

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département D'électronique et des Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Télécommunications
Domaine : Science et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications
Thème

**Conception d'Antenne Flexible pour les Applications des Vêtements
Intelligents**

Présenté Par :

- 1) M^{me} ABDALLAH BERRABAH Sarra
- 2) M^{elle} BECHIKR Romaïssa

Devant le jury composé de :

Dr. BOUTKHIL Malika	MAA UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr. AYACHE Choukria	PR UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. SOUIKI Sihem	MCA UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr. BELGACEM Wahiba	MCB C D S (Oran)	Co-Encadrante

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardées en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à nos encadrant Mme SOUIKI Sihem et Mme BELGACEM Wahiba pour leurs précieuse collaboration, pour leur suivis et leurs conseils durant l'évolution de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Mme. BOUTKHIL pour l'honneur de présider le jury et à Mme. AYACHE comme examinatrice.

Enfin, nous tenons à remercier vivement toute personne qui nous a aidés de près ou de loin à élaborer et réaliser ce mémoire.

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail que je dédie.

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

A **mon Père "A.Abdalkkader "**, qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments rudes de ma vie.

Cependant, je prie Dieu le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète, et te protège et te garde en bonne santé.

A le plus cher, mon frère "**Imad Eddine**" et sa femme "**Kawter**"

A la plus chère, ma sœur "**Hadjer**"

A le plus cher, mon époux "**Y'asin**" et **sa famille**

A mes chères amis : **Fatima Zohra ; Bouchra ; Hanen ; Achwek ; Amina**

A nos encadrant **Mme SOUIKI Sihem** et **Mme BELGACEM Wahiba** qui nous ont conseillées et encouragées durant l'évolution de ce travail. Sans oublier tous les professeures que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

À mon Binôme **Romaissa**

À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

A.SARRA

Dédicace

Je dédie ce travail

À mon roi Papa **B.Djilali** et ma reine Mama **B.Attouya** qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présent pour me pousser vers le haut et à être toujours plus forte.

À mes chères sœurs **Fatima El Zahra** et **Nour El Houda** ; et à mon frère **Mohamed El Attahar** ; et ma jolie petite nièce **Sanaa Kaouter**.

A mes chères et meilleurs amies **Bouchra** ; **Hadjer** ; **Fatima El Zahra** et **Hanen** ; et à mes très chers frères **Ahmed** et **Mohamed El Amine** qui est toujours là pour moi.

A mes professeurs et nos encadrant **Mme SOUIKI Sihem** et **Mme BELGACEM Wahiba** pour leur encadrement attentif, leurs conseils éclairés Leur expertise et leur disponibilité ont été d'une grande valeur, et nous avons beaucoup appris de leurs précieux enseignements.

A mon binôme **Sarra**

A tous ceux qui m'ont assisté dans mes études.

B.ROMAISSA

RESUME

La conception d'antennes flexibles pour les applications des vêtements intelligents met en avant l'intégration d'antennes miniaturisées et flexibles dans les textiles pour offrir des fonctionnalités avancées. Ces antennes, adaptées aux communications sans fil comme les réseaux centrés sur la personne (WBAN), permettent des communications à distance pour des applications variées, telles que la surveillance médicale, la sécurité personnelle et les applications multimédias. La technologie WEARABLE englobe les dispositifs électroniques portables, incluant des capteurs et des technologies de communication, conçus pour être portés sur le corps. Les antennes patch, des éléments rayonnants planaires gravés sur des circuits imprimés, sont souvent utilisées dans les appareils WEARABLE pour assurer la connectivité sans fil, occupant peu d'espace et s'adaptant à différentes surfaces, idéales pour les dispositifs portables. Dans ce cadre, nous nous sommes attachés dans ce travail de fin d'étude à la conception et la réalisation d'antennes flexibles susceptibles d'être intégrées dans des vêtements pour les applications WEARABLE et la technologie d'internet des objets (IoT), ce travail port une contribution à l'étude d'une antenne patch micro-ruban rectangulaire fonctionnant à 2.45 GHz adaptées à des applications WEARABLE dans la bande ISM. Le but de cette étude est de calculer les caractéristiques électromagnétiques de l'antenne en termes de coefficient de réflexion (S11), diagramme de rayonnement. L'analyse de cette structure d'antenne est effectuée en utilisant le logiciel CST.

Mots clés: L'antenne flexible (patch), vêtements intelligents, La technologie WEARABLE, Bande ISM, CST.

ABSTRACT

The design of flexible antennas for smart clothing applications highlights the integration of miniaturized and flexible antennas into textiles to provide advanced functionalities. These antennas, suited for wireless communications such as body-centric networks (WBAN), enable remote communications for various applications, such as medical monitoring, personal security, and multimedia applications. Wearable technology encompasses portable electronic devices, including sensors and communication technologies, designed to be worn on the body. Patch antennas, planar radiating elements etched on printed circuits, are often used in wearable devices to ensure wireless connectivity. These antennas are crucial as they occupy little space and adapt to different surfaces, making them ideal for integration into portable devices, in this context, this thesis focuses on the design and implementation of flexible antennas that can be integrated into clothing for WEARABLE applications and Internet of Things (IoT) technology. This work contributes to the study of a rectangular microstrip patch antenna operating at 2.45 GHz suitable for WEARABLE applications in the ISM band. The aim of this study is to calculate the electromagnetic characteristics of the antenna in terms of reflection coefficient (S_{11}) and radiation pattern. The analysis of this antenna structure is performed using CST software.

Key words: Flexible antennas (patch), smart clothing, Wearable technology, ISM band, CST.

المخلص

يسلط تصميم الهوائيات المرنة لتطبيقات الملابس الذكية الضوء على دمج الهوائيات المصغرة والمرنة في الأنسجة لتوفير وظائف متقدمة. هذه الهوائيات، المناسبة للاتصالات اللاسلكية مثل الشبكات التي تركز على الجسم (WBAN)، تُمكن الاتصالات عن بُعد لتطبيقات متنوعة، مثل المراقبة الطبية، والأمن الشخصي، والتطبيقات متعددة الوسائط. تشمل تكنولوجيا الأجهزة القابلة للارتداء الأجهزة الإلكترونية المحمولة، بما في ذلك أجهزة الاستشعار وتقنيات الاتصال، المصممة ليتم ارتداؤها على الجسم. تُستخدم هوائيات الباتش، وهي عناصر إشعاعية مسطحة محفورة على الدوائر المطبوعة، غالبًا في الأجهزة القابلة للارتداء لضمان الاتصال اللاسلكي. تتميز هذه الهوائيات بأنها تشغل مساحة قليلة وتتأقلم مع الأسطح المختلفة، مما يجعلها مثالية للدمج في الأجهزة المحمولة، في هذا السياق، يركز هذا العمل النهائي على تصميم وتنفيذ الهوائيات المرنة التي يمكن دمجها في الملابس لتطبيقات WEARABLE وتكنولوجيا إنترنت الأشياء (IoT) يساهم هذا العمل في دراسة هوائي ميكروستريب مستطيل يعمل بتردد 2.45 جيجاهرتز ومناسب لتطبيقات WEARABLE في نطاق ISM. الهدف من هذه الدراسة هو حساب الخصائص الكهرومغناطيسية للهوائي من حيث معامل الانعكاس (S11) ونمط الإشعاع. يتم إجراء تحليل بنية الهوائي هذه باستخدام برنامج CST.

الكلمات المفتاحية: الهوائيات المرنة (الباتش)، الملابس الذكية، التكنولوجيا القابلة للارتداء، نطاق ISM، برنامج

CST

Liste des abréviations

AI : Intelligence Artificielle

AR : Réalité Augmentée

CST : Computer Simulation Technology

GPS : Global Positioning System

IoT : Internet des Objets

MIC : Circuits micro- ondes intégrés

MID : Moldes Interconnect Devices

PCB : Printed Circuit Board

ROS :Rapport d'Onde Stationnaire

TOS : Taux d'onde stationnaire

VR : Réalité Virtuelle

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

WBAN :Wireless Body Area Network

2D : Deuxième Dimension

3D : Troisième Dimension

5G : Cinquième Génération

4G : Quatrième Génération

Liste des tables

Tableau I.1 Les avantages et les inconvénients des différents matériaux.....	23
Tableau II.1 Les paramètres de performance des différents substrats.....	33
Tableau II.2 Les dimensions initiales de l'antenne imprimée proposée.....	34
Tableau II.3 Les dimensions optimisées de l'antenne imprimée proposée.....	37
Tableau II.4. Les résultats de simulation obtenus des antennes proposées avec les différents types de substrats flexibles.....	48
Tableau III.1. Les paramètres de performance de substrat feutrine.....	58
Tableau III.2. Dimensions de l'antenne flexible proposée.....	59

Table des matières

Remerciements	II
Dédicace	III
Résumé..	V
Sommaire.....	IX
Liste des tableaux.....	X
Liste des figures.....	XII
I. Introduction Générale	1

Chapitre I : Généralités sur les antennes WEARABLE

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition d'antenne imprimée.....	4
I.3 Historique des antennes imprimées.....	5
I.4 Les différentes formes d'éléments rayonnants.....	5
I.5 Structure d'une antenne imprimée.....	5
I.6 Les paramètres fondamentaux des antennes.....	6
I.6.1 Largeur de bande.....	6
I.6.2 L'impédance.....	6
I.6.3 Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (TOS).....	7
I.6.4 La directivité.....	7
I.6.5 Rendement de l'antenne.....	8
I.6.6 Gain d'une antenne.....	8
I.6.7 Le diagramme de rayonnement.....	8
I.7 Techniques d'alimentations.....	9
I.7.1 Alimentation par ligne microbande.....	9
I.7.2 Alimentation coaxiale directe.....	10
I.7.3 Alimentation par couplage électromagnétique.....	11
I.7.4 Alimentation par couplage à ouverture dans le plan de masse.....	12
I.8 Avantages et inconvénients des antennes patches.....	13
I.9 Les équations caractéristiques d'une antenne patch.....	14
I.9.1 Antenne patch rectangulaire.....	14

I.9.1.1 Dimensions du patch.....	14
I.9.1.2 Gain.....	15
I.9.1.3 La fréquence de résonance et la largeur de bande.....	16
I.9.1.4 Impédance d'entrée.....	17
I.9.2 Antenne patch circulaire.....	18
I.9.2.1 Rayon physique et effectif du patch circulaire.....	18
I.9.2.2 Fréquence de résonance du patch circulaire.....	18
I.9.2.3 Fréquence de qualité, bande passante.....	19
I.9.3 Antenne à fente imprimée.....	19
I.10 La technologie WEARABLE.....	20
I.10.1 Définition de la technologie WEARABLE.....	20
I.10.2 Principe de fonctionnement d'antenne imprimé dans des vêtements intelligents flexibles.....	21
I.11 Les différents WEARABLE DEVICES.....	22
I.12 Les avantages et les inconvénients des différents matériaux utilisés pour les substrats flexibles en termes de durabilité.....	23
I.13 Les différents types de WEARABLES.....	24
I.13.1 Objets Connectés Autonomes.....	24
I.13.2 WEARABLES de Suivi de Santé et de Fitness.....	24
I.13.3 Vêtements Intelligents.....	24
I.13.4 Casques de Réalité Augmentée (AR) et Virtuelle (VR).....	24
I.13.5 Prothèses Auditives à Intelligence Artificielle (AI).....	24
I.13.6 Assistants Virtuels Portables.....	25
I.14 Conclusion.....	25

Chapitre II : Modélisation d'antenne imprimée

II.1 Introduction.....	31
II.2 Les substrats flexibles WEARABLE.....	31
II.3 Effet des matériaux des substrats flexibles sur les performances des dispositifs portables.....	31
II.4 Choix du matériau flexible.....	32
II.5 Les substrats flexibles intégrés dans des antennes imprimées.....	33
II.6 Résultats et simulations.....	34
II.6.1 Coefficient de réflexion S11.....	34
II.6.2 Le diagramme de rayonnement et le gain du patch.....	35
II.6.3 Antenne imprimée optimisée.....	37
II.6.3.1 Le coefficient de réflexion et le diagramme de rayonnement d'antenne imprimée proposée de substrat du type coton, djeans, nylon, polyester et silicone.....	39

II.6.3.1.1 Substrat cotton.....	39
II.6.3.1.2 Substrat djeans.....	41
II.6.3.1.3 Substrat nylon.....	42
II.6.3.1.4 Substrat polyester.....	43
II.6.3.1.5 Substrat silicone.....	45
II.6.4 Etude comparatif entre les coefficients de réflexions.....	46
II.7 Conclusion.....	48

Chapitre III : L'application de la technologie WEARABLE dans des applications IoT

III.1 Introduction.....	52
III.2 L'IoT et l'évolution des communications sans fil centrées sur le corps.....	52
III.2.1 Applications du futur Internet des vêtements intelligents.....	53
III.2.2 Applications commerciales.....	54
III.2.3 Développement académique.....	54
III.2.3.1 Domaine de la santé	55
III.3 Fonctionnement des antennes portables pour l'IoT.....	56
III.4 Les solutions IoT du marché.....	56
III.6 Antenne patch Multi-bande pour les applications IoT.....	57
III.7 Validation du Substrat.....	58
III.8 Résultats et simulations.....	59
III.8.1 Coefficient de réflexion S [11].....	59
III.8.2 Le taux d'onde stationnaire VSWR.....	60
III.8.3 Diagramme de rayonnement (gain et directivité) d'antenne proposée.....	61
III.9 Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	64

Listedes figures

Chapitre I : Généralités sur les antennes WEARABLE

Figure I.1. Exemple d'antennes patch.....	4
Figure I.2. Types d'éléments rayonnants.....	5
Figure I.3. Structure d'une antenne patch rectangulaire.....	6
Figure I.4. Le diagramme de rayonnement.....	9
Figure I.5. Alimentation par ligne microbande.....	10
Figure I.6. Alimentation par une ligne microbande (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche (d) adapté par ligne quart d'onde (e) couplée par un écart.....	10
Figure I.7. Alimentation par connexion directe à une ligne coaxiale.....	11
Figure I.8. Alimentation par couplage électromagnétique.....	12
Figure I.9. Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse.....	12
Figure I.10. L'alimentation par proximité de l'antenne imprimée.....	13
Figure I.11. Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.....	17
Figure I.12 Représentation d'une antenne en quadripôle.....	17
Figure I.13. Antennes à fentes.....	20
Figure I.14. La technologie WEARABLE.....	21
Figure I.15. Vêtements intelligents.....	21
Figure I.16. Les appareils utilisés comme WEARABLE technologies.....	22

Chapitre II : Modélisation d'antenne imprimée

Figure II.1. Géométrie de l'antenne rectangulaire.....	34
Figure II.2. Le coefficient de réflexion du patch rectangulaire.....	35
Figure II.3. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du coton.....	35
Figure II.4. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du djean.....	36
Figure II.5. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du nylon.....	36
Figure II.6. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du polyester.....	36
Figure II.7. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du silicone.....	37
Figure II.8. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée du Cotton.....	38
Figure II.9. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de coton.....	39
Figure II.10. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du coton proposée.....	39
Figure II.11. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de djean.....	40
Figure II.12. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de djeans.....	40

Figure II.13. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du djeans proposée.....	41
Figure II.14. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de nylon.....	41
Figure II.15. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de nylon.....	42
Figure II.16. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du nylon proposée.....	42
Figure II.17. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de polyester.....	43
Figure II.18. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de polyester.....	43
Figure II.19. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du polyester proposée.....	44
Figure II.20. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de silicone.....	44
Figure II.21. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de silicone.....	45
Figure II.22. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du silicone proposée.....	45
Figure II.23. Le coefficient de réflexion d'antenne optimisée.....	46

Chapitre III : L'application de la technologie WEARABLE dans des applications IoT

Figure III.1. Concept des liaisons des communications possibles entre dispositifs BAN.....	53
Figure III.2. Les scénarios prometteurs pour les objets connectés et les vêtements basés sur l'IoT.....	54
Figure III.3. Fonctionnement d'Internet des objets.....	56
Figure III.4. Structure d'antenne patch proposé.....	58
Figure III.5. Le coefficient de réflexion S11 d'antenne tri-bande proposée.....	60
Figure III.6. Le taux d'onde stationnaire d'antenne tri-bande proposée.....	61
Figure III.7.(a) Le gain d'antenne proposée (b) Le diagramme d'antenne proposée.....	61

INTRODUCTION GENERALE

La tendance des technologies portables, ou "WEARABLE", connaît une croissance exponentielle, révolutionnant le secteur des vêtements intelligents. Ces dispositifs intègrent des technologies avancées directement dans les textiles pour offrir des fonctionnalités variées allant de la surveillance de la santé à l'amélioration des performances sportives, en passant par l'optimisation des interactions sociales et professionnelles. Les vêtements intelligents embarquent des capteurs sophistiqués capables de mesurer la fréquence cardiaque, le niveau d'activité, la température corporelle et même la posture, fournissant des données précieuses en temps réel. Cependant, l'un des défis majeurs de cette révolution réside dans la conception d'antennes flexibles et efficaces pour assurer la communication sans fil de ces dispositifs. Les applications des antennes flexibles dans les vêtements intelligents sont multiples. Elles permettent, par exemple, la transmission des données biométriques collectées par les capteurs à des Smartphones ou des dispositifs médicaux, facilitant ainsi le suivi en temps réel de la santé des utilisateurs. Dans le domaine sportif, elles peuvent transmettre des données de performance à des entraîneurs ou des applications d'analyse pour optimiser les entraînements. Les antennes flexibles sont également cruciales pour les applications de localisation et de navigation, offrant des solutions avancées pour les activités en plein air ou les environnements professionnels complexes. En somme, la convergence des technologies portables et des antennes flexibles ouvre la voie à une nouvelle génération de vêtements intelligents, alliant confort, fonctionnalité et connectivité. La recherche et le développement dans ce domaine sont en plein essor, avec des perspectives prometteuses pour améliorer la qualité de vie et les performances des utilisateurs. La clé du succès réside dans l'intégration harmonieuse de ces innovations technologiques dans des designs vestimentaires attrayants et pratiques, prêts à transformer notre quotidien.

