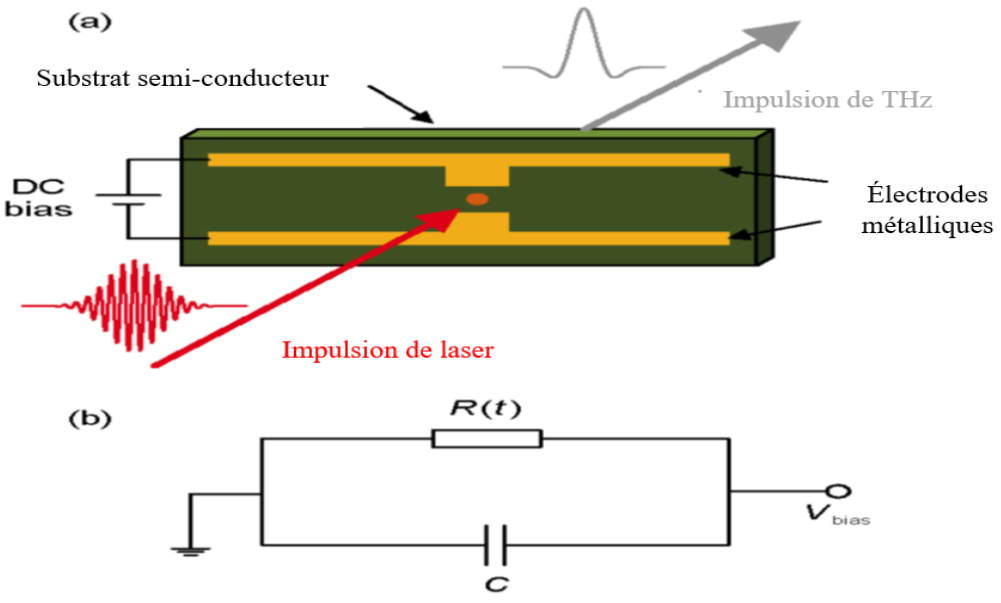


Figure IV. 1: Schéma d'une antenne THz (a) et d'un circuit RC équivalent (b)

- Il est vrai que des sources sont à l'origine d'une onde THz via un procédé de génération de la fréquence différence (FDG) de deuxième ordre dans un cristal non linéaire. L'utilisation de deux lasers à champ optique, émettant dans le visible ou l'infrarouge,

entraîne une polarisation induite, donnant lieu à une onde électromagnétique cohérente dans le domaine THz. On peut aussi les nommer "sources définies par des paramètres". Le niveau de puissance maximal de ces sources varie en fonction de la valeur du seuil de dégâts optiques du cristal. Le FDG peut être généré de deux manières différentes : soit entre deux impulsions laser monochromatiques dans le régime nanoseconde, soit entre deux composantes de Fourier dans une seule impulsion laser femtoseconde. Dans la première disposition, la source térahertz est monochromatique, tandis que dans la seconde, elle est polychromatique.

3.2 Détecteurs THz

Contrairement aux sources THz, les détecteurs ont connu un développement plus important, avec des performances, une compacité et un coût qui permettent aujourd'hui de répondre à de nombreuses applications. Les détecteurs se révèlent extrêmement performants en termes de sensibilité, notamment les diodes Schottky intégrées dans des guides d'ondes [IV.17], mais aussi en termes de bande passante, avec des démonstrations de communication en laboratoire à très haut débit [IV.18], mais restent limités en termes d'intégration électronique dans des Circuits intégrés monolithiques à micro-ondes. Des matrices de détecteurs ont également été développées pour l'imagerie en temps réel, basées sur des transistors ou des microbolomètres, avec des performances moindres en termes de sensibilité et de bande passante, mais offrant des solutions réussies pour l'imagerie.

3.2.1 Spectres de transmission de THz

En règle générale, deux techniques spectroscopiques sont mises en œuvre pour évaluer les spectres de transmission dans la gamme de fréquences térahertz : On peut aussi décrire ces deux méthodes comme étant la spectroscopie infrarouge à transformation de Fourier (FTIR) et la spectroscopie dans le domaine temporel (TDS), qui sont des outils essentiels dans le domaine de l'analyse.

3.2.2 Spectroscopie FTIR

La figure IV.2 illustres le schéma de l'assemblage expérimental d'un spectromètre FTIR, semblable à celui commercialisé par l'entreprise Brucker. Afin d'enregistrer les spectres de transmission dans la gamme des térahertz, une lampe à mercure peut être placée dans la section "source". On peut décrire le spectre de cet élément comme étant comparable à celui d'un corps noir, allant de 1,5 à 30 térahertz [IV.19].

Le faisceau émis par la source est collimaté et injecté dans un interféromètre de Michelson. L'interféromètre illustré sur la Figure IV.2 est composé d'un séparateur de faisceau et d'un ensemble de miroirs plats. Le déplacement d'un des miroirs sur une plaque de translation motorisée peut modifier la différence de pas entre les deux bras de l'interféromètre.

Un interférogramme numériquement reconstruit met en évence l'évolution de l'intensité de la source à la sortie de l'interféromètre, en fonction de la différence de chemin optique pour les différentes longueurs d'onde du spectre de la source. Il énonce les interférences à deux ondes qui se produisent successivement avec une annulation et un renforcement des ondes pour chaque longueur d'onde de la source lorsque le miroir mobile se déplace. On trouve dans l'interférogramme l'ensemble des informations relatives au spectre allant de 1,5 à 30 THz.

À la sortie de l'interféromètre de Michelson, le faisceau est focalisé dans un compartiment qui doit contenir un échantillon. Il se propage jusqu'au détecteur, qui peut être pyroélectrique, comme un détecteur de sulfate de tri glycine deutéré (DTGS), ou, pour plus de sensibilité, un bolomètre. Un polariseur, qui est soit un filtre polarisant, soit un réseau polarisant, peut être ajouté à l'entrée du compartiment de l'échantillon pour l'enregistrement de l'interférogramme en lumière polarisée.

L'enregistrement d'interférogramme effectué en l'absence d'échantillon sert de référence. Dans le compartiment réservé à l'échantillon, on positionne une lame possédant deux faces parallèles et polies selon des normes optiques, avec des coupes perpendiculaires à l'axe principal de la référence diélectrique, à savoir x, y ou z. L'interférogramme enregistré au niveau du détecteur sera influencé par le spectre de transmission de cet échantillon.