Le travail présenté dans ce manuscrit a pour objectif la conception d'antenne flexible pour les applications des vêtements intelligents et de la technologie WEARABLE. Après un état de l'art et une étude général sur ces antennes imprimées, on a mis l'accent sur les différentes formes d'éléments rayonnants. Par la suite, nous avons abordés les paramètres fondamentaux des antennes avec ces équations et les fonctionnalités de la technologie WEARABLE, ainsi que leurs avantages et inconvénients. En fin, nous présentons leurs différents types dans le premier chapitre, tandis que le deuxième chapitre est consacré à la conception logiciel et simulation de cinq antennes imprimées. La conception a fait l'objet de validation des résultats de sa simulation par CST dans la fréquence 2.45 GHz. En étudiant la

variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et le diagramme de rayonnement et le gain de ces antennes après l'adaptation, en utilisant des différents substrats flexibles. Le troisième chapitre présente la conception de nouvelle antenne avec une nouvelle structure attribuée aux vêtements intelligents. Notre conception logicielle a été couronnée par une réalisation pratique de l'antenne imprimée sur le substrat Feutrine par la technologie WEARABLE dans le domaine des applications IoT. Enfin, une conclusion résumera l'ensemble des travaux de ce projet de fin d'étude et présentera les projections considérées.

Chapitre01 :

Généralités sur les

antennes

WEARABLE

I.1 Introduction

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. Parmi les familles des antennes les plus utilisées : les antennes micro-rubans (appelées aussi antennes imprimées ou antennes patches). Les antennes imprimées sont utilisées dans de nombreux domaines, tels que les télécommunications, les radars et les systèmes de positionnement global (GPS). Elles sont disponibles dans diverses formes, telles que des carrés, des rectangles, des triangles et d'autres formes, et peuvent être omnidirectionnelles ou directives. Ce chapitre présente les notions de base des antennes imprimées, y compris leurs caractéristiques, techniques d'alimentation, ainsi que la technologie WEARABLE. Les caractéristiques comprennent le coefficient de réflexion, la bande passante, le diagramme de rayonnement et la polarisation. Les techniques d'alimentation consistent à adapter l'antenne à son usage spécifique. Les avantages et les limitations des antennes imprimées sont également abordés dans ce chapitre [1].

I.2 Définition d'antenne imprimée

Les antennes imprimées ou micro rubans, ou « patches » en anglais sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. De part leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. L'antenne patch est un élément transducteur. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique évoluant avec une fréquence compatible à celle de l'antenne la Figure I.1 présente quelques exemples d'antennes [2].



Figure I.1. Exemple d'antennes patch [3]

I.3 Historique des antennes imprimées

Le concept d'antennes imprimées a été proposé pour la première fois par Deschamps aux États-Unis en 1953 et en France par BAISSINOT et GUTTON en 1955. Lewin a observé et étudié le phénomène de rayonnement des discontinuités dans les strip-lines en 1960. En 1970 Byron décrit une structure planaire constituée d'une plaque conductrice gravée sur un substrat diélectrique $\epsilon_r \leq 10$ au niveau du plan de masse, la première réalisation était surtout réservée aux applications militaires, plus tard, dans les années 1990, des antennes pratiques développées par HOWEL et MUNSON, il est vraiment entré dans le stade industriel [4].

I.4 Les différentes formes d'éléments rayonnants

Dans la pratique, les formes des éléments rayonnants peuvent être variées, mais elles influent sur les modes qui sont susceptibles de s'exciter dans l'antenne, et donc sur la nature du rayonnement. Dans la pratique généralement on trouve la forme carrés, rectangle et disque mais la forme anneau rarement utilisée [5] (voir la Figure I.2) [6].

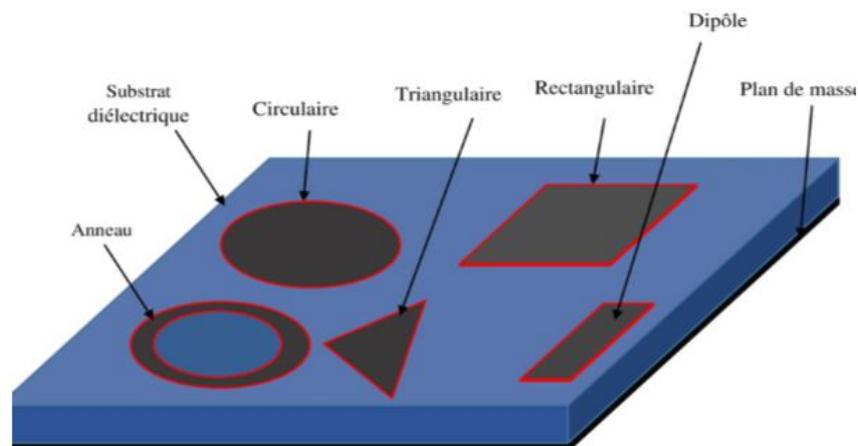


Figure I.2. Types d'éléments rayonnants [6].

I.5 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne patch consiste en un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse). Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante, sa structure est détaillée ci-dessous dans la figure I.3 :

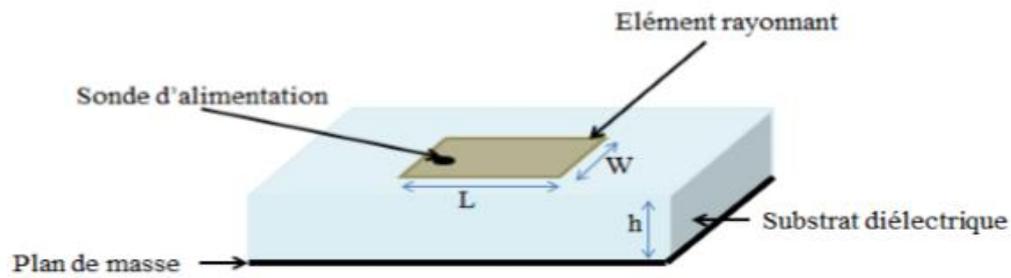


Figure I.3. Structure d'une antenne patch rectangulaire

Les dimensions du patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur est guidé par la fréquence de résonance à donner à l'antenne. Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il peut être égal à trois ou quatre fois la longueur d'onde, ce qui représente parfois un encombrement trop important. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne. Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde et présente de faibles pertes.

I.6 Les paramètres fondamentaux des antennes

Indépendamment du type d'antenne et de son mode de fonctionnement, les paramètres fondamentaux des antennes qui peuvent définir leurs performances sont généralement : la largeur de bande, le diagramme de rayonnement, l'impédance, la directivité, le gain, coefficient de réflexion S11 et le taux d'onde stationnaire (TOS).

I.6.1 Largeur de bande

La largeur de bande de fonctionnement, nommée aussi bande passante d'une antenne est définie comme une gamme de fréquences sur laquelle la performance de l'antenne est conforme à certaines spécifications. Elle dépend donc de la fréquence sur laquelle 90 % de la puissance incidente est transmise (correspondant à -10 dB). Ce pourcentage dépend de ce qui est acceptable pour une application donnée. Comme exemple, les antennes de téléphones cellulaires, la bande passante est souvent définie comme la plage de fréquence pour laquelle 75% de la puissance est transmise (correspondant à -6 dB) [7].

I.6.2 L'impédance

Une antenne est caractérisée par son impédance complexe Z_a . Elle est composée d'une partie réelle R_a et d'une partie imaginaire X :

$$Z_a = R_a + jX_a$$

La partie réelle est composée de la résistance de pertes R_l et de la résistance de rayonnement R_r .

L'énergie dissipée par R_r correspond à l'énergie rayonnée par l'antenne :

$$R_a = R_r + R_l$$

L'énergie dissipée par R_l correspond aux pertes diélectriques, aux pertes de conduction et aux pertes d'onde de surface de l'antenne [7].

I.6.3 Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (TOS)

Afin de minimiser le taux d'onde stationnaire (TOS), une antenne doit être parfaitement adaptée à l'impédance caractéristique Z_0 réelle d'une ligne de transmission (généralement 50Ω ou 75Ω). Le coefficient de réflexion d'une antenne Γ (ou S_{11}) est défini par :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0}$$

On peut représenter Γ sous la forme en décibel (dB) : $11 \text{ (dB)} = 20 \log (|\Gamma|)$

Le taux d'onde stationnaire TOS est donné par :

$$\text{TOS} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

I.6.4 La directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ est le rapport de la puissance rayonnée par une antenne dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$. Elle s'exprime par :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r}$$

Où :

$P(\theta, \varphi)$: est la puissance rayonnée par une antenne.

P_r : est la puissance totale rayonnée.

La directivité d'une antenne peut être facilement estimée à partir du diagramme de rayonnement de l'antenne. On peut dire qu'une antenne plus directive quand l'antenne admet une faible ouverture de rayonnement, par contre si elle admet une large ouverture de rayonnement on dit que c'est une antenne faiblement directive [8].

I.6.5 Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f}$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [9].

I.6.6 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne dans une direction donnée (θ, φ) est le rapport par unité d'angle solide entre la puissance $P(\theta, \varphi)$ rayonnée par l'antenne et celle d'une antenne isotrope, il est exprimé par :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a}$$

Où :

G : le gain de l'antenne.

$P(\theta, \varphi)$: la puissance rayonnée par une antenne.

P_a : Puissance d'entrée.

Il est aussi exprimé par la directivité et la perte [8] :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D$$

I.6.7 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique de différentes variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace comme la montre la Figure I.4. Il indique les directions de l'espace dans lesquelles la puissance

rayonnée est maximale. La fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \phi)$ est donnée comme suit :

$$r(\theta, \phi) = \frac{p(\theta; \varphi)}{p_0(\theta; \varphi)}$$

Où :

$P(\theta, \phi)$: puissance rayonnée dans une direction quelconque.

$P_0(\theta, \phi)$: puissance rayonnée max [10].

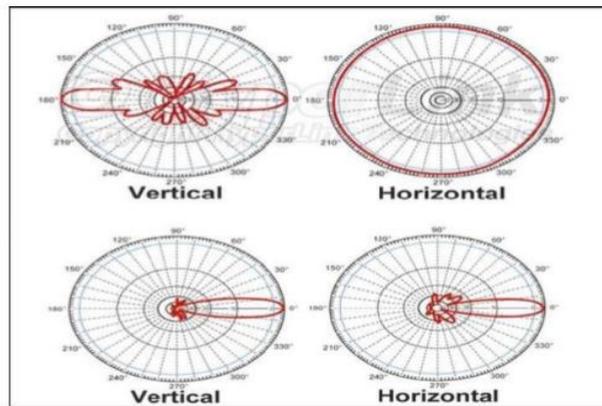


Figure I.4. Le diagramme de rayonnement [10].

I.7 Techniques d'alimentations

Les éléments rayonnants des antennes sans fil sont excités par des lignes d'alimentation, le choix de la ligne d'alimentation dépend de l'efficacité du transfert de puissance entre la structure rayonnante et la structure d'alimentation. La minimisation du rayonnement indésirable et de son effet sur le diagramme de rayonnement est l'un des facteurs importants pour l'évaluation de la ligne d'alimentation. Il existe plusieurs techniques d'alimentation développées jusqu'à présent. Les plus connues sont l'alimentation coaxiale, l'alimentation par ligne micro ruban, l'alimentation par couplage d'ouverture, l'alimentation par couplage de proximité, l'alimentation par guide d'ondes coplanaire, etc.[11].

I.7.1 Alimentation par ligne microbande

Dans cette technique d'alimentation, une bande conductrice est collée directement sur le bord du patch rayonnant comme le mentionne la Figure I.5, la bande conductrice est plus étroite que le patch. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'il peut être gravé du même côté de l'antenne, il est facile à fabriquer et il est facile à accorder à la résonance. C'est l'une

des techniques les plus couramment utilisées pour les antennes imprimées voir la Figure I.6, cependant il a l'inconvénient de générer des rayonnements parasites [12].

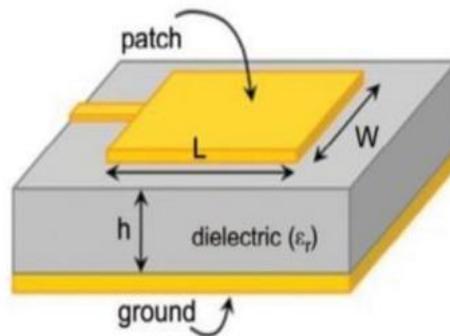


Figure I.5. Alimentation par ligne microbande [10].

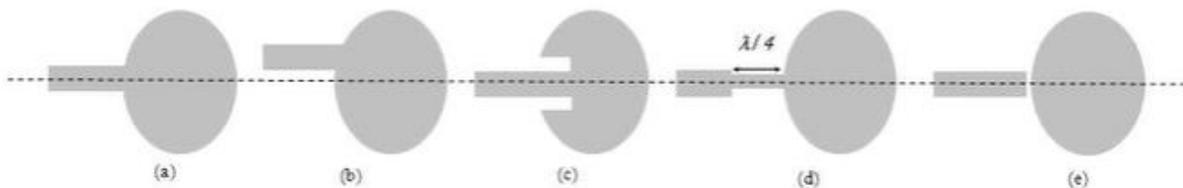


Figure I.6. Alimentation par une ligne microbande (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche (d) adaptée par ligne quart d'onde (e) couplée par un écart [10].

I.7.2 Alimentation coaxiale directe

Ce type d'alimentation, également appelé alimentation de sonde coaxiale, est couramment utilisé dans les patches circulaires et rectangulaires pour créer une polarisation circulaire. Le conducteur du connecteur coaxial est passé à travers le diélectrique soudé à l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse la Figure I.7 représente ce type d'alimentation [13].

Le principal avantage de ce type d'alimentation est qu'elle est facile à fabriquer et peut être placée à n'importe quel endroit du patch. Cependant, cette méthode possède un inconvénient en termes de diagramme de rayonnement. En effet, cette connexion peut produire des pics de courant locaux au niveau des éléments rayonnants, conduisant à des diagrammes de rayonnement dissymétriques.

De plus, des pertes se produisent lorsque le plan de masse, le diélectrique et l'élément plaqué sont percés [10].

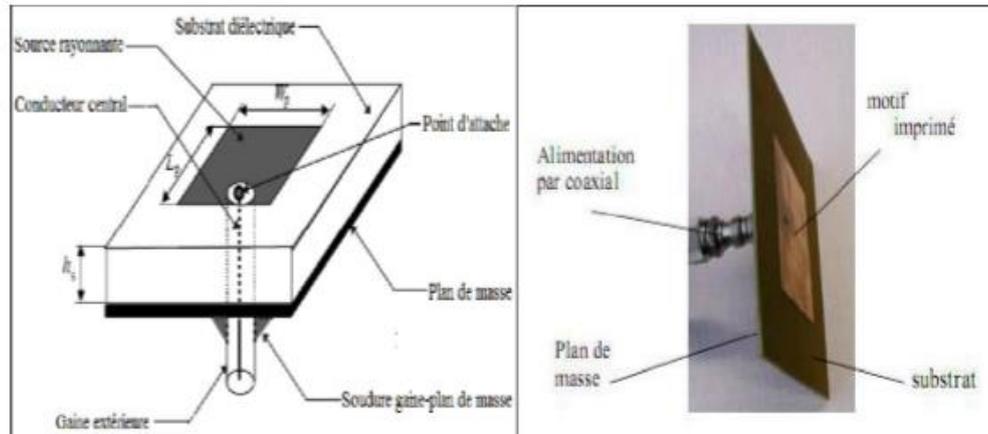


Figure I.7. Alimentation par connexion directe à une ligne coaxiale [10].