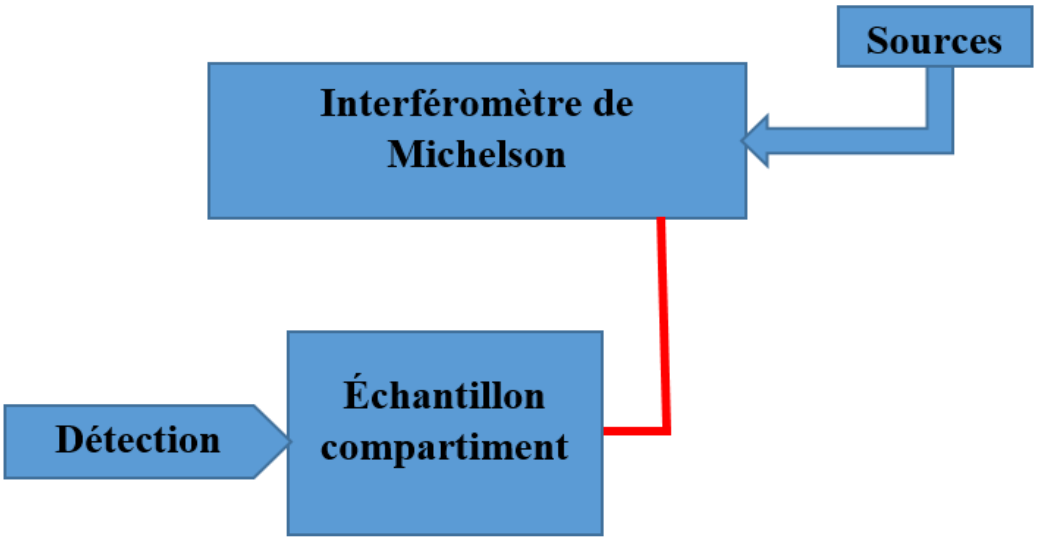


Figure IV. 2: Schéma de montage d'un spectromètre FTIR commercialisé par la société Brucker Vertex-80

3.2.3 Spectroscopie dans le domaine temporel TDS

Une autre technique est utilisée dans le domaine temporel (TD) pour enregistrer des spectres de transmission dans le domaine THz en lumière polarisée [IV.20]. En outre, on peut trouver la description du son principe de fonctionnement dans le diagramme de la figure IV.3 [IV.21].

Une impulsion laser femtoseconde, représentée en rouge, est divisée en deux par un séparateur de faisceau : la première impulsion est focalisée sur une première antenne THz, appelée émetteur (voir figure IV.3). Le spectre de cette antenne se situe entre 0,1 et 4 THz, avec une impulsion THz de quelques dizaines de picosecondes [IV.21]. Les électrodes de l'antenne assurent une polarisation linéaire de l'impulsion THz transmise. La deuxième impulsion traverse une ligne à retard avant d'être concentrée dans une autre antenne, le détecteur. La ligne à retard permet d'ajuster en continu le temps d'arrivée de l'impulsion sur l'antenne du détecteur.

La première antenne émet une impulsion térahertz qui est canalisée dans l'air grâce à une lentille et des miroirs paraboliques, puis dirigée vers l'antenne de détection par un processus de focalisation. On ne peut pas observer une impulsion THz directement. La seconde impulsion femtoseconde est nécessaire pour que des porteurs soient générés entre les deux électrodes de l'antenne du détecteur. Ces porteurs de charges sont animés par un champ électrique dans la gamme térahertz. Ainsi, un courant proportionnel au champ électrique térahertz est engendré pendant la durée de l'impulsion. Grâce à la ligne à retard, l'impulsion femtoseconde peut prélever un échantillon du champ électrique THz, ce qui permet de recréer son profil temporel tel qu'il atteint l'antenne de détection. L'onde térahertz non perturbée est la référence pour la propagation.

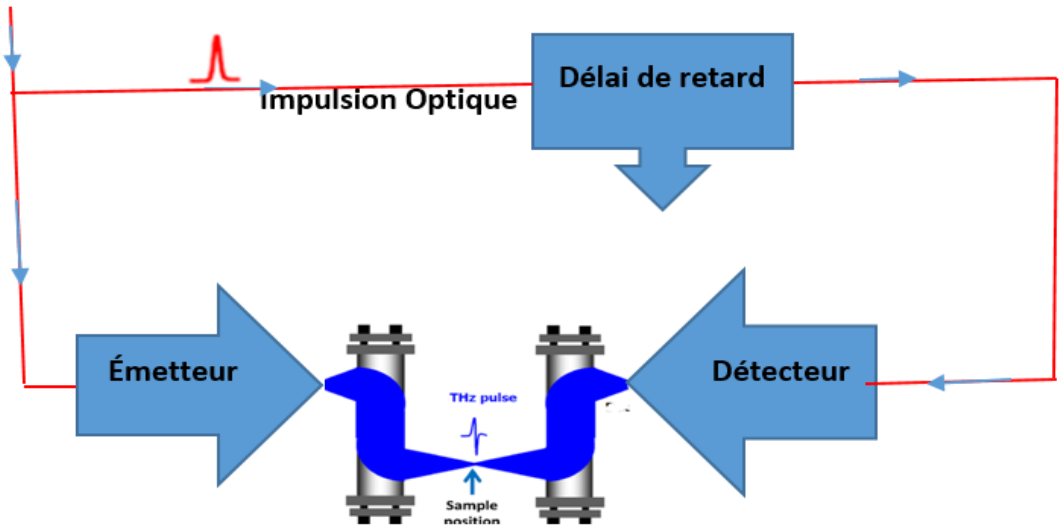


Figure IV. 3: Schéma d'une installation de spectroscopie TDS pour mesurer le spectre de transmission THz

La transformée de Fourier des signaux bi-temporels permet de déterminer deux spectres dont le rapport correspond au spectre de transmission THz dans la lumière polarisée du cristal étudié. Ce spectre contient également les pertes de Fresnel aux interfaces et les pertes d'absorption.

4 Antennes adaptées aux fréquences térahertz

La bande de fréquence térahertz ne convient pas aux structures de propagation habituelles en électronique. C'est pour cette raison que des méthodes quasi-optiques, en particulier la propagation par faisceau gaussien, sont employées. Pour générer le courant, il est essentiel d'utiliser une antenne adaptée à cette plage de fréquences. Les antennes planaires sur substrat sont les plus simples à réaliser, la plupart d'entre elles étant utilisées jusqu'à présent. Dans cette partie du travail, nous proposons la conception d'un réseau d'antennes patch microruban. Ce réseau se compose de deux antennes patch mises en œuvre en série.