I.7.3 Alimentation par couplage électromagnétique

Une antenne se compose de deux substrats diélectriques avec une ligne d'alimentation entre eux. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur comme le montre la Figure I.8. L'excitation se produit par couplage électromagnétique. Bien que cette technique améliore la bande passante, elle est difficile à réaliser [10].

Les principaux avantages de ce type d'alimentation sont :

- ✚ Élimination radicale du rayonnement des lignes électriques.
- ✚ Aucun contact physique n'est requis entre la ligne électrique et le patch.
- ✚ Une distance accrue entre le patch et le plan de masse peut fournir une bande passante plus élevée.
- ✚ Plus d'options pour les combinaisons de deux diélectriques facilitent l'optimisation des performances de l'antenne. L'adaptation peut être effectuée en contrôlant la profondeur de la ligne d'alimentation sous le patch et la largeur du patch [14].

Les inconvénients sont :

- ✚ Fabrication difficile en raison des deux couches diélectriques qui requièrent un alignement adéquat.
- ✚ Augmentation de l'épaisseur globale de l'antenne et de son coût [14].

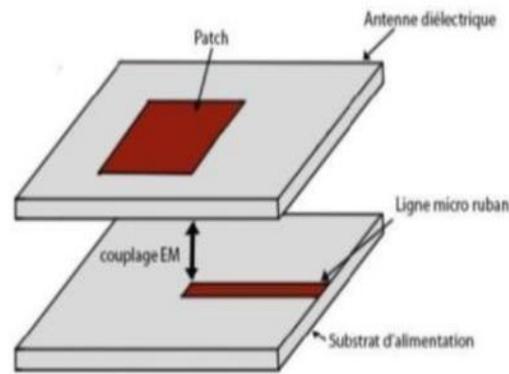


Figure I.8. Alimentation par couplage électromagnétique [10].

I.7.4 Alimentation par couplage à ouverture dans le plan de masse

Les éléments rayonnants et les lignes micro-ruban d'alimentation sont placés de part et d'autre du plan de masse. Des fentes de couplage dans le plan de masse permettent à l'énergie de circuler entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant mentionnée par la Figure I.9. Cette méthode nécessite un positionnement précis des fentes (voir la Figure I.10). Cela présente les avantages suivants :

- ✚ Séparation des circuits d'alimentation via des plans de masse. Du fait de ce faible rayonnement parasite, il se trouve en fait sous le plan de masse et non dans le sens de la propagation.
- ✚ Adaptation facile à réaliser en raison de grand nombre de paramètres comme la taille de l'ouverture et la longueur du stub de la ligne d'alimentation.

Cependant, cette technique présente quelques inconvénients :

- ✚ La bande passante est faible, mais peut être améliorée en faisant varier l'épaisseur du diélectrique ou en empilant plusieurs éléments rayonnants.
- ✚ Difficile à mettre en œuvre [9].

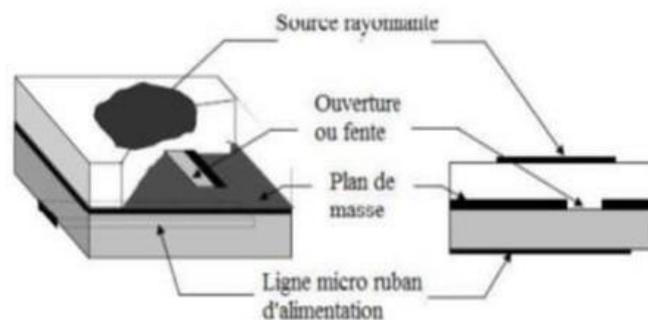


Figure I.9. Alimentation au travers d'une ouverture dans le plan de masse [10]

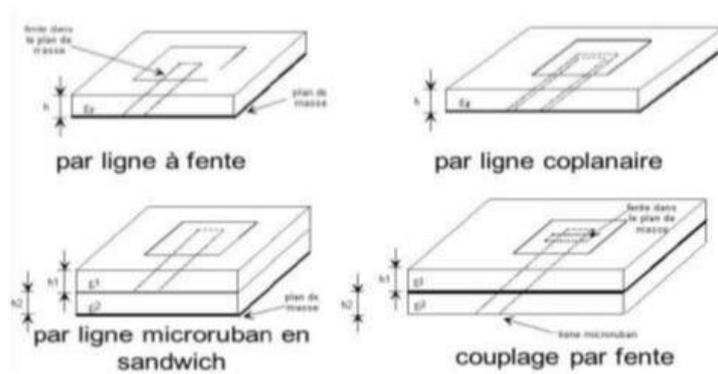


Figure I.10. L'alimentation par proximité de l'antenne imprimée [10].

I.8 Avantages et inconvénients des antennes patches

Les antennes micro ruban sont de plus en plus populaires pour les applications qui couvrent une large gamme de fréquences allant 100 MHz à 100 GHz. Une fonctionnalité très populaire dans les téléphones cellulaires.

Les deux avantages principaux conduiront à un développement très important de ce type d'antenne : un faible coût de production et des capacités d'intégration. Ils sont maintenant installés dans de nombreux appareils électroniques et constituent le type d'antenne de choix pour les fréquences microondes dans les systèmes de communication intégrés modernes [15].

Voici quelques-uns de ses avantages :

- ✚ Faible poids
- ✚ Volume réduit
- ✚ Faible encombrement
- ✚ Faible épaisseur
- ✚ Simplicité de réalisation et reproduction
- ✚ Fort rendement d'ouverture
- ✚ Polarisation variable simplement avec la position d'alimentation
- ✚ Possibilités de le conformer sur des surfaces non planes
- ✚ Possibilités d'association à des éléments actifs ou passifs tels que : Amplifications, modulateurs, déphaseurs
- ✚ Peuvent être facilement intégrés dans les circuits micro-ondes intégrés (MIC)
- ✚ La tendance à grouper plusieurs patches identiques pour construire des antennes réseaux

- ✚ Capables de fonctionner en double ou triple fréquence.

Cependant, ce type d'antenne a aussi des limites :

- ✚ Bande passante très étroite
- ✚ Généralement faible gain (6 dB).
- ✚ Rendement faible (concentration des champs sur les parois métallique)
- ✚ Effet de couplage parasite entre les éléments
- ✚ Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).
- ✚ Rayonnement parasite de l'alimentation

I.9 Les équations caractéristiques d'une antenne patch

I.9.1 Antenne patch rectangulaire

I.9.1.1 Dimensions du patch

Pour commencer, il faut trouver les dimensions du patch pour que notre antenne résonne aux bonnes fréquences. Il faut l'effectuer deux fois, une pour chaque fréquence, cela déterminera les deux côtés du patch rectangulaire.

L'équation suivante permet de trouver la permittivité effective d'une ligne micro-strip repose sur la largeur de la ligne et sur la hauteur du substrat [16] :

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 10 \frac{h}{w}}}$$

Pour avoir un bon rendement de l'antenne, une formule empirique permet de calculer la largeur W du patch:

$$W = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{c}{2fr \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}}$$

La longueur de l'antenne patch est allongée de part et d'autre par une quantité ΔL donnée par l'équation suivante :

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \frac{(\varepsilon_e + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.262\right)}{(\varepsilon_e - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.813\right)}$$

La longueur de l'antenne patch L est alors donnée par :

$$L = W - 2\Delta L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon\epsilon_0}} - 2\Delta L$$

On s'aperçoit bien que le substrat utilisé joue un grand rôle sur les dimensions du patch. Plus le constant diélectrique est élevé et plus la taille de l'antenne sera petite. La largeur influe également sur la fréquence de résonance mais dans une moindre mesure. A l'aide de cette équation, il a été possible de déterminer des graphiques de la fréquence en fonction de la longueur pour différents types de substrats [16].

I.9.1.2 Gain

Un autre paramètre aussi très utilisable qui sert à décrire les performances d'une antenne le gain. Malgré que le gain soit relié étroitement à la directivité, c'est une mesure qui compte du rendement de l'antenne (donc des pertes) aussi bien que sa capacité directionnelle.

Le gain en puissance d'une antenne dans une direction donnée est défini comme étant le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction $\Delta(\theta, \phi)$ sur l'intensité de rayonnement qui peut être obtenue si la puissance acceptée par l'antenne sera rayonnée de façon isotrope. Cette dernière est tout simplement la puissance fournie à l'antenne par la ligne de transmission issue de l'émetteur divisée par 4 (tout l'espace).

Il est donc formulé comme suit:

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{\text{intensité du rayonnement}}{\text{puissance fournie totale}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_f}$$

Mais, dans la majorité des cas, on a affaire à un gain relatif qui est défini comme étant rapport du gain en puissance dans une direction donnée $G_p(\theta, \phi)$ au gain en puissance d'une antenne référence dans sa direction référencée, recevant la même puissance fournie P_f . L'antenne référence est généralement un dipôle ou n'importe quelle antenne ou son gain peut être calculé ou bien est connu (le plus souvent une source isotrope sans pertes).

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_f(\text{source isotrope sans perte})} \text{ (sans dimensions)}$$

Pour une source isotrope sans pertes $P_f = P_{\text{ray}}$ et son intensité est : $U = \frac{P_{\text{ray}}}{4\pi}$

Pour une antenne réelle quelconque $P_f = P_{\text{ray}} + P_d$ (P_d étant les différentes pertes en puissance dans l'antenne: par effet Joule, dans le diélectrique, désadaptation).

Pour une telle antenne, on définit la notion de rendement par le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit:

$$\eta = \frac{P_r}{P_f}$$

I.9.1.3 La fréquence de résonance et la largeur de bande

La fréquence de résonance f est la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée. C'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. Généralement la bande passante correspond à la plage de fréquence pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur de -10dB [17].

Mais dans certaines applications, ce niveau peut être relevé à -6 dB ce qui permet de relâcher certaines contraintes lors de la conception d'une antenne, c'est le cas, par exemple, pour certaines antennes de téléphone mobile. La limite sur les critères de fonctionnement de l'antenne se situe donc entre une fréquence minimale f_1 et une fréquence maximale f_2 . De ce fait, la largeur relative de bande [18], est définie par un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale f_0 comme :

$$B_r = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

La largeur de bande est définie par le rapport entre les deux fréquences extrêmes:

$$B_f = \frac{f_2}{f_0}$$

La Figure I.11 montre le paramètre S_{11} d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB. Dans cet exemple la bande passante qui s'exprime en Hertz est de 226 Mhz.

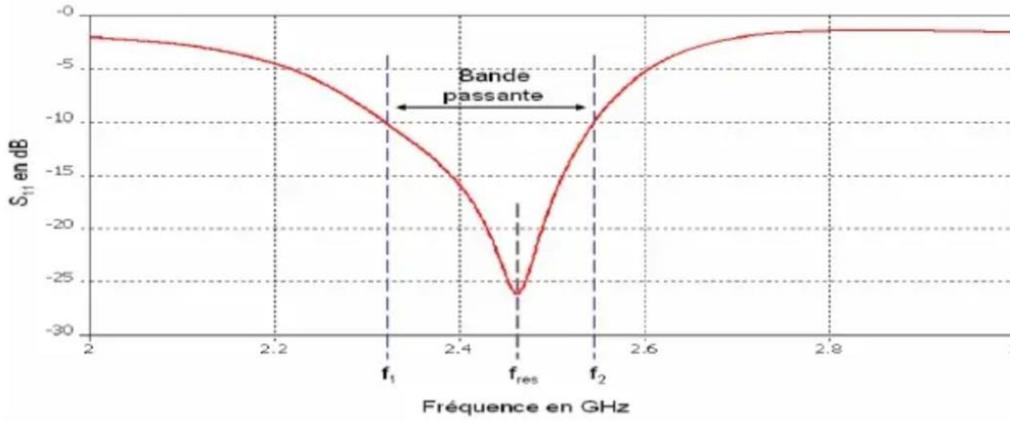


Figure I.11. Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne

I.9.1.4 Impédance d'entrée

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle illustré par la Figure I.12 défini par les paramètres S :

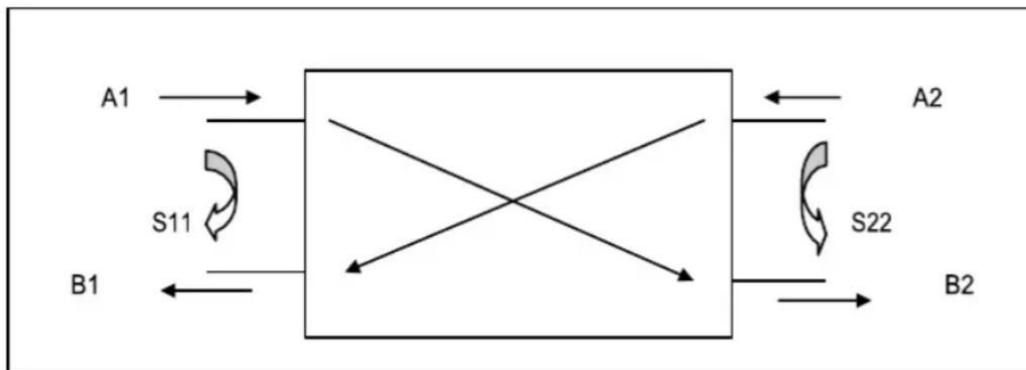


Figure I.12 Représentation d'une antenne en quadripôle.

Le coefficient S_{11} correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $A_2 = 0$. Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre qu'on se base lors de l'optimisation.

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne. Cette impédance est donnée par la formule:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

Z_0 : impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

N.B : Comme S_{11} est en fonction de la fréquence, alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence.

I.9.2 Antenne patch circulaire

I.9.2.1 Rayon physique et effectif du patch circulaire

La revue de la littérature a montré que le rayon effectif du patch circulaire peut être trouvé à partir de l'équation suivante [19]:

$$R_{\text{eff}} = r \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F r} \left[\ln \left(\frac{\pi r}{2h} \right) + 1.7726 \right]}$$

Où :

r : rayon de patch circulaire

$$r = \frac{F}{\left[1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi f}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Avec : $F = \frac{8.791 \cdot 10^9}{f r \sqrt{\epsilon_r}}$

ϵ_r : constante diélectrique du substrat.

F_r : fréquence de résonance.

H : hauteur ou épaisseur du substrat.

La surface effective du patch est alors donnée par : $A_{\text{eff}} = \pi r_{\text{eff}}^2$

I.9.2.2 Fréquence de résonance du patch circulaire

Les fréquences de résonance du patch circulaire peuvent être analysées de manière pratique en utilisant le modèle de cavité. La cavité est composée de deux conducteurs électriques parfaits en haut et en bas pour représenter le patch et le plan de masse, et un conducteur magnétique parfait cylindrique autour de la périphérie circulaire de la cavité. En utilisant la procédure de synthèse, la fréquence de résonance d'un patch circulaire peut être calculée à partir de l'équation suivante [20].

$$F_0 = \frac{C J_{mn}}{2\pi r \epsilon_r f \sqrt{\epsilon_r}}$$

J_{mn} : la fonction d'ordre de Bessel n.

Pour le mode dominant TM₁₁, $J_{mn} = 1.84118$ qui est largement utilisé dans toutes sortes d'antennes micro ruban.

I.9.2.3 Fréquence de qualité, bande passante

Le facteur de qualité, la bande passante et l'efficacité sont des chiffres de mérite et sont interdépendants, et il n'y a pas de liberté totale pour optimiser chacun d'eux de manière indépendante. Par conséquent, il y a toujours un compromis entre eux pour arriver à une performance d'antenne optimale. Cependant, il existe une contrainte d'optimiser l'un d'entre eux tout en réduisant les performances des autres. Le facteur de qualité est une valeur de mérite représentative des pertes d'antenne. Pour l'antenne patch circulaire, le facteur de qualité totale Q_t en général, peut s'écrire:

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$$

Où :

Q_{rad} : facteur de qualité due aux pertes d'ondes spatiales.

Q_d : facteur de qualité due aux pertes diélectriques.

Q_c : facteur de qualité due aux pertes ohmiques.

La bande passante fractionnaire du patch circulaire est inversement proportionnelle à Q_t . Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) ou, en anglais, VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio aux bornes d'entrée est égal ou inférieur à une valeur maximale souhaitée sur une bande en tenant compte de l'adaptation d'impédance, nous avons :

$$B = \frac{VSWR-1}{Q_t \sqrt{VSWR}}$$

L'équation ci-dessus peut également être appliquée pour une antenne patch rectangulaire. La directivité du patch circulaire est une mesure des propriétés directionnelles par rapport à ces antennes isotropes. L'ennui de l'effort numérique requis pour calculer la directivité de l'antenne micro ruban a été abordé par de nombreux auteurs. La directivité d'une antenne micro ruban circulaire a été calculée par DERNERYD. Le calcul de la directivité est compliqué car l'expression impliquant l'intégrale contient les fonctions de Bessel.

I.9.3 Antenne à fente imprimée

Les fentes rayonnantes (antennes résonantes) dont l'ouverture généralement rectangulaire ou circulaire est pratiquée dans un plan conducteur et alimentée par une ligne micro ruban. (Figure I.12).

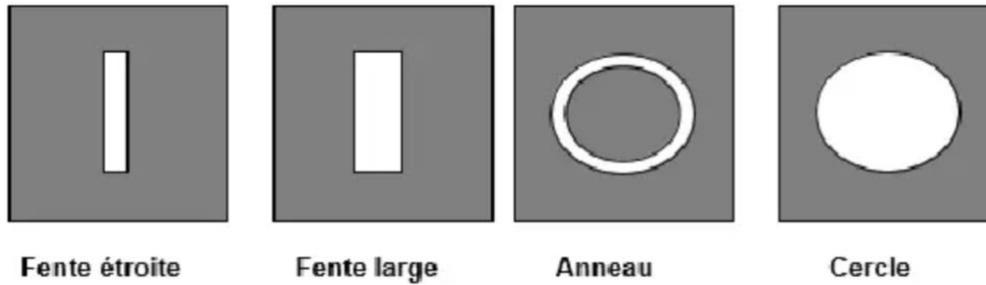


Figure I.13. Antennes à fentes.

La première étape dans la conception d'une antenne à fente consiste à déterminer la longueur de fente. La longueur résonante d'une fente dans un mode dominant peut être donnée approximativement par la relation suivante :

$$L_r = \frac{\lambda_s}{2} - \Delta L_s$$

Avec ΔL_s qui est la longueur équivalente associée à l'induction-zéro aux extrémités court-circuitées. L'étape suivante est la conception de la structure d'alimentation de telle sorte que la résistance série de l'antenne à fente soit adaptée à l'impédance de la structure d'alimentation.

I.10 La technologie WEARABLE

I.10.1 Définition de la technologie WEARABLE

La technologie portable, ou "WEARABLE TECHNOLOGY" en anglais, fait référence à des dispositifs électroniques conçus pour être portés sur le corps, tels que des montres intelligentes, des traqueurs de fitness et des vêtements intelligents. Ces appareils peuvent suivre, analyser et transmettre des données personnelles, et ils se présentent sous diverses formes, notamment des bijoux, des accessoires et des dispositifs médicaux.

Les technologies portables ont des applications dans divers domaines, tels que la santé, le fitness, la mode et l'armée. Elles font partie de l'Internet des objets (IoT) et sont alimentées par des microprocesseurs, ce qui leur permet d'envoyer et de recevoir des données via Internet. Les exemples de technologies portables comprennent les montres intelligentes, les traqueurs de fitness, les chaussures intelligentes et les bijoux intelligents.

La technologie évolue rapidement et est intégrée dans un large éventail de scénarios, de la santé au sport professionnel. Des technologies portables de sécurité sont également disponibles, conçues pour aider les individus dans des situations menaçantes et peuvent être déguisées en bijoux pour une utilisation discrète [21-24].

I.11 Les différents WEARABLE DEVICES

Les WEARABLE DEVICES (tous les appareils considérés comme des WEARABLE technologies) sont nombreux. Les plus connus et les plus commercialisés aujourd'hui sont les montres et bracelets connectés qui peuvent fournir des informations sur l'activité physique, gérer des applications ou encore commander certains objets à distance. De nombreux autres appareils ont été développés mais ils n'ont pas encore séduit le grand public car leur utilisation est peu ergonomique et parfois non intuitive (c'est le cas notamment des lunettes connectées Google Glass). Actuellement, c'est le marché du sport et de la santé qui est le plus mature et qui développe le plus de WEARABLES DEVICES et d'applications pour contrôler et mesurer nos comportements physiques (pulsation cardiaque, nombre de pas, kilomètres et distance parcourus, calories brûlées ...).

Le Smartphone faisant partie intégrante de notre quotidien et se trouvant très souvent dans notre poche ou à proximité de nous, peut être considéré comme une WEARABLE technologie. Ceci est d'autant plus vrai lors d'une utilisation sportive ou médicale. Par exemple, il peut être fixé à l'aide d'une pochette ou d'un brassard à une partie du corps ou d'un accessoire sportif (bras ou guidon de vélo) voir Figure I.15 [28].

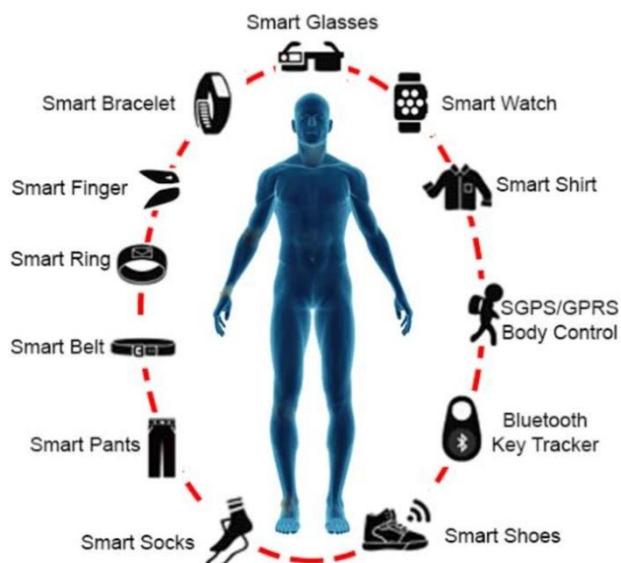


Figure I.16. Les appareils utilisés comme WEARABLE technologies

I.12 Les avantages et les inconvénients des différents matériaux utilisés pour les substrats flexibles en termes de durabilité

Les avantages et les inconvénients des différents matériaux utilisés pour les substrats flexibles en termes de durabilité sont les suivants :

Les matériaux :	Les avantages :	Les inconvénients :
Verre	Résistant aux rayures, à la chaleur et aux agents chimiques.	Fragile et non flexible, ce qui peut limiter son utilisation dans des applications nécessitant une flexibilité élevée [29].
Plastique	Léger, flexible et résistant aux chocs.	Moins durable que le verre et peut se dégrader avec le temps en raison de l'exposition aux UV et aux agents chimiques [30].
Acier inoxydable	Très durable, résistant à la corrosion et aux chocs.	Moins flexible que d'autres matériaux, ce qui peut limiter son utilisation dans des applications nécessitant une flexibilité élevée [29].
Polyimide (Kapton)	Résistant à la chaleur, flexible et durable.	Coût plus élevé que certains autres matériaux [31].
Polyester (PET)	Léger, flexible et résistant à l'humidité.	Moins résistant à la chaleur que le polyimide [31].

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients des différents matériaux

En résumé, chaque matériau présente des avantages et des inconvénients en termes de durabilité, et le choix dépend des exigences spécifiques de l'application, telles que la flexibilité, la résistance à la chaleur, aux chocs et à la corrosion.

I.13 Les différents types de WEARABLES

Les différents types de WEARABLES comprennent une variété d'appareils électroniques portés par les individus pour diverses utilisations. Voici quelques catégories de WEARABLES :

I.13.1 Objets Connectés Autonomes

Ces dispositifs incluent des produits tels que les Google Glass et les montres Samsung, offrant des fonctionnalités avancées et une connectivité autonome [32].

I.13.2 WEARABLES de Suivi de Santé et de Fitness

Ils englobent des dispositifs comme les trackers d'activité physique, les bracelets connectés et les bandeaux qui surveillent l'activité physique et les signes vitaux, se connectant souvent à des applications pour stocker et analyser les données [33].

I.13.3 Vêtements Intelligents

Ces vêtements intègrent des technologies embarquées pour diverses fonctions telles que le suivi de la condition physique, l'interaction avec d'autres appareils, et l'adaptation aux préférences de l'utilisateur ou à l'environnement [33].

I.13.4 Casques de Réalité Augmentée (AR) et Virtuelle (VR)

Les casques AR intègrent des informations numériques dans l'environnement réel de l'utilisateur, tandis que les casques VR remplacent entièrement l'environnement réel par des informations numériques [33].

I.13.5 Prothèses Auditives à Intelligence Artificielle (AI)

Ces appareils peuvent filtrer les bruits indésirables, s'adapter automatiquement pour offrir la meilleure performance, et peuvent inclure des fonctionnalités telles que le suivi de la condition physique et la traduction [33].

I.13.6 Assistants Virtuels Portables

Certains WEARABLES intègrent des assistants virtuels contrôlés par la voix et les gestes, offrant des fonctionnalités telles que la recherche d'informations, la traduction, le suivi de la condition physique, etc.

Ces différentes catégories de WEARABLES offrent une gamme variée d'options pour répondre à divers besoins allant du suivi de la santé à l'interaction avec l'environnement numérique, ou encore à l'amélioration de l'expérience de l'utilisateur au quotidien [33].

I.14 Conclusion

Les antennes patches jouent un rôle crucial dans la technologie WEARABLE, en permettant une connectivité sans fil dans des dispositifs compacts et flexibles. Ce mémoire a examiné l'intégration des antennes patches dans les dispositifs WEARABLE, en mettant en évidence leurs avantages et leurs défis. Des recherches futures pourraient se concentrer sur l'optimisation des performances des antennes patches dans les dispositifs WEARABLE, ainsi que sur leur intégration dans des matériaux flexibles et textiles.

Références bibliographiques

- [1] CHOUHBANE, MAROUA. Étude et conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement. 2021.
- [2] MEKIMAH, BOUALEM. Étude du fonctionnement en mode bi fréquence des patches microbandes empilés et excentrés. 2013. thèse de doctorat.
- [3] ALEXANDRE BOYER : institue nationale des sciences appliquées de Toulouse 5eme année Réseau et Télécom, Toulouse 2011.
- [4] AYADI, MOHCENE. Etude et Conception d'une Nouvelle Antenne pour les Applications de Bio télémétrie Sans Fil. 2022.
- [5] LAHEG, CHERIFA. Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable. 2022.
- [6] CHAABANE ABDELHALIM, « Conception D'une Antenne Bip Large Bande A Fort Gain », Thèse Du Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif-1,2017.
- [7] TOUKALI SAMIRA, YAALAOUI KHADRA « Conception et simulation d'un réseau linéaire d'antennes imprimées », Mémoire du master, Université de Mohamed El-BACHIR EL-IBRAHIMI - Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [8] HADDAD MOUSLIM, KHELIL ABDELMADJID. Conception et réalisation d'une antenne ultra large bande pour des applications biomédicales. 2023.
- [9] LAHEG, CHERIFA. Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable. 2022.
- [10] BENMECHERNENE, ABIR, RACHDI, SOUMIA CHAHRAZED, et SLIMANE, ZOHRA. Analyse d'antenne patch à base du Graphème. 2022. Thèse de doctorat.

- [11] CHOUHBANE, MAROUA. Étude et conception d'une antenne reconfigurable en fréquence et en diagramme de rayonnement. 2021.
- [12] TIGHILT, YAMINA. Identification des antennes microrubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones. 2018. Thèse de doctorat.
- [13] LAHEG, CHERIFA. Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable. 2022.
- [14] KHOUALED KHAWLA, DOUKHI IBTISSEM. Simulation et fabrication d'une nouvelle antenne pour la détection des tumeurs cancéreuses. 2023.
- [15] BENZINA, MARWA, CHOUREF, JAHIDA, MOULESSEHOUL, WASSILA, et la Simulation d'une antenne imprimée agile pour les applications satellitaires. 2022. Thèse de doctorat.
- [16] J3EA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes.
- [17] BOYER, ALEXANDRE. Contribution à la caractérisation et la modélisation de la CEM des circuits intégrés. 2019. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [18] DREINA, Emmanuel. Conception, optimisation et intégration RF d'un système d'antennes miniatures multi capteurs utilisant la diversité en vue d'augmenter les performances radio d'un terminal mobile 4G. 2010. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [19] SINGH, SUNIL, AGARWAL, NEELESH, NITIN, Na vendu, et la Design consideration of microstrip patch antenna. International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2012, vol. 2, no 1, p. 306-316.

- [20] LAI, T. F., MAHADI, WAN NOR LIZA, ET SOIN, NORHAYATI. Circular patch microstrip array antenna for ku-band. World academy of science, engineering and technology, 2008, vol. 48, p.298-302.
- [21] HAYES, A. What is wearable technology (wearables)? Definition and examples. 2022.
- [22] HOLDEN, BEN et DUFFY, VINCENT G. wearable technology safety and ethics: a systematic review and reappraisal. In: international conference on human-computer interaction. champ: Springer nature SWITZERLAND, 2023. p. 390-407.
- [23] CHOPRA, AAKANKSHA et SINGHAL, ANKIT. Understanding the Wearable Technology. In : Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communication (ICICC). 2021.
- [24] GODFREY, ALAN, HETHERINGTON, VICTORIA, SHUM, HUBERT, et la From A to Z: Wearable technology explained. Maturitas, 2018, vol. 113, p. 40-47.
- [25] PEYVEL, EMMANUELLE. EMMANUELLE PEYVEL, L'Émergence du tourisme domestique au Viêt Nam: lieux, pratiques et imaginaires. Thèse de doctorat en géographie, université de Nice-Sophia Antipolis, dirigée par Jean-Christophe Gay (soutenue le 23 novembre 2009). Mondes du tourism, 2010, no 2, p. 102-105.
- [26] GARNIER, BAPTISTE. Development of near field communicating (NFC) textile structures for energy and data transfer around the human body. 2021. Thèse de doctorat. Université de Lille.
- [27] PRESSE, ANTHONY. Conception d'antennes souples et de conducteurs magnétiques artificiels en bande UHF. 2015. Thèse de doctorat. Rennes 1.
- [28] TechTheRoad.fr - all right reserved - design &dev by MVP Themes-2016.
- [29] CAILL-MILLY, NATHALIE. De la collecte des données à l'appropriation des résultats par les utilisateurs-Contribution à l'amélioration des connaissances sur les ressources exploitées et d'intérêt pour les navires de Nouvelle-Aquitaine. 2023.

- [30] GIRARD, GAUTIER. Caractérisation et modélisation thermomécaniques de matériaux et de structures circuits imprimés complexes destinés aux applications spatiales radiofréquences et micro-ondes. 2018. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [31] ROZNOWICZ, Corentin. Qu'est-ce qu'un circuit court légitime pour les consommateurs? In : 5ème Journée de Recherche en Marketing du Grand-Est. 2019.
- [32] MORRISON, CECILY, CUTRELL, EDWARD, DHARESHWAR, ANUPAMA, et al. Imagining artificial intelligence applications with people with visual disabilities using tactile ideation. In: Proceedings of the 19th international ACMSIGACCESS conference on computers and accessibility. 2017. p. 81-90.
- [33] ALLAL, TIBERKAK. Environnement domotique pour l'e-santé. 2019. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

Chapitre02 :

Modélisation

d'antenne imprimée

II.1 Introduction

Les substrats flexibles jouent un rôle essentiel dans la conception d'antennes pour les applications WEARABLE. Ces substrats offrent une flexibilité mécanique tout en conservant des performances électriques adéquates, ce qui les rend idéaux pour les dispositifs portables tels que les vêtements intelligents, les montres connectées et les capteurs de santé. Ce mémoire explore l'utilisation des matériaux flexibles dans la conception d'antennes pour les applications WEARABLE. L'objectif de ce chapitre est de présenter un état de l'art sur les différents substrats souples pour une application en bande ISM, autour de la fréquence 2,45GHz. Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant le logiciel CST Microwave Studio utilise deux techniques de discrétisation : une discrétisation surfacique (cellules en 2D) et une discrétisation volumique (cellule en 3D). L'avantage majeur d'utiliser différents substrats, c'est de trouver les résultats les plus réels, avec précision avant de passer à la réalisation [1].