Les antennes patch à microruban sont principalement considérées dans l'avancement des mécanismes de communication les plus récents, contrairement aux antennes conventionnelles, parce qu'elles offrent l'avantage d'un faible encombrement et de procédures de fabrication simples ou peu coûteuses. La structure de l'antenne consiste en une bande métallique très fine (patch) ($t << \lambda_0$), où λ_0 est la longueur d'onde de l'espace libre), placée à une petite fraction d'une longueur d'onde ($h << \lambda_0$, typiquement $0{,}003\ \lambda_0 \leq h \leq 0{,}05\ \lambda_0$) au-dessus d'un plan de masse. Le diagramme de rayonnement maximal du patch est normal au patch. Pour un patch rectangulaire, L représente la longueur du patch qui est typiquement $\lambda_0 /3 < L < \lambda_0 /2$, ce qui contrôle la fréquence de l'antenne et W représente la largeur du patch qui est plus petite que λ_0 mais ne peut pas être trop petite sinon l'antenne devient une ligne microruban mais pas un radiateur. La largeur contrôle la résistance d'entrée de l'antenne patch. Le plan de masse est séparé par une feuille diélectrique (le substrat).

Un réseau d'antennes (souvent appelé réseau phasé) est un ensemble de deux antennes ou plus. Les signaux des antennes sont combinés ou traités pour améliorer les performances d'une seule antenne. Le réseau d'antennes peut être utilisé pour augmenter le gain global, fournir une réception diversifiée et déterminer la direction des signaux entrants. Il existe deux types de réseaux d'antennes :

- Les réseaux linéaires sont utilisés pour les applications nécessitant des diagrammes de rayonnement en éventail (avec un faisceau étroit dans le plan parallèle à l'axe du réseau

et un faisceau large dans le plan orthogonal). Le réseau peut être alimenté par un réseau de diviseurs de puissance en série ou en groupe.

- Le réseau planaire est utilisé pour créer des diagrammes de rayonnement à partir du faisceau crayon avec une directivité modérée et élevée.

5 Application

5.1 Etude et conception d'une antenne patch microruban fonctionnant à 120 GHz

Dans ce qui suit, nous présentons une étude concernant la conception d'une antenne patch microstrip avec une fente rectangulaire destinée à la technologie sans fil Téra hertz. Cette antenne fonctionne pour une fréquence située dans la bande Téra hertz (120 GHz). Cette fente conçue permet d'améliorer les caractéristiques de l'antenne. Les dimensions de ce type d'antenne pour la bande Téra hertz sont réduites par rapport aux antennes conventionnelles. Les dimensions du patch et de la ligne d'alimentation sont petites et difficiles à fabriquer. Le substrat choisi pour cette conception est le Rubber_hard avec une permittivité $\varepsilon r = 3$ et sa hauteur ($h = 0{,}1$ mm).

5.1.1 Méthodologie de conception d'une antenne patch microruban

La conception de l'antenne patch microruban est basée sur le processus suivant : premièrement, on choisit le matériel à imprimer, qui est le substrat. Ici, nous choisissons un substrat de type Rubber_hard de permittivité $\varepsilon r = 3$ ainsi que sa hauteur ($h = 0{,}1$ mm), cette dernière joue un rôle trés importante pour les caractéristiques des antennes microruban, pour cela la relation de [IV.22] permet de déterminer la hauteur maximum du substrat. Dans la deuxième étape, nous déterminons les dimensions de l'élément rayonnant (patch), sa largeur et sa longueur. Dans la troisième étape, nous calculons également les dimensions du plan de masse, et enfin, nous choisissons le type d'alimentation. Dans ce travail nous utilisons l'alimentation par ligne micro ruban, en appliquant les formules de [IV.22]. Ces formules ont permis d'obtenir les valeurs des différents paramètres présentés dans le tableau IV-2, c'est-à-dire les dimensions globales du dispositif considéré. La figure IV.4 illustre la structure obtenue après avoir calculé les dimensions des différents composants de cette antenne. Les résultats obtenus sont utilisés ici pour améliorer les caractéristiques globales de cette antenne, notamment en ce qui concerne sa bande passante et la réduction de sa taille.

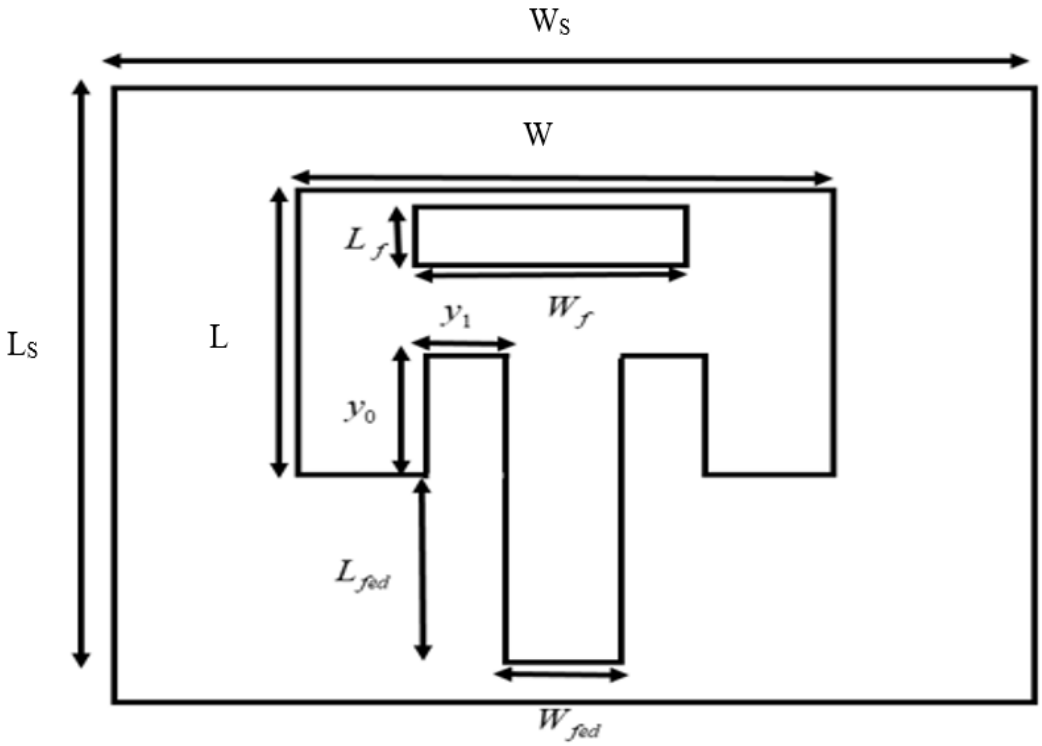


Figure IV. 4 : Géométrie de l'antenne proposée

Le Tableau suivant regroupe les paramètres de l'antenne proposée :