II.2 Les substrats flexibles WEARABLE

Les substrats flexibles sont largement étudiés pour leur application dans les technologies portables, telles que les dispositifs médicaux et les appareils électroniques. Des études ont été menées sur les couches minces piézoélectriques flexibles pour la récupération d'énergie vibratoire. De plus, la technologie portable est considérée comme un moyen intéressant pour la surveillance médicale, ce qui a conduit au développement de technologies intégrées robustes, ultra-minces et flexibles. Des recherches ont également porté sur les mécanismes d'endommagement de films minces métalliques déposés sur des substrats souples pour l'électronique flexible. En outre, le développement de mémoires résistives pour l'électronique flexible a été étudié dans le contexte des appareils portables et des capteurs

Enfin, l'essor des antennes flexibles est lié à la demande croissante de dispositifs portables et de l'Internet des objets (IDO)[2-6].

II.3 Effet des matériaux des substrats flexibles sur les performances des dispositifs portables

Les matériaux utilisés pour les substrats flexibles ont un impact significatif sur les performances des dispositifs portables. Par exemple, le verre, le plastique et l'acier inoxydable sont parmi les matériaux les plus courants pour les substrats flexibles, et ils offrent une flexibilité mécanique, une résistance à la chaleur et aux agents, ainsi que la capacité de transmettre des signaux électriques à des vitesses élevées.

Les matériaux pour PCB (Printed Circuit Board) flexibles doivent également répondre à des exigences telles que la flexion statique ou dynamique, la compatibilité avec les processus d'assemblage standard et la prise en charge de procédures de test.

De plus, les matériaux flexibles permettent de réduire le coût et le poids des dispositifs portables, mais leur fabrication est généralement plus coûteuse.

Enfin, l'utilisation de substrats flexibles peut également contribuer à la conception de dispositifs plus compacts, légers et, dans certains cas, résistants aux chocs, à la corrosion et à l'humidité [7-10].

II.4 Choix du matériau flexible

La conception d'antennes souples repose principalement sur le choix de matériaux flexibles disponibles en différentes épaisseurs. La performance d'une antenne micro ruban est largement déterminée par la constante diélectrique et l'épaisseur du substrat flexible. Une faible constante diélectrique réduit les pertes liées à la propagation des ondes, tandis que le facteur de qualité du rayonnement est inversement proportionnel à l'épaisseur du substrat. Ainsi, l'épaisseur du matériau diélectrique est cruciale, car elle influence à la fois la bande passante et l'efficacité de l'antenne. Le choix de l'épaisseur est un compromis entre ces deux aspects. Les matériaux conducteurs utilisés pour le patch et les plans de masse doivent avoir une faible résistivité pour minimiser les pertes électriques et augmenter le rendement de l'antenne. Différents tissus conducteurs sont disponibles sur le marché, mais leur choix et leur assemblage doivent être soigneusement considéré pour éviter les interférences mécaniques qui pourraient altérer les performances de l'antenne. La présence d'un matériau textile résistant à la traction, à la flexion et offrant une stabilité géométrique est essentielle pour stabiliser la structure de l'antenne. Lors de l'assemblage des différentes couches de l'antenne, il est

important de prendre en compte les différences de rugosité et de densité entre les surfaces avant et arrière pour minimiser les pertes.

Enfin, des solutions d'optimisation et des progrès dans le développement des antennes portables peuvent améliorer les performances des antennes avec des substrats souples. Une meilleure compréhension des matériaux textiles et de leur caractérisation peut encore conduire à des améliorations significatives dans la conception et le comportement de ces antennes. Cette section se penchera sur l'impact des paramètres du substrat sur les performances des antennes en utilisant différents types de substrats souples.

II.5 Les substrats flexibles intégrés dans des antennes imprimées

Lorsqu'on conçoit une antenne, il est crucial de comprendre les propriétés des matériaux diélectriques et conducteurs qui la composent. Cette importance est encore plus marquée lorsqu'il s'agit d'une antenne imprimée, car l'énergie du champ électromagnétique est confinée dans le substrat de l'antenne. De plus, il est également essentiel de connaître les propriétés des matériaux environnants, car ils peuvent modifier les caractéristiques de l'antenne telles que le gain, le diagramme de rayonnement, l'efficacité, l'impédance et la fréquence de résonance.

Avant de commencer la conception d'une antenne, il est essentiel de définir les caractéristiques spécifiques d'antenne. Les paramètres de performance des différents substrats sont fournis dans le tableau II.1. Les dimensions initiales de l'antenne imprimée proposée sont données dans le Tableau II.2. La Figure II.1, décrit la géométrie de notre antenne utilisée.

Substrat	ϵ_r	Tang (d)	H	ϵ_{eff}
Silicone	2.65	0.01	3.2	2.43
Nylon	3.5	0.03	0.5	3.41
Polyester	1.9	0.03	0.78	1.86
Demin	1.87	0.05	1.5	1.8
Djean	1.68	0.025	1	1.64
Kapton	3.5	0.02	0.5	3.41
Cotton	1.63	0.08	1.5	1.58
Polyamide	1.54	0.01	1.5	1.5

Tableau II.1. Les paramètres de performance des différents substrats

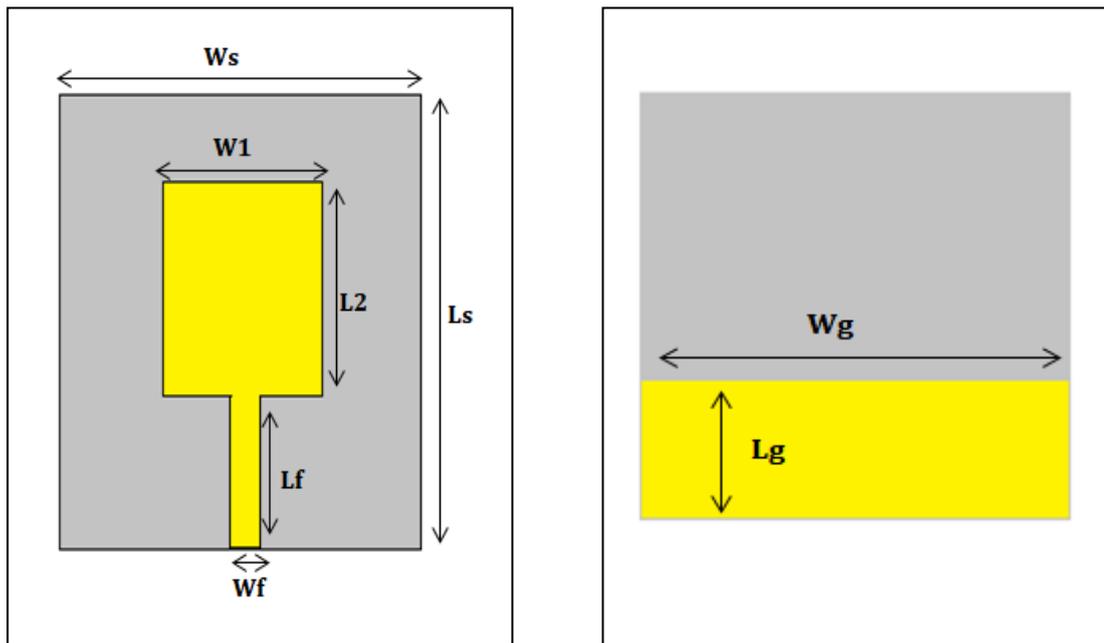


Figure II.1. Géométrie de l'antenne rectangulaire

Paramètres	Dimensions [mm]				
	Silicone	Nylon	Polyester	Djean	Cotton
Ws	50	40	60	54	59.35
Ws	50	50.08	65	62	65.09
W1	47.52	31.34	50	41.13	45.26
L2	39.62	34	43.96	45.73	47.68
Wf	26	21	30	27	27.63
Lf	10	15	20	15	15
Wg	50	40	60	54	59.63
Lg	50	10	20	10	10

Tableau II.2. Les dimensions initiales de l'antenne imprimée proposée

II.6 Résultats et simulations

II.6.1 Coefficient de réflexion S11

La Figure II.2 représente le coefficient de réflexion obtenu à partir de la simulation réalisée avec le logiciel CST des différents substrats :

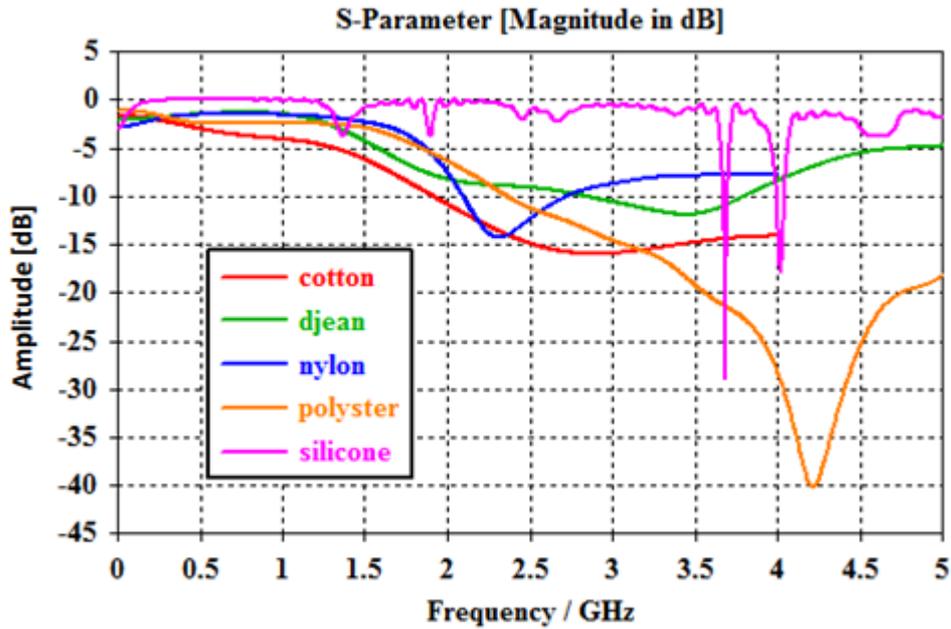


Figure II.2. Le coefficient de réflexion du patch rectangulaire

D'après la figure nous voyons bien qu'avec les dimensions initiales nous avons amélioré le niveau original avant d'adaptation de nos antennes. Elle représente le coefficient de réflexion à la fréquence de 4.21 GHz. La valeur de ce coefficient égale à -40.11 dB du substrat polyster, donc il présente une bonne adaptation par rapport aux autres substrats .

II.6.2 Le diagramme de rayonnement et le gain du patch

Le diagramme de rayonnement en 2D et le gain en 3D de ces antennes simulées sont représentés sur les figures ci-dessus :

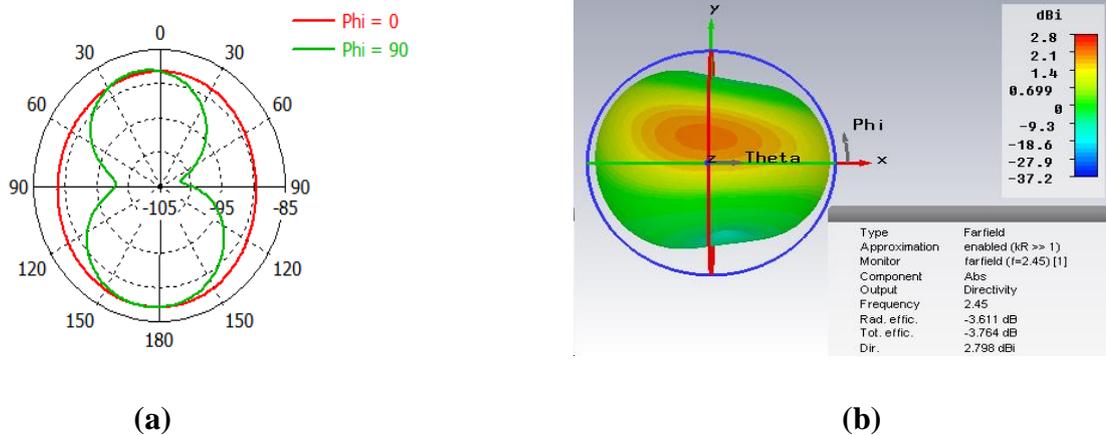
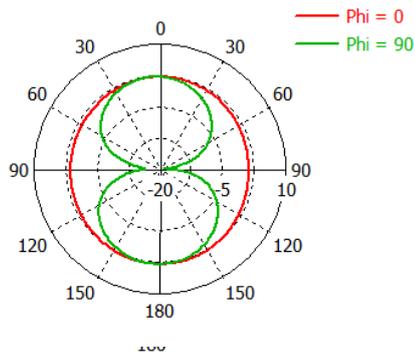
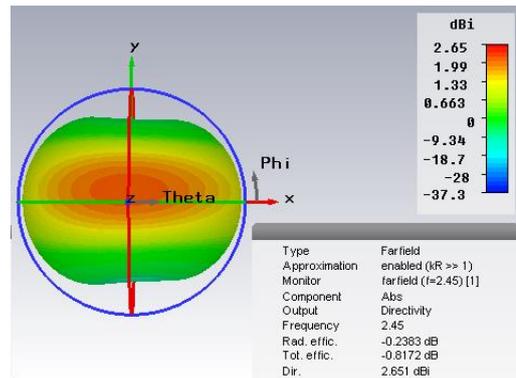


Figure II.3. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du cotton

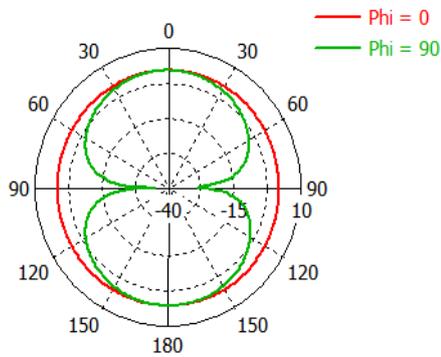


(a)

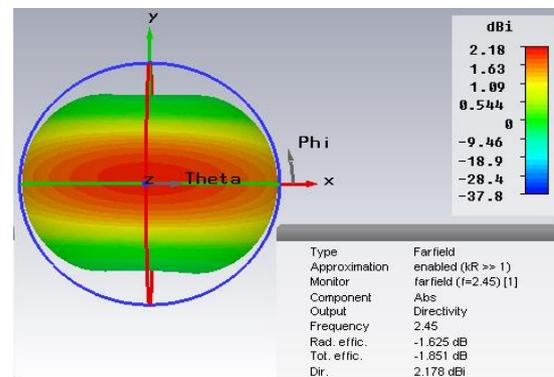


(b)

Figure II.4. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du djean

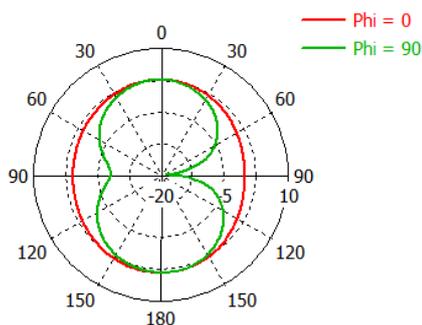


(a)

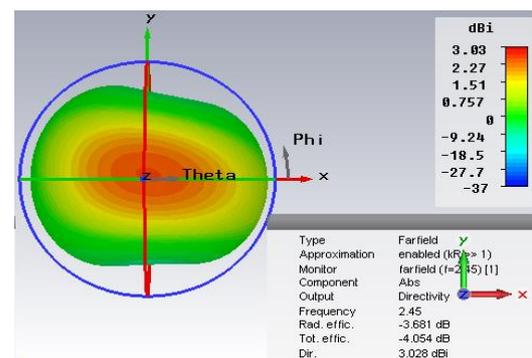


(b)

Figure II.5. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du nylon



(a)



(b)

Figure II.6. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du polyester

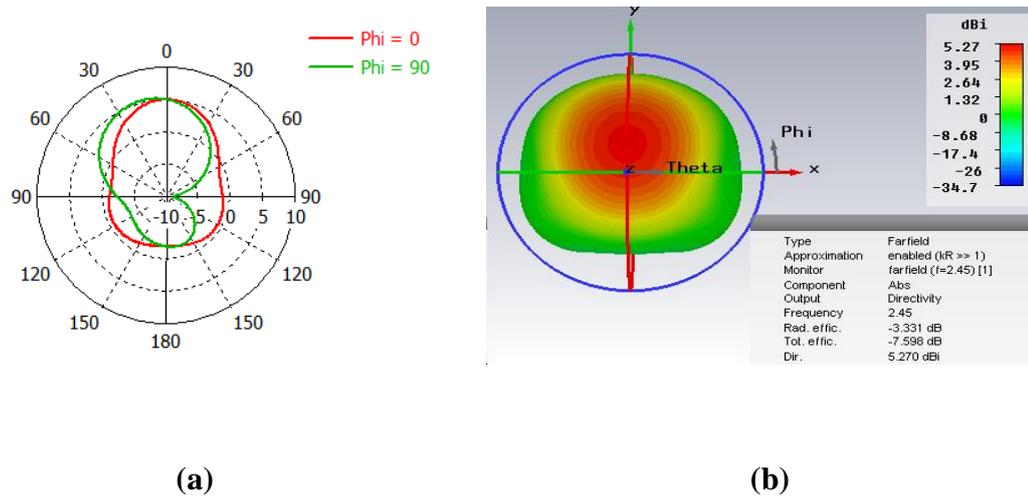


Figure II.7. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz dusilicone

Avant l'adaptation de l'antenne patch on a obtenu un gain de 2.79 dB ; 2.65 dB ; 2.17dB ; 5.27 dB ; 3.02 dB à la fréquence 2.45 GHz successivement avec les substrats suivants (cotton, djeans, nylon, polyester, silicone).

II.6.3 Antenne imprimée optimisée

Une deuxième étude sur les effets des courbures des substrats sur les performances de l'antenne est présentée dans cette partie. Le tableau II.3 montre les dimensions optimisées de l'antenne imprimée proposée. Cette antenne est imprimée sur des substrats souples de type silicone, nylon, polyester, djeans et cotton.

Paramètres	Dimensions [mm]				
	Silicone	Nylon	Polyester	Djean	Cotton
Ws	50	50	60	54	60
Ls	70	50	65	62	65
W1	45.02	30	40	29.42	44
L2	55	31	23.96	30.73	45
Wf	1	3	4	2	3
Lf	10	14	15	15	15
Wg	50	50	60	54	60
Lg	70	14	18	15	10

Tableau II.3. Les dimensions optimisées de l'antenne imprimée proposée

Dans cette technique d'alimentation, la ligne d'alimentation est collée directement sur le bord du patch rayonnant illustré par les Figure II.8.9.10.11.12. La bande est plus étroite que le patch. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'il peut être gravé du même côté de l'antenne, qu'il est facile à fabriquer et qu'il est facile à accorder à la résonance. C'est l'une des techniques les plus couramment utilisées pour les antennes imprimées. Il a l'inconvénient de générer des rayonnements parasite.

La largeur W et la longueur L du patch, substrat et du plan de masse jouent un rôle très important dans la détermination de fréquence de résonance. Lors de l'étude de l'effet de la variation de la largeur et la longueur les autres paramètres tels que la permittivité ϵ_r , la hauteur h du substrat sont fixés.

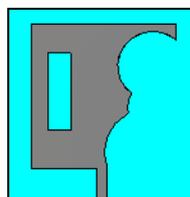
En s'inspirant de ces méthodes, la technique que nous allons essayer de développer et d'adapter pour notre antenne résonnant déjà à la fréquence 2,45 GHz c'est d'intégrer des fentes (Slots) et des encoches (Slits) au niveau de l'élément rayonnant après une optimisation dans les dimensions du structures proposées de substrat coton, djeans, nylon, polyester et silicone. Les fentes modifient le parcours des courants en créant de nouveaux chemins. L'intégration de fentes est arbitraire, les caractéristiques de l'antenne varient selon la forme, les dimensions et la position de la fente.

Après des essais de plusieurs formes (rectangulaire, circulaire et triangulaire) et les positions des fentes nous avons opté les résultats de coefficient de réflexion S_{11} suivant.

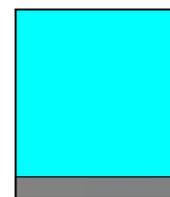
Le choix d'une encoche permet d'ajuster l'impédance d'entrée pénétrant dans l'antenne pour l'adapter à l'impédance de source.

II.6.3.1 Le coefficient de réflexion et le diagramme de rayonnement d'antenne imprimée proposée de substrat du type coton, djeans, nylon, polyester et silicone

II.6.3.1.1 Substrat coton



(a) Vue de face



(b) Vue arrière

Figure II.8. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée du Cotton.

Chapitre 02 : Modélisation d'antenne imprimée

Le graphe suivant dans la Figure II.9 représente le coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence pour d'antenne optimisée de cotton :

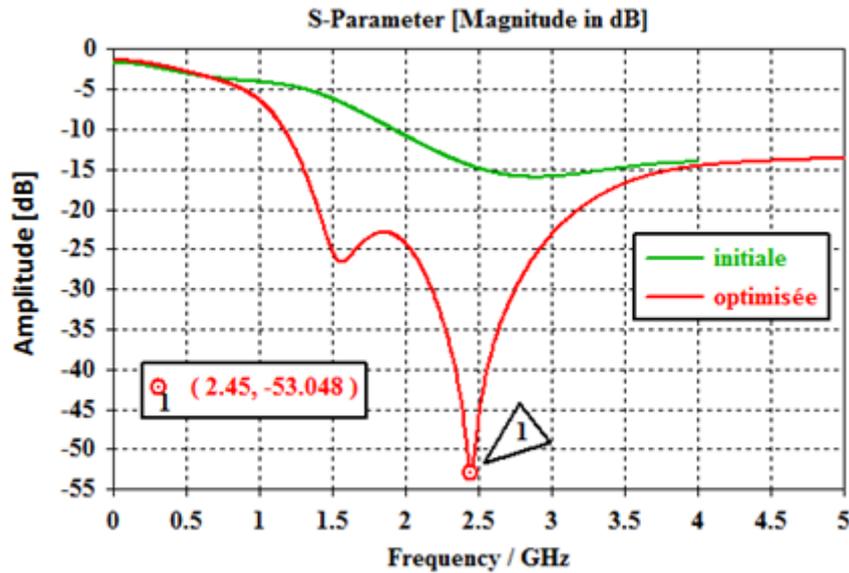


Figure II.9. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de cotton

- Ce graphique montre le coefficient S11 de l'antenne du cotton, avec un meilleur pic de (-53.048) dB près de la fréquence de 2.45 GHz dans la courbe optimisée. Cela indique une bonne correspondance entre l'antenne et la fréquence de fonctionnement souhaitée, par contre le coefficient de réflexion d'antenne imprimée initiale est très faible.

La figure ci-dessous présente le gain du patch en 3D et le diagramme de rayonnement optimisé d'antenne en 2D :

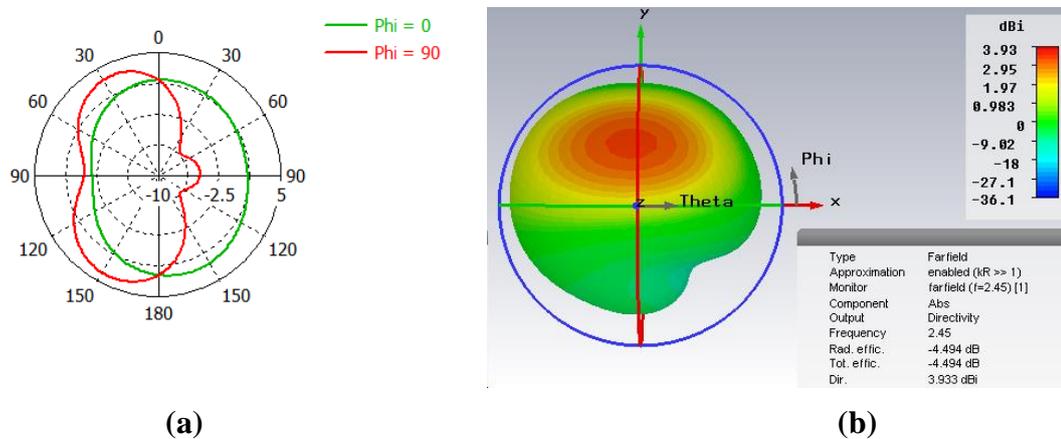
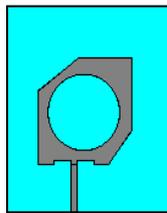


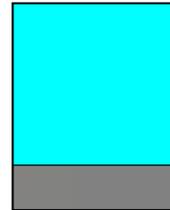
Figure II.10. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du cotton proposée

- Dans la Figure II.10. (b) qui représente le gain du patch de cotton, on remarque que le gain de l'antenne proposée est égal à 3.93 dB à la fréquence 2.45 GHz. Il est toujours positif avec un lobe principal du rayonnement à une magnitude de 3.87 dB et il est dirigé vers 79 degrés dans la Figure II.10. (a).

II.6.3.1.2 Substrat djeans



(a) Vue de face



(b) Vue arrière

Figure II.11. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de djeans

Le graphique suivant dans la figure II.12 représente le coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence pour d'antenne optimisée de djeans :

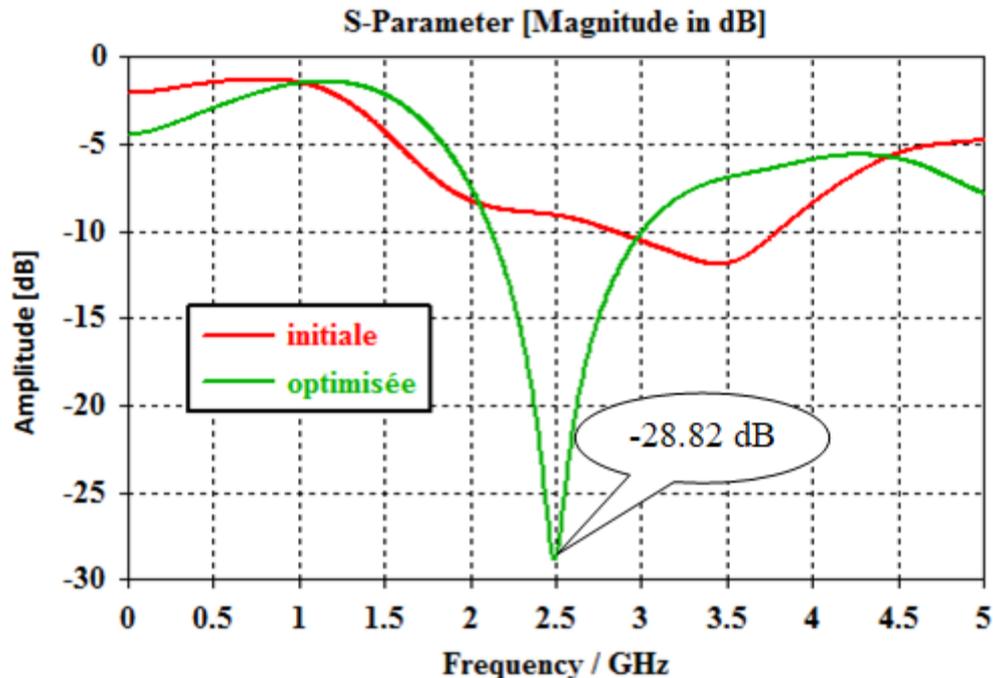


Figure II.12. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de djeans

- Dans le deuxième graphique du substrat djeans, lorsque on a ajouté une fente au milieu du patch optimisée et deux encoches dans le haut et le bas du notre patch, le coefficient S11 est de (-28.82) dB, et la fréquence de résonance augmente à 2.49 GHz. On compare avec le coefficient S11 et la structure initiale d'antenne ; cela signifie que les fentes de l'antenne améliorer légèrement la réponse fréquence de l'antenne.

La figure ci-dessous présente le gain du patch en 3D et le diagramme de rayonnement optimisé d'antenne en 2D :

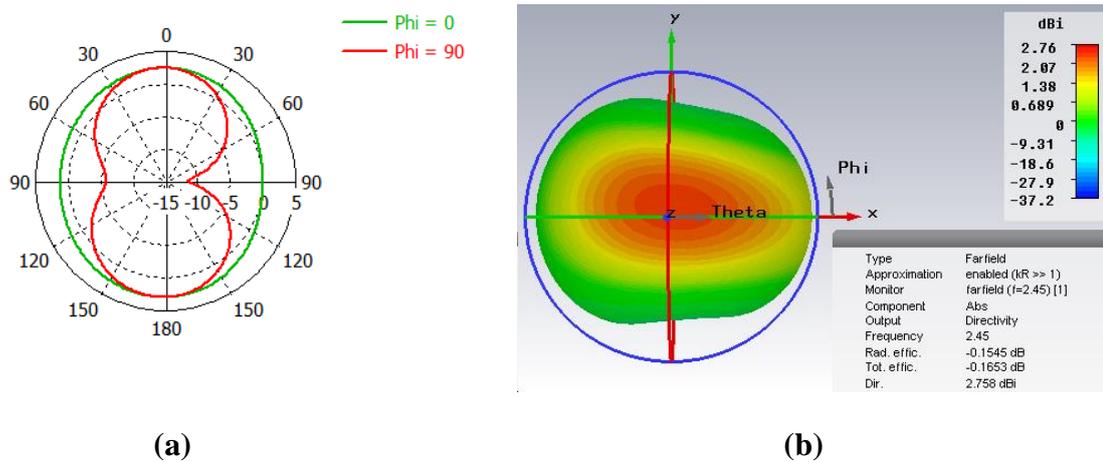
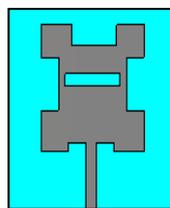


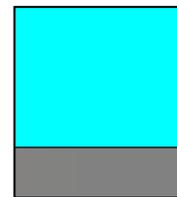
Figure II.13.Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du djeans proposée

- La Figure II.13. (b) montre un gain de 2.76 dB de type substrat de djeans dans la fréquence 2.45 GHz, avec une magnitude de 2.74 dB vers l'angle de 87.1 degrés qui est illustré dans la Figure II.13. (a).

II.6.3.1.3 Substrat nylon



(a) Vue de face



(b) Vue arrière

Figure II.14. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de nylon

Le graphique suivant dans la Figure II.15 représente le coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence pour d'antenne optimisée de nylon :

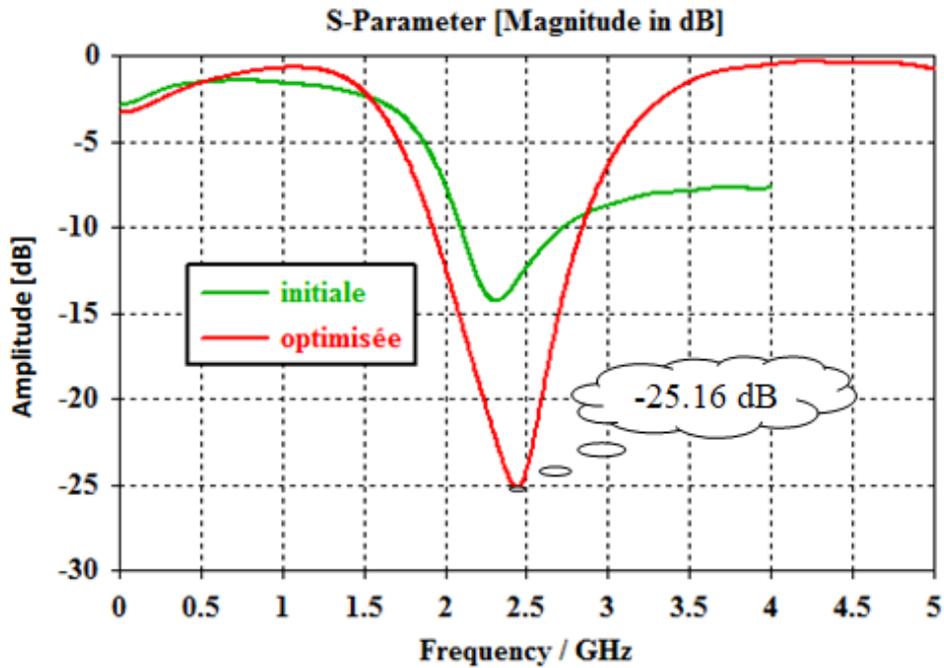


Figure II.15. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de nylon

- Dans le troisième graphique de nylon, l'antenne conçue est simulée au cours de ce travail comporte trois encoches positionnées à la partie supérieure et de côté gauche et droite du patch et deux autres de bas du patch collés avec la ligne d'alimentation, avec une fente de forme rectangulaire au centre de notre patch. Le coefficient de réflexion S11 est de (-25.16) dB, à cause de la fréquence qui a diminué à 2.44 GHz.