Tableau IV-2: Paramètres de l'antenne proposée

Paramètres	**Valeurs (cm)**	**Paramètres**	**Valeurs (cm)**
L_S	0,2	L_{fed}	0,093
W_S	0,22	W_{fed}	0,028
h	0,01	y_0	0,071
W	0,09	y_1	0,056
L	0,07	L_f	0,01

5.1.2 Résultats des simulations et interprétations

La figure IV.5 illustre le résultat de la simulation de la courbe du coefficient de réflexion S_{11} associé à l'antenne proposée. Nous constatons que cette antenne réalise des caractéristiques meilleurs que les travaux existe dans la littérature dans la bande THz, et la Figure IV.6 montre les diagrammes de gain tridimensionnels et bidimensionnels.

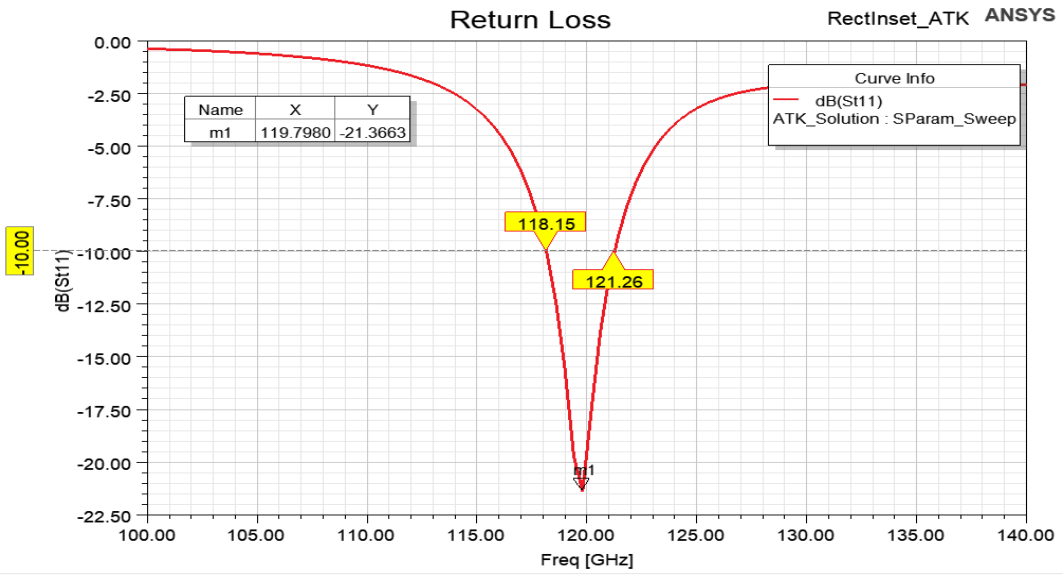
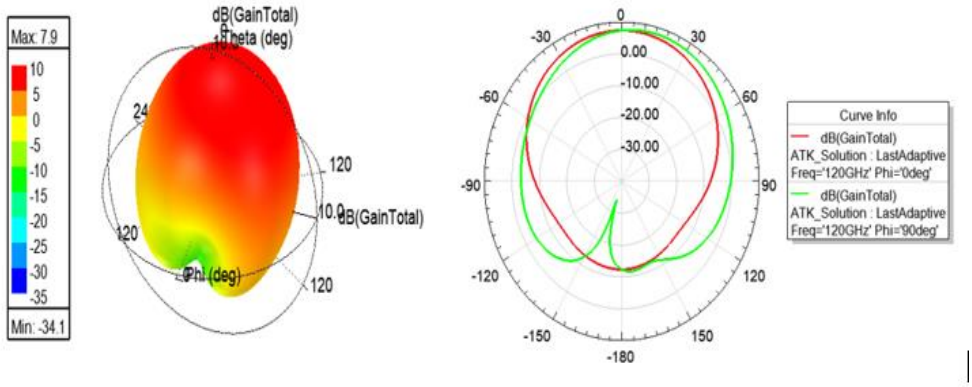


Figure IV. 5: Courbe de S11



(a) (b)

Figure IV. 6: (a) le diagramme de gain 3D et (b) en 2D de cette antenne conçue

Le tableau IV-3 présent un résumé concernant les caractéristiques obtenus par cette antenne à l'aide l'outil de simulation HFSS.

Tableau IV-3: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	f_{res} (GHz)	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Gain (dB)
Valeurs numériques	119,79	- 21,36	1,18	3,11	7,9

Le tableau précèdent montre que les caractéristiques tels la fréquence de résonance, le coefficient de réflexion, la bande passante et le gain obtenus par cette antenne sont meilleurs par rapport aux travaux de recherches disponibles dans la littérature. De plus, on peut améliorer

les performances de cette antenne par la création de réseau d'antennes constitué de deux antennes identiques, connectées simultanément en série. Il s'agit de la prochaine évolution.

5.2 Étude et conception du réseau d'antennes Téra hertz

Le rayonnement Téra hertz correspond à la bande de longueurs d'onde située entre l'infrarouge thermique et les micro-ondes. Il peut pénétrer une grande variété de matériaux non conducteurs (vêtements, carton, bois, plastique, etc.), ce qui justifie son intérêt dans les applications de sécurité et de contrôle non destructif (contrôle des colis et des bagages, explosifs, détection de drogues, interventions de sécurité, etc.) Le développement de sources THz commerciales a élargi leur champ d'application, faisant de la détection et de l'imagerie Téra hertz un domaine aujourd'hui en plein essor, notamment pour le contrôle qualité des matériaux aéronautiques, des avions, des automobiles, ou encore pour la rénovation des bâtiments. Ce paragraphe étudie et conçoit un réseau d'antennes imprimé sur le substrat Rubber_hard pour la technologie Téra hertz. Ce composant fonctionne dans la bande 0,12 THz. Le choix de ce type d'antenne est associé à ses applications possibles : communications par satellite, aéronautique, téléphonie mobile, identification sans contact, biomédical et objets communicants. La conception du réseau d'antennes proposé est essentiellement basée sur trois couches, dont une couche superficielle utilisée pour imprimer les éléments rayonnants, ainsi que la couche sous-jacente pour le substrat et la couche inférieure pour le plan de masse comme le montre la figure IV.7, ainsi que et le tableau IV-4 contient les paramètres de ce réseau. Le simulateur de structure haute fréquence (HFSS) est utilisé pour optimiser le volume physique des différents composants du réseau d'antennes et de la ligne d'alimentation afin d'améliorer les caractéristiques électriques du réseau d'antennes en termes de gain, de bande passante, d'efficacité de rayonnement et de diagrammes de rayonnement. Les résultats de simulation obtenus pour ce réseau d'antennes présente un gain élevé atteint à 9,8dB, une large bande passante de 10,22GHz avec un coefficient de réflexion très élevé (S_{11}), inférieur à -10 dB, et l'efficacité totale est supérieure à 90%.

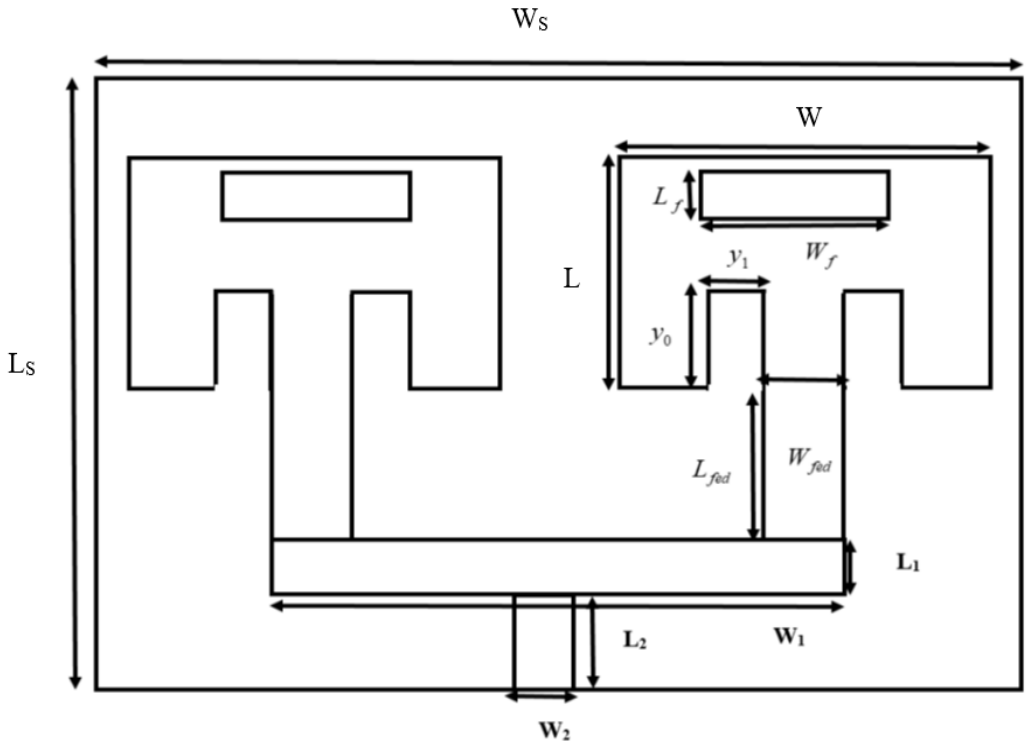


Figure IV. 7: Géométrie de réseau d'antenne proposée

Tableau IV-4 regroupe les paramètres de l'antenne conçue :

Tableau IV-4: Paramètres de l'antenne proposée

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
L_S	2,2	(y_0 - y_1)	(0,71 - 0,56)
W_S	4 ,1	L_f	0,23
h	0,1	W_f	0,36
W	0,9	W_1	1,38
L	0,7	L_1	0,28
L_{fed}	0,93	W_2	0,14
W_{fed}	0,28	L_2	0,2

La figure IV.8 montre la courbe du coefficient de réflexion S_{11} pour le réseau d'antennes proposé. La figure IV.9 donne une représentation du gain en trois dimensions et en deux dimensions à la fréquence de résonance 120 GHz.

La qualité d'adaptation d'une antenne peut être définie en fonction de son impédance caractéristique, qui est généralement de 50 ohms, ou du niveau de son coefficient de réflexion.

Le coefficient de réflexion S_{11} est la caractéristique du plan entre la source de transmission et l'antenne, ce qui entraîne une discontinuité. Ce coefficient, généralement exprimé en dB, représente la différence entre l'onde réfléchie et l'onde incidente à l'antenne. Le rapport d'ondes stationnaire est utilisé pour évaluer le niveau d'adaptation, ou plutôt de désadaptation. Si la chaîne est parfaitement adaptée, ce rapport augmente à 1, tandis que s'il n'est pas totalement adapté, il diminue à l'infini. Pour améliorer la transmission de l'énergie, on peut utiliser différentes techniques d'adaptation, comme l'adaptation par stub simple, par stub double et par quart d'onde. Ce réseau d'antennes fonctionne à une fréquence de 120,15 GHz, a un coefficient de réflexion (S_{11}) de -16,38 dB, une bande passante de 10,22 GHz et un rapport d'ondes stationnaires (ROS) de 1,18.