La figure ci-dessous présente le gain du patch en 3D et le diagramme de rayonnement optimisé d'antenne en 2D :

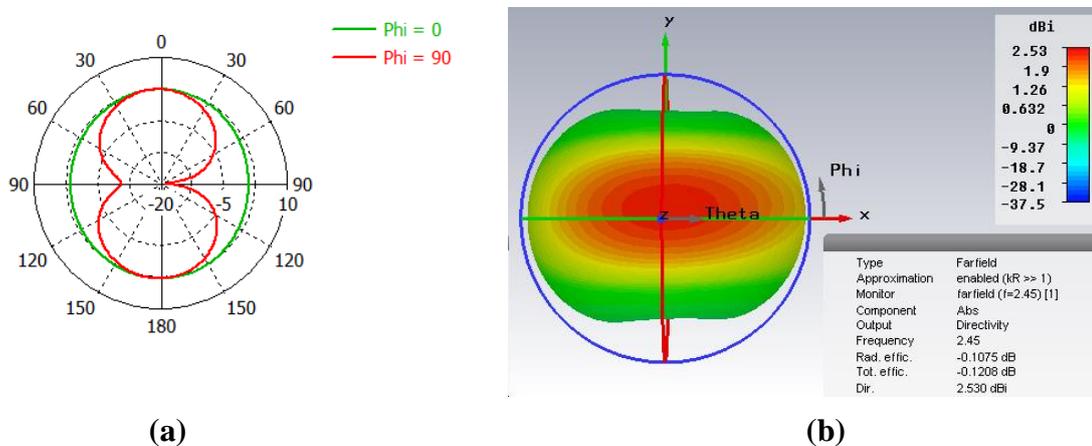


Figure II.16. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du nylon proposée

- La Figure II.16. (b) montre le gain réalisé aux bandes de fréquences de fonctionnement pour l'antenne proposée de nylon qui diminue jusqu'à -2.53 dB toujours dans la même fréquence de 2.45 GHz vers 82.7 degrés avec un lobe principal de magnitude de 2.52 dB qui est représenté dans la Figure II.16. (a).

II.6.3.1.4 Substrat polyester



Figure II.17. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de polyester

Le graphique suivant dans la Figure II.18 représente le coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence pour l'antenne optimisée de polyester :

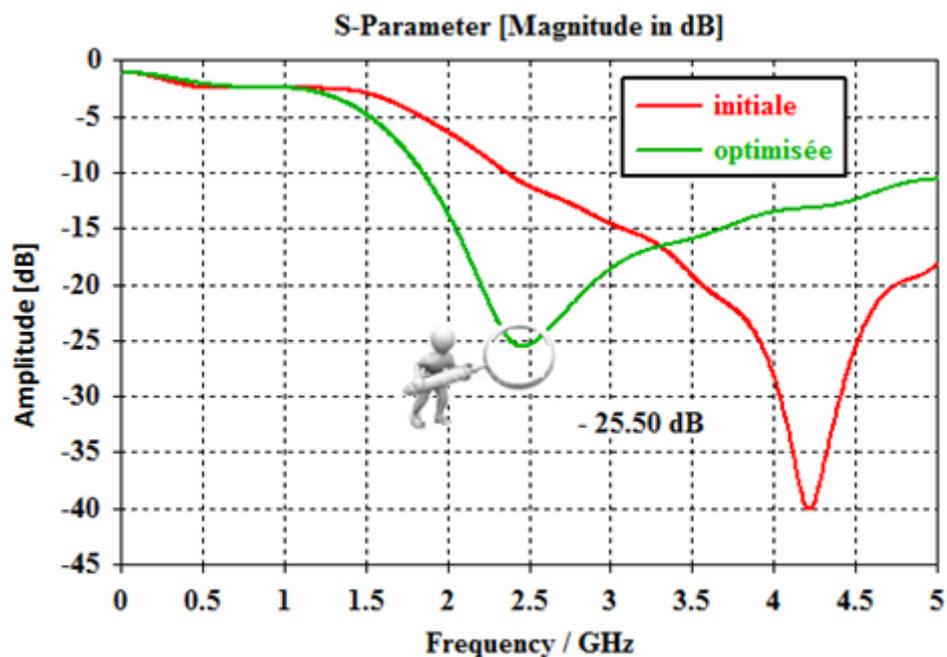


Figure II.18. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de polyester

- Dans le quatrième graphique de polyester, on a utilisé une simple structure de l'antenne sans fentes et sans encoches. Le coefficient de réflexion S11 est de (-25.50) dB, avec une fréquence de résonance à 2.46 GHz.

La figure ci-dessous présente le gain du patch en 3D et le diagramme de rayonnement optimisé d'antenne en 2D :

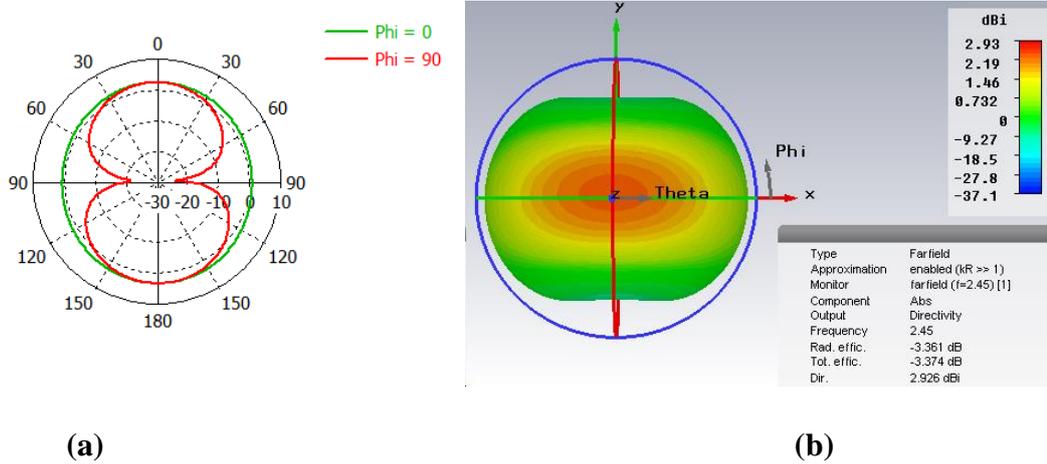


Figure II.19.Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du polyester proposée

- Dans la Figure II.19. (b) représentante le gain du patch de polyester, notre gain est de valeur 2.92 dB et une magnitude 2.93 dB dans la Figure II.19. (a) avec l'angle de 85 degrés, à une fréquence de 2.45 GHz de l'antenne miniature.

II.6.3.1.5 Substrat silicone



Figure II.20. Structure de l'antenne rectangulaire optimisée de silicone

Le graphique suivant dans la Figure II.21 représente le coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence pour d'antenne optimisée de silicone :

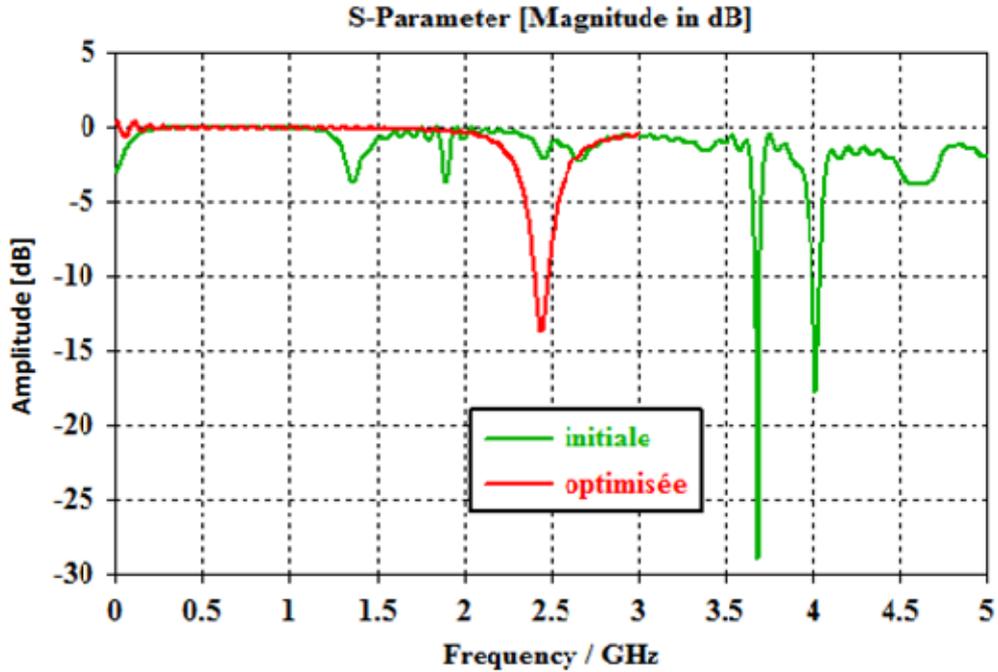


Figure II.21. Coefficient de réflexion S11 d'antenne proposée de silicone

- Enfin, dans le cinquième graphique de silicone, l'antenne est placée de manière très simple de la structure. La fréquence de résonance est de 2.449 GHz et la valeur du coefficient S11 passe à (-13.74) dB. Cela indique que la présence de la taille de l'antenne modifie davantage la réponse en fréquence de l'antenne.

La figure ci-dessous présente le gain du patch en 3D et le diagramme de rayonnement optimisé d'antenne en 2D :

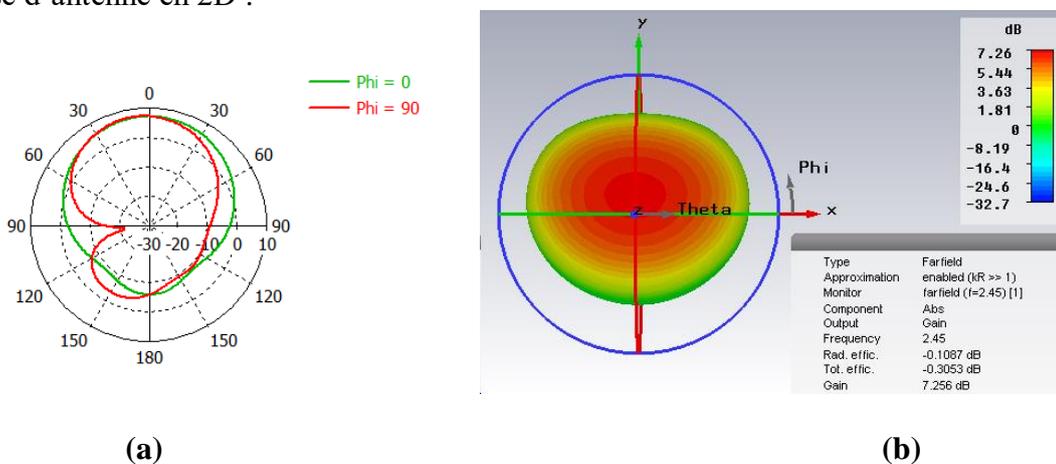


Figure II.22. Diagrammes de rayonnement 2D et 3D simulés à 2,45 GHz du silicone proposée

- La Figure II.22. (a) montre le diagramme de rayonnement 2D simulés. La Figure II.22. (b) représente le gain de l'antenne optimisée de silicone en 3D. On observe à partir de ces figures que le rayonnement diffère dans le plan de rayonnement. Par conséquent, l'antenne proposée a de bonnes caractéristiques de rayonnement avec un gain acceptable. En effet, nous observons un gain de 7.26 dB à 2.4 GHz pour la structure miniature, et un lobe du rayonnement à une magnitude de 7.27 dB vers l'angle 69.6 degrés. Néanmoins, ce résultat reste très acceptable.

On conclure que :

- ✚ La représentation graphique du diagramme de rayonnement simulé d'une antenne imprimée et le gain du patch optimisé est représentée dans cette simulation avec des différents substrats souples. Elle indique que l'antenne émet une puissance maximale de rayonnement dans deux directions opposées. Après adaptation du réseau d'antenne on a obtenu un meilleur gain grâce au type de substrat qu'on a utilisé.

II.6.4 Etude comparatif entre les coefficients de réflexions

La figure ci-dessous représente la comparaison du coefficient de réflexion d'antenne imprimée proposée par rapport à la fréquence :

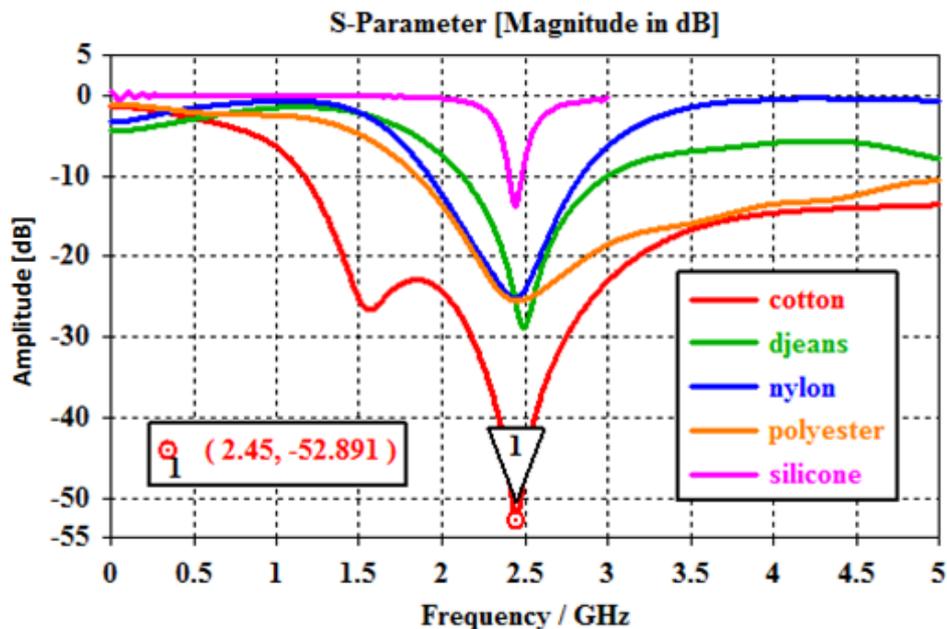


Figure II.23. Le coefficient de réflexion d'antenne optimisée

Les cinq graphiques présentent le coefficient de réflexion simulé en fonction de la fréquence pour différentes configurations d'antenne optimisée :

Ces résultats de simulation indiquent clairement que la présence des fentes, des encoches à proximité de l'antenne entraîne des changements significatifs dans les caractéristiques de réflexion S11 et finalement dans la fréquence de bande. Ces variations peuvent être attribuées aux propriétés diélectriques du type de tissu de substrats, ainsi qu'à l'interaction entre l'antenne et ces structures.

D'après la conception d'une antenne imprimée proposée sur substrat de type coton, djéans, nylon, polyester et silicone, on résume les résultats de simulations dans le tableau suivant :

Résultats de simulation des antennes imprimées					
Les substrats flexibles	Fréquence (GHz)	Coefficient de réflexion (dB)	Bande passante	VSWR	Gain
Coton	2.45	-53.04	[2.18 – 2.75]	1	3.93
Djean	2.45	-28.82	[2.12 – 3]	1.10	2.76
Nylon	2.45	-25.16	[1.92 – 2.84]	1.11	2.53
Polyester	2.45	-25.50	[2.20 – 2.78]	1.11	2.93
Silicone	2.45	-13.74	[2.40 – 2.48]	1.53	7.26

Tableau II.4. Les résultats de simulation obtenus des antennes proposées avec les différents types de substrats flexibles.

II.7 Conclusion

Ce chapitre est une représentation de la conception et la simulation des antennes patch alimentées par une ligne micro ruban ; par le logiciel CST. Nous avons conclu que :

- la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à ces paramètres (longueur L, largeur W et l'épaisseur H du patch).
- L'épaisseur du substrat, le choix du type d'alimentation, le choix de type du substrat la position de la ligne d'alimentation (soit le câble coaxial, soit la ligne micro ruban) influent considérablement sur les performances de l'antenne (coefficient de réflexion, bande passante et le rayonnement).
- L'augmentation de la constante diélectrique se traduit par la diminution de fréquence de résonance et la bande ISM.