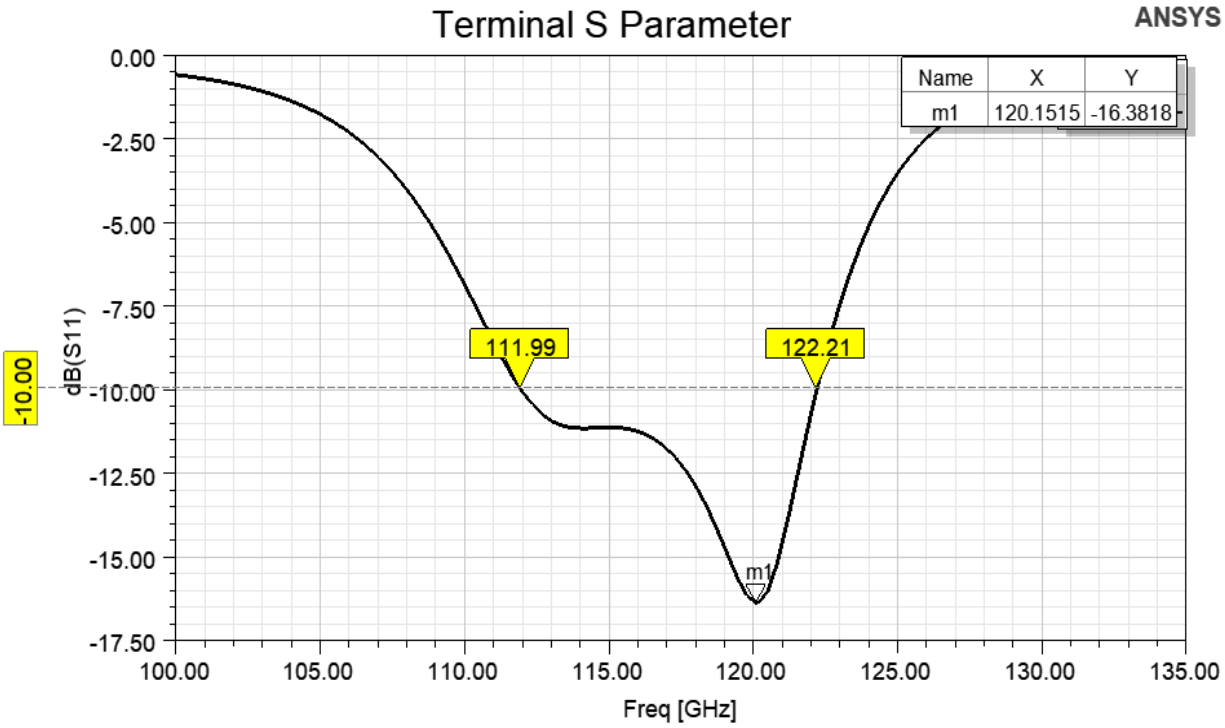


Figure IV. 8: Représentation graphique de S_{11}

Tout élément conducteur proche perturbe le gain d'une antenne, qui est influencé par son environnement. Le gain doit être déterminé dans ces conditions si elle est utilisée dans une application spécifique. La figure IV.19 donne une représentation du gain en trois dimensions et en deux dimensions à la fréquence de résonance 120 GHz, ce gain a une valeur de 9,8 dB.

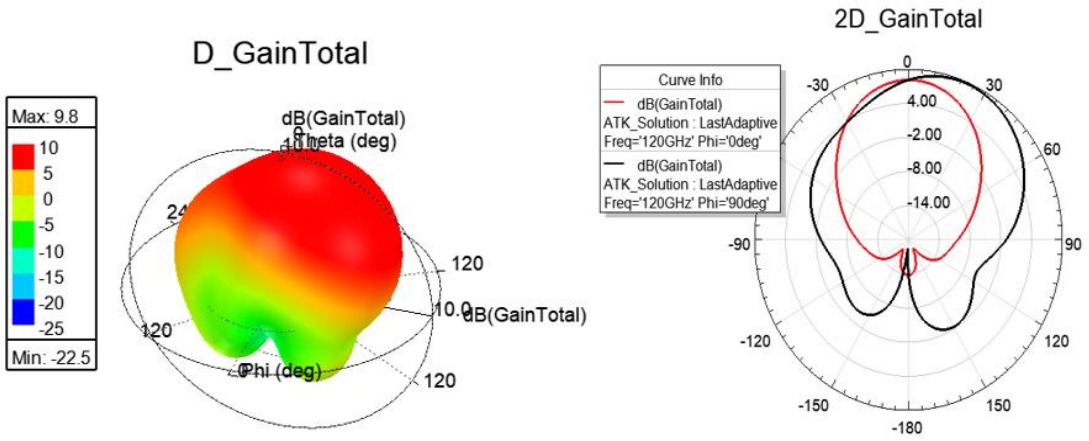


Figure IV. 9: Représentation du gain en 3D et en 2D

Les résultats de simulation obtenus sont résumés dans le tableau IV-5 au-dessous :

Tableau IV-5: Caractéristiques de l'antenne conçue

Caractéristiques	f_{res} (GHz)	S_{11} (dB)	ROS	Bande Passante (GHz)	Gain (dB)
Valeurs numériques	120,15	- 16,38	1,18	10,22	9,8

5.3 Comparaison des résultats obtenus avec ceux récents des publications scientifiques

Dans le tableau suivant, nous comparons les résultats obtenus grâce à l'antenne proposée (AP) avec les publications scientifiques récentes. Cette comparaison concerne des performances électriques des antennes dans la bande de fréquences Téra hertz, telles que la directivité, le gain, le coefficient de réflexion, le ROS, la largeur de bande et l'efficacité de l'antenne Téra hertz proposée par rapport à divers travaux existants.

Tableau IV-6: Comparaison des résultats de simulation obtenus avec les résultats des travaux disponibles

Refs.	Bande de fréquence (THz)	Directivité (dB)	Gain (dB)	S_{11} (dB)	Bande passante (GHz)	ROS	PBP %	Efficacité %
[IV.23]	0,15 - 0.5	-	5,17	- 16,23	2,2	1,36	0,44	-
[IV.24]	0,960	-	3,8	- 13,05	310	1,3	32,29	-
[IV.25]	2,7	6,91	6,59	- 13,66	90	1,524	3,33	92,9
[IV.26]	0,750	5,71	5,09	- 35	-	-	-	86,58

[IV.27]	2,59	7,19	5,03	- 35,183	-	1,035	-	60,8
[IV.28]	6,994	7,408	7,286	- 75,66	386	1,0003	5,51	97,21
[IV.29]	1,06	6	2,45	- 24	270	1,134	2,54	44
[IV.30]	0,72	6,6	-	- 59,67	310	1,007	43,05	-
[IV.31]	0,6289	7,419	6,59	- 20,145	34,92	1,2054	5,55	82,46
AP	0,12	-	7,9	- 21,36	3,11	1,18	2,5	99,5
		-	9,8	- 16,38	10,22	1,18	8,5	99,09

Le tableau IV-6 contient un résumé sur les conceptions des antennes en bandes de fréquence différentes. Ces bandes de fréquence existe dans la bande THz. De plus on remarque que chaque antenne de ce tableau réalise des caractéristiques spécifiques. Le problème major de ces antennes est l'intégration dans les objets de système de communication sans fil comme les composants électroniques et le pourcentage de la bande passante(PBP) très petite. Ce dernier est le problème majeur de la technologie THz. Pour résoudre ces problèmes nous avons proposé un réseau d'antennes patch microruban de bonnes caractéristiques par rapport aux travaux publiés dans les journaux scientifiques comme le montre le tableau IV-6, aussi de profil compacte et plus facile de l'intégration.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre recherche dans le domaine des fréquences THz (plus de 100 GHz), ainsi que les applications liées aux fréquences térahertz et les sources de rayonnement térahertz. Nous avons conçu une antenne patch microruban à deux fentes pour le domaine des térahertz avec une fréquence de fonctionnement de 120 GHz, et nous avons utilisé cette antenne par la suite pour créer un réseau d'antennes patch microruban composé de deux éléments rayonnants. Au cours de ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel de simulation HFSS (High-Frequency Structure Simulator). Ces résultats obtenus de ces travaux sont satisfaisants.

Reference de chapitre 4

[IV.1] M.A.K. Khan, T.A. Shaem, M.A. Alim, "Analysis of graphene based miniaturized terahertz patch antennas for single band and dual band operation," Optik, Vol. 194, pp. 1-16, 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.163012.

[IV.2] T. Kürner, “Towards future THz communications systems,” Terahertz Science and Technology, Vol. 5, no. 1, pp. 11–17, 2012, doi: 10.11906/TST.011-017.2012.03.02.

[IV.3] S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali,” Study and Design of the Terahertz Antenna Array,” In: (eds) Terahertz Devices, Circuits and Systems, Springer, Singapore, (2022). doi: 10.1007/978-981-19-4105-4_13.

[IV.4] S. S. Kashyap, V. Dwivedi," Stacked swastika shape microstrip patch antenna for terahertz applications," 2nd International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, pp. 1-5, IEEE, Surat, India(2014), doi: 10.1109/ET2ECN.2014.7044965.

[IV.5] S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali,” Study and Design of Printed Rectangular Microstrip Antenna Arrays at an Operating Frequency of 27.5 GHz for 5G Applications,” Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 13, no. 6, pp. 06035 – 06039, 2021, doi: 10.21272/jnep.13(6).06035.

[IV.6] S. Mandeep, S. Simranjit, “ Design and Performance Investigation of Miniaturized Multi-Wideband Patch Antenna for Multiple Terahertz Applications,” Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, Vol. 44, pp. 1-10, May 2021, doi: 10.1016/j.photonics.2021.100900.

[IV.7] S. S. Kashyap, D. Vedvyas, “Compact Microstrip Patch Antennas for Terahertz Applications,” in 9th Asia Modelling Symposium (AMS) ,pp. 157-163, IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia (2016), doi: 10.1109/AMS.2015.33.

[IV.8] A. Maroua, F. Mohammed, “Characterization of Ultra Wide Band indoor propagation,” in 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT), pp. 1-4, IEEE, Fez, Morocco(2019), doi: 10.1109/CMT.2019.8931367.

[IV.9] B. J. Puttnam et al., “2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fibre and wideband optical comb,” in European Conference on Optical Communication (ECOC), p. 1-3, IEEE, Valencia, Spain(2015), doi: 10.1109/ECOC.2015.7341685.

[IV.10] A.S. Gustavo, R. J. Manuel, G. P. Padro, “Atmospheric Attenuation in Wireless Communication Systems at Millimeter and THz Frequencies [Wireless Corner],” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no 1, p. 48-61, févr. 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2401796.

[IV.11] L. G. Thierry, M. P. Marie, “ A 45-GHz wireless transmission for a wireless interconnect network-on-board,” In 2017 IEEE 21st Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), p. 1-2, IEEE, Lake Maggiore, Italy(2017), doi: 10.1109/SaPIW.2017.7944021.

[IV.12] P. Vitaly, K. Joonas, M. Dmitri, L. Janne, K. Yevgeni, J. Markku, “Last Meter Indoor Terahertz Wireless Access: Performance Insights and Implementation Roadmap,” IEEE Communications Magazine, Vol. 56, no. 6, pp. 158-165, août 2017, doi: 10.1109/MCOM.2018.1600300.

[IV.13] S. Koenig et al., “Wireless sub-THz communication system with high data rate,” Nature Photonics, vol. 7, no, 12, pp. 977-981, 2013, doi: 10.1038/NPHOTON.2013.275.

[IV.14] W. Cheng, L. Changxing, C. Qi, L. Bin, D. Xianjin, Z. Jian, “ A 10-Gbit/s Wireless Communication Link Using 16-QAM Modulation in 140-GHz Band,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, no. 7, pp. 2737-2746, 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2262804.

[IV.15] K. Zhong, W. Shi, D. Xu, P. Liu, Y. Wang, J. Mei, C. Yan, S. Fu, J. Yao, “ Optically pumped terahertz sources: Review,” Science China Technological Sciences, Vol. 60, no. 12, pp. 1801–1818, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/s11431-017-9057-3.

[IV.16] Y. S. Hua, R. H. Mohammad, W. B. Christopher, J. Mona, “7.5 photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes,” IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol. 4, no. 5, pp. 575–581, 2014.

[IV.17] J. L. Hesler, L. Liu, H. Xu, Y. Duan, R. M. Weikle,” The development of quasioptical THz detectors,” 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, pp. 1-2, IEEE, Pasadena, CA, USA(2008), doi: 10.1109/ICIMW.2008.4665521.

[IV.18] T. Nagatsuma, S. Horiguchi, Y. Minamikata, Y. Yoshimizu, S. Hisatake, S. Kuwano, N. Yoshimoto, J. Terada, H. Takahashi,” Terahertz wireless communications based on photonics technologies,” Optics Express, vol. 21, no. 20, pp. 23736–23747, 2013, doi: 10.1364/OE.21.023736.

[IV.19] F. Mohamed, R.A. Zaghlool, W. El Hotaby," Terahertz spectroscopic analysis of non-radiated and radiated synthetic and natural polymer / GO nanocomposites," Journal of Molecular Structure, vol. 1250, no. 1, 15 February 2022,doi: 10.1016/j.molstruc.2021.131659.

[IV.20] J. P. Guillet, M. Roux, K. Wang, X. Ma, F. Fauquet, H. Balacey, B. Recur, F. Darracq, P. Mounaix, “Art painting diagnostic before restoration with terahertz and millimeter waves,” Journal of Infrared, Millimeter and TeraHertz Waves, vol. 38, no. 4, pp. 369–379, 2017, doi: 10.1007/s10762-017-0358-1.

[IV.21] Cyril BERNERD," Génération d’onde TeraHertz par Différence de Fréquences," These de doctorat, Université Grenoble Alpes, Français(2018). Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-01980201v1/file/BERNERD_2018_diffusion.pdf (Consulté le 5 April 2021).

[IV.22] S. E. Didi, I. Halkhams, M. Fattah, B. Younes, S. Mazer, and M. El Bekkali,” Design of a Microstrip Antenna Two-Slot for Fifth Generation Applications operating at 27.5GHz,” in International Conference on Digital Technologies and Applications(ICDTA), Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 211, pp. 1081-1089, Springer, Fes, Morocco, Cham (2021), doi: 10.1007/978-3-030-73882-2_99.

[IV.23] R. Bhatoa, E. Sidhu,” Novel terahertz microstrip patch antenna design for detection of biotin applications,” in 2017 International Conference on Big Data Analytics and Computational Intelligence (ICBDAC), pp. 289-292, IEEE, Chirala, Andhra Pradesh, India (2017), doi: 10.1109/ICBDACI.2017.8070850.

[IV.24] A. Singh, S. Singh,” A trapezoidal microstrip patch antenna on photonic crystal substrate for high-speed THz applications,” Photonics Nanostruct- Fundamental Appl, Vol. 14, pp. 52–62, 2015, doi: 10.1016/j.photonics.2015.01.003.

[IV.25] R. Bala, A. Marwaha, “Development of computational model for tunable characteristics of graphene-based triangular patch antenna in THz regime,” Springer on Journal of Computational Electronics, Vol. 15, pp. 1-6, 2016, doi: 10.1007/s10825-015-0761-6.

[IV.26] S. S. Anand, D. S. Kumar, R. J. Wu, M. Chavali,” Graphene nanoribbon based terahertz antenna on polyimide substrate,” Optik. Science Direct, vol. 125, no. 19, pp. 5546-5549, 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.06.085.

[IV.27] S. Mrunalini, A. Manoharan,” Dual-band re-configurable graphene-based patch antenna in terahertz band for wireless network-on-chip applications,” In: IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol. 11, no. 14, pp 2104-2108, 2017, doi: 10.1049/iet-map.2017.0415.

[IV.28] M.A.K. Khan, M.I. Ullah, R. Kabir, et al. ,”High-Performance Graphene Patch Antenna with Superstrate Cover for Terahertz Band Application,” Plasmonics, Vol. 15, pp. 1719–1727, 2020, doi: 10.1007/s11468-020-01200-z.

[IV.29] M.R. Nickpay, M. Danaie, A. Shahzadi, “Wideband rectangular double-ring nanoribbon graphene-based antenna for terahertz communications,” IETE J. Res, Vol. 68, no, 3, pp. 1625-1634, 2019, doi: 10.1080/03772063.2019.16618 01.

[IV.30] S. M. Shamim, M. S. Uddin, M. Hasan, et al. ,”Design and implementation of miniaturized wideband microstrip patch antenna for high-speed terahertz applications,” J Comput Electron, Vol. 20, pp. 604–610, 2021, doi: 10.1007/s10825-020-01587-2.

[IV.31] R. K. Kushwaha, P. Karuppanana , L. D. Malviyab, “ Design and analysis of novel microstrip patch antenna on photonic crystal in THz, Physica B: Condensed Matter, Vol. 545, pp. 107-112, 2018, doi: 10.1016/j.physb.2018.05.045.

Conclusion générale et perspectives

Notre objectif essentiel de ce travail était de proposer des structures d'antennes microruban imprimées sur différents matériaux, souples ou rigides, qui répondent aux principales exigences de la 5G, telles que la bande passante et la miniaturisation. Nous avons employé pour la conception de ces antennes les outils de simulation HFSS et CST.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les généralités sur les antennes imprimées pour la 5G et leur évolution. Nous sommes intéressé essentiellement à la 5G, qui répond aux besoins les plus importants du grand public, notamment en termes de débits de données plus élevés, de temps de réponse plus rapide, de qualité accrue des travaux et de diminution du poids des composants liés aux appareils à tous les secteurs, sans exception. Puis, nous avons exposé en détail la théorie concernant les antennes. Ce chapitre contient également une brève description historique du développement et des opérations liées aux antennes. Par la suite, nous expliquons tous les aspects intéressants de la théorie des antennes, en considérant à la fois les paramètres de rayonnement électromagnétique (EM) basés sur les équations de Maxwell, et les paramètres électriques. Cette étude nous avons aidé à mieux comprendre le fonctionnement des antennes dans différentes situations.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons étudié et conçu des antennes imprimées en bande millimétrique 5G au voisinage de 30 GHz. Ce chapitre vise à surmonter les problèmes associés aux antennes imprimées et aux réseaux d'antennes en proposant des conceptions d'antennes patch et de réseaux d'antennes présentant de meilleures performances électriques et de rayonnement par rapport aux résultats de la littérature.

Puis, dans le troisième chapitre, nous avons étudié et conçu des antennes imprimées à mucron ruban à bande millimétrique 5G au voisinage de 60GHz. Par ailleurs, dans le secteur des télécommunications, le plus grand compartiment est celui des antennes, ce qui crée une contrainte liée à leurs dimensions qui empêche leur intégration dans les appareils électroniques de la 5G. Par conséquent, nous proposons une méthode de réduction des dimensions des antennes à l'aide de fentes, qui résout partiellement ce problème.

Ensuite, dans le quatrième chapitre, nous étudions et concevons des antennes imprimées en bande Térahertz. Ce chapitre contient plusieurs paragraphes comme les applications de technologie THz, les sources de rayonnement THz, les détecteurs de THz, les antennes utilisables pour la THz, et les conceptions des nouvelles antennes imprimées. De plus le but de

ce chapitre consiste à résoudre un certain type de problèmes associés au fonctionnement des antennes imprimées et des réseaux d'antennes en proposant des conceptions d'antennes patch et de réseaux d'antennes offrant les meilleures performances électriques et de rayonnement par rapport aux résultats de la littérature.

En générale, les résultats obtenus lors de cette thèse ont apporté une contribution à la conception des antennes et réseaux des antennes microbandes en bande millimétrique de la 5G, ainsi que la conception d'antenne MIMO à deux bandes rejetées. Ces structures proposées sont adaptées pour être utilisées utilisés en plusieurs secteurs comme le militaire, médical, réseau corporel (BAN : Body Area Network) industriel, agricole, maritime, WiMAX, WLAN…etc. De plus, les résultats obtenus lors de nos simulations, en ce qui concernent les dimensions ainsi que les performances comme la bande passante, l'efficacité, le gain, la radiation ainsi que le bas coût, présentent des améliorations notables par rapport aux résultats disponibles dans la littérature. Ce travail nous permet d'être en mesure de répondre aux exigences des systèmes de communication modernes grâce aux structures proposées. Mes perspectives sont de réaliser les antennes proposées afin de valider les résultats obtenus, d'étendre ce travail à d'autres bandes millimétriques de la 5G, et de concevoir des antennes « intelligentes » pour la 6G.