Références bibliographiques

- [1] FRANCIS, LAURENT, DJENIZIAN, THIERRY, TESSIER, PIERRE-YVES Professeur, et la contribution au développement de procédés micro technologiques pour l'élaboration d'électronique multi supports.
- [2] DUFAY, THIBAUT. Etude de couches minces piézoélectriques flexibles pour la récupération d'énergie vibratoire. 2017. Thèse de doctorat. Nantes.
- [3] DE MULATIER, SÉVERINE. Study and development of integration technology for robust, ultra-thin and imperceptible wearable medical devices. 2020. Thèse de doctorat. Lyon.
- [4] LE DRUILLENNEC, Marie. Etude des mécanismes d'endommagement de films minces métalliques déposés sur substrats souples pour l'électronique flexible. 2017. Thèse de doctorat. Université GRENOBLE ALPES.
- [5] MAHATO, PRABIR. Study and development of resistive memories for flexible electronic applications. 2020. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- [6] OGBEMUDIA, FELIX OKPAKO et AYODELE, SAMI MICHAEL. Course Writer/Developer: ADAMS, ABIODUN E. National Open University of Nigeria Abuja.
- [7] CAILL-MILLY, NATHALIE. De la collecte des données à l'appropriation des résultats par les utilisateurs-Contribution à l'amélioration des connaissances sur les ressources exploitées et d'intérêt pour les navires de Nouvelle-Aquitaine. 2023.
- [8] DIA, PAPE ALIOUNE. Conception d'une carte électronique «LOW-COST» de monitoring de systèmes photovoltaïques. 2021.

- [9] GIRARD, Gautier. Caractérisation et modélisation thermomécaniques de matériaux et de structures circuits imprimés complexes destinés aux applications spatiales radiofréquences et micro-ondes. 2018. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [10] BENSEBAA, SAID. Etude de la Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans un circuit imprimé PCB. 2022. Thèse de doctorat. Université PARIS-SACLAY

Chapitre03 :

**L'application de la
technologie**

**WEARABLE dans le
domaine des
applications IoT**

III.1 Introduction

L'avènement de l'Internet des Objets (IoT) a révolutionné la manière dont les objets interagissent avec le monde qui les entoure. Cette convergence entre le monde physique et numérique a ouvert de vastes horizons pour les technologies portables. Parmi ces avancées, les antennes portables jouent un rôle essentiel en permettant la connectivité sans fil des dispositifs IoT. Dans ce chapitre, nous explorerons les applications innovantes des antennes portables dans le domaine de l'IoT, mettant en lumière leur impact sur divers secteurs et les défis à surmonter pour leur déploiement à grande échelle. Les antennes portables pour l'IoT (Internet des objets) sont essentielles pour la connectivité des appareils. Elles permettent la transmission de données sans fil entre les objets et les réseaux, favorisant ainsi l'interconnexion des dispositifs intelligents. Ces antennes, telles que celles en céramique ou les antennes MID, offrent des solutions compactes et flexibles pour les terminaux mobiles, contribuant à l'évolution des réseaux 5G et à l'optimisation des communications sans fil dans le domaine de l'IoT[1].

III.2 L'IoT et l'évolution des communications sans fil centrées sur le corps

L'internet des Objets (IoT) et les communications sans fil centrées sur le corps sont des domaines passionnants qui transforment notre manière d'interagir avec la technologie. L'IoT permet aux objets du quotidien de se connecter et de communiquer entre eux, tandis que les communications sans fil centrées sur le corps offrent des possibilités de transmission de données plus discrètes et plus intégrées à notre vie quotidienne. Ensemble, ces technologies ouvrent la voie à un avenir où les appareils seront plus connectés que jamais et où les interactions avec la technologie seront encore plus fluides et transparentes. Divers types de liaisons sont donc possibles (Figure III.1), ainsi ils peuvent se faire de 3 façons :

- (1) **Liaisons dans le corps:** distinguent à un dispositif intégré dans les tissus d'échanger les informations avec un autre implanté sur le corps ou à proximité.
- (2) **Liaisons sur le corps :** caractérisent les échanges entre des dispositifs situés en surface du corps humain.
- (3) **Liaisons de corps :** permettent les communications entre un dispositif situées sur le corps et un dispositif localisé dans un rayon de quelques mètres (< 10 m) du corps humain, comme

par exemple une station de base, un PC ou un autre utilisateur [2].

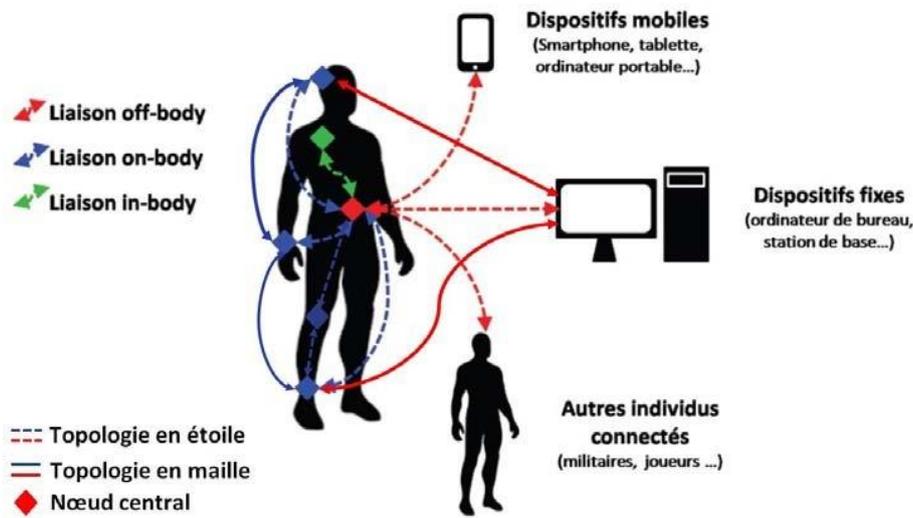


Figure III.1. Concept des liaisons des communications possibles entre dispositifs BAN [3]

III.2.1 Applications du futur Internet des vêtements intelligents

Les dispositifs portables modernes offrent de nombreuses possibilités pour améliorer la qualité de vie via des services personnalisés basés sur les données. Avec leur intelligence intégrée, leur connectivité fluide et leur facilité d'utilisation accrue, ils permettent de surveiller des activités, d'aider à la prise de décision, de gérer des connaissances, de détecter et suivre des événements, et de fournir une assistance virtuelle. Récemment, des recherches ont porté sur l'incorporation de fonctions électroniques dans les textiles (e-textiles), créant des matériaux intelligents capables d'exécuter diverses fonctions. Quelques études ont exploré l'intégration des vêtements intelligents dans l'Internet des objets. Les sections suivantes présentent des exemples de vêtements intelligents, compatibles ou non avec l'IoT, qui pourraient être intégrés dans un futur Internet des vêtements [4].

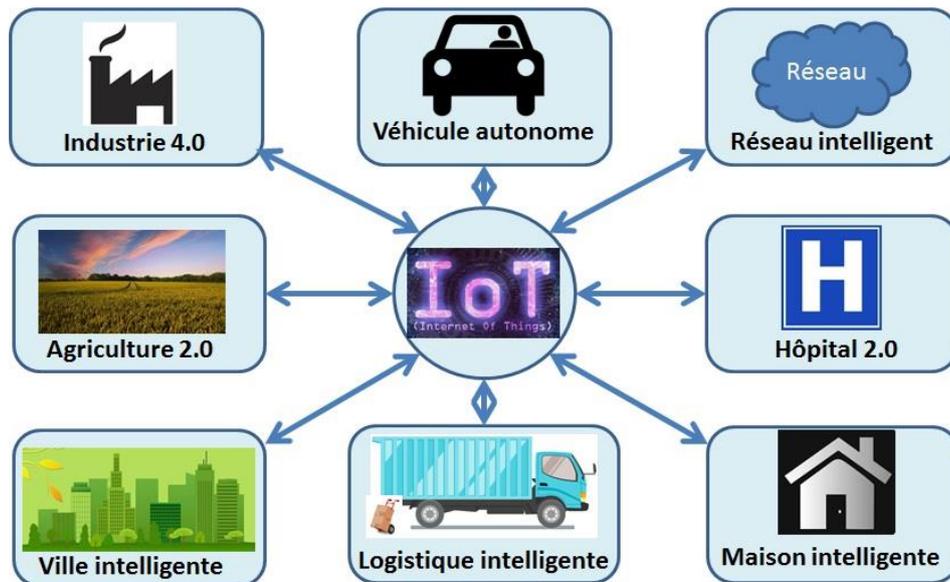


Figure III.2. Les scénarios prometteurs pour les objets connectés et les vêtements basés sur l'IoT [5]

III.2.2 Applications commerciales

Les appareils portables comme les trackers de fitness et les montres intelligentes sont de plus en plus populaires, mais de nombreux autres dispositifs sont également disponibles ou en développement, tels que les patchs intelligents, les casques, les exosquelettes, les bijoux intelligents et les textiles intelligents. Ces derniers, présents sur le marché depuis la fin des années 2000, ont des applications variées : aider les personnes malvoyantes, assister dans la perte de poids, optimiser les programmes d'entraînement, améliorer la gestion des maladies chroniques, surveiller les bébés, contrôler des objets via l'Internet des objets, fournir un retour haptique émotionnel, et détecter le cancer. Des entreprises et projets artistiques innovent également dans ce domaine. Les sections suivantes analysent les résultats d'études universitaires récentes dans ces divers domaines [6].

III.2.3 Développement académique

Le développement académique des vêtements intelligents se concentre sur la recherche et l'innovation technologique pour exploiter pleinement leur potentiel dans divers domaines. Les universités et les centres de recherche investissent dans des études interdisciplinaires qui combinent l'ingénierie, les sciences des matériaux, l'informatique, et les sciences de la santé pour concevoir des textiles intelligents. Les chercheurs explorent des matériaux conducteurs

Chapitre 03 : L'application de la technologie WEARABLE dans le domaine des applications IoT

et des capteurs intégrés qui sont à la fois flexibles et durables, permettant des applications pratiques et confortables [7].

III.2.3.1 Domaine de la santé :

Les WEARABLES jouent un rôle crucial dans la surveillance de la santé pour surveiller des paramètres vitaux comme la fréquence cardiaque, la température corporelle et la saturation en oxygène, avec des applications potentielles pour la télémédecine et la gestion des maladies chroniques. Les programmes académiques collaborent souvent avec des entreprises technologiques pour tester et commercialiser ces innovations.

III.2.3.2 Sport et performance :

Les recherches se penchent sur l'analyse des données de mouvement et de biomécanique, visant à améliorer les performances des athlètes et prévenir les blessures. Des collaborations avec des équipes sportives et des organisations permettent de tester les vêtements intelligents dans des environnements réels.

III.2.3.3 Mode et textile :

Les études se concentrent sur les vêtements interactifs qui peuvent changer de couleur, de forme ou afficher des informations grâce à des technologies embarquées. Cela inclut des travaux sur les circuits électroniques imprimés et les textiles électroniques.

III.2.3.4 La sécurité et de la protection :

Les recherches visent à développer des vêtements pour les travailleurs de l'industrie et les premiers intervenants, avec des capteurs capables de détecter les conditions environnementales dangereuses et de fournir des alertes en temps réel.

III.2.3.5 L'éducation et la formation :

Bénéficient des recherches sur les vêtements intelligents pour des applications comme les simulateurs de réalité augmentée et les uniformes scolaires intelligents qui améliorent la sécurité et le suivi des étudiants.

Ce développement académique est soutenu par des publications dans des revues scientifiques, des conférences internationales et des partenariats avec l'industrie, contribuant à une avancée continue dans le domaine des vêtements intelligents [7].

III.3 Fonctionnement des antennes portables pour l'IoT

Les antennes portables pour l'IoT fonctionnent en permettant la communication sans fil entre les appareils connectés et les réseaux. Elles sont essentielles pour la collecte, la transmission et la réception des données. Ces antennes, comme les antennes hélicoïdales compactes, sont adaptées aux équipements portables, tandis que les antennes à fente conviennent aux boîtiers métalliques. Le choix de l'antenne dépend de la taille de l'appareil et de l'application spécifique, influençant ainsi les performances sans fil [8].



Figure III.3. Fonctionnement d'Internet des objets [9]

III.4 Les solutions IoT du marché

Le marché de l'IoT a longtemps été totalement hétérogène, avec uniquement des solutions propriétaires. Mais depuis quelques années, plusieurs standards de communication et de solutions clé en main ont vu le jour, ce qui donne aux entreprises un large éventail de solutions pour répondre à leurs besoins. Tout cela a été rendu possible grâce au progrès fait sur des technologies et des concepts :

- **L'Intelligence artificiel et le Machine Learning** : on est maintenant capable de développer des systèmes intelligents proches du raisonnement humain, capables de s'adapter à leur environnement et d'apprendre au fil du temps.
- **L'analyse de données** : il existe sur le marché des systèmes capables de lire, analyser et traiter des millions d'informations en temps réel.
- **Les protocoles de communication** : est l'une des composantes essentielles de l'IoT. Que ce soit entre des objets connectés, avec un système central ou avec du Edge, le choix du ou des protocoles de communication qui seront utilisés est très important.

Plusieurs solutions existent sur le marché :

- **Ethernet** : dans cette solution, les objets sont connectés physiquement au réseau interne. Elle est très peu utilisée en raison de la complexité de sa mise en place avec un grand nombre d'objets et surtout à cause des restrictions géographiques qu'elle impose.
- **Wifi** : avec une portée plus large (une centaine de mètres), cette solution n'impose aucune connexion physique et facilite le déploiement sur un périmètre plus ou moins étendu.
- **4G/5G** : solution avec une couverture presque mondiale. Les objets peuvent être connectés pratiquement n'importe où dans le monde et communiquer sans problème avec les systèmes centraux.
- **LR-WPANs** : Low-rate wireless personal area networks est un protocole de communication standardisé spécialement conçu pour l'IoT. Il existe plusieurs implémentations de ce standard comme Zigbee, MiWi ou 6LoWPAN basé sur l'IPv6.
- **Z-Wave** : protocole très utilisé dans la domotique, avec un périmètre assez large pour couvrir une maison.
- **LoRa** : protocole de réseau destiné aux objets connectés fonctionnant sur batterie dans un réseau régional, national ou mondial [10].

III.6 Antenne patch Multi-bande pour les applications IoT

L'antenne patch multi-bande est devenue essentielle pour les applications IoT en raison de sa capacité à fonctionner sur plusieurs fréquences tout en conservant une taille compacte. Ces antennes sont généralement fabriquées en utilisant des substrats diélectriques sur lesquels des conducteurs métalliques sont imprimés, formant ainsi des motifs de patches résonants. La conception multi-bande permet à une seule antenne de communiquer à travers différents protocoles et réseaux IoT, Grâce à leur faible profil et leur facilité d'intégration dans des dispositifs compacts, elles sont idéales pour les capteurs intelligents, les dispositifs portables et les systèmes de maison intelligente. De plus, les techniques de conception avancées, telles que l'utilisation de slots, de formes fractales, et de matériaux composites, permettent d'optimiser la performance sur plusieurs bandes tout en minimisant les interférences. Cela en fait un choix privilégié pour les développeurs cherchant à maximiser la connectivité et l'efficacité des dispositifs IoT.

III.7 Validation du Substrat

Les matériaux textiles présentent une plage de valeurs de permittivité assez étroite, leur épaisseur est donc primordiale dans la conception des antennes. Pour une permittivité relative fixe, l'épaisseur du substrat peut être choisie pour augmenter la largeur la bande passante de l'antenne imprimée. En revanche, cette valeur peut ne pas optimiser l'efficacité de l'antenne. Par conséquent, le choix de l'épaisseur du matériau diélectrique est un compromis entre efficacité et bande passante de l'antenne [11].

Généralement, Les pertes conductrices sont directement proportionnelles à la hauteur du substrat et les pertes de rayonnement sont inversement proportionnelles à la hauteur du substrat. Par conséquent, lorsque la hauteur diélectrique du substrat augmente, la largeur de bande de l'antenne augmente également, au même temps, les pertes conductrices augmentent également et lorsque la hauteur du substrat diminue, la perte de rayonnement devient importante. Plus le substrat est fin, plus la bande passante est étroite, plus le substrat est épais et plus la bande passante est large. Par conséquent, on a limité notre choix sur le type de substrat « Feutrine », on donne le cahier de charge du Feutrine dans le tableau suivant :

Substrat	ϵ_r	Tang (d)	H	ϵ_{eff}
Feutrine	1.22	0.016	2	1.26

Tableau III.1. Les paramètres de performance de substrat feutrine.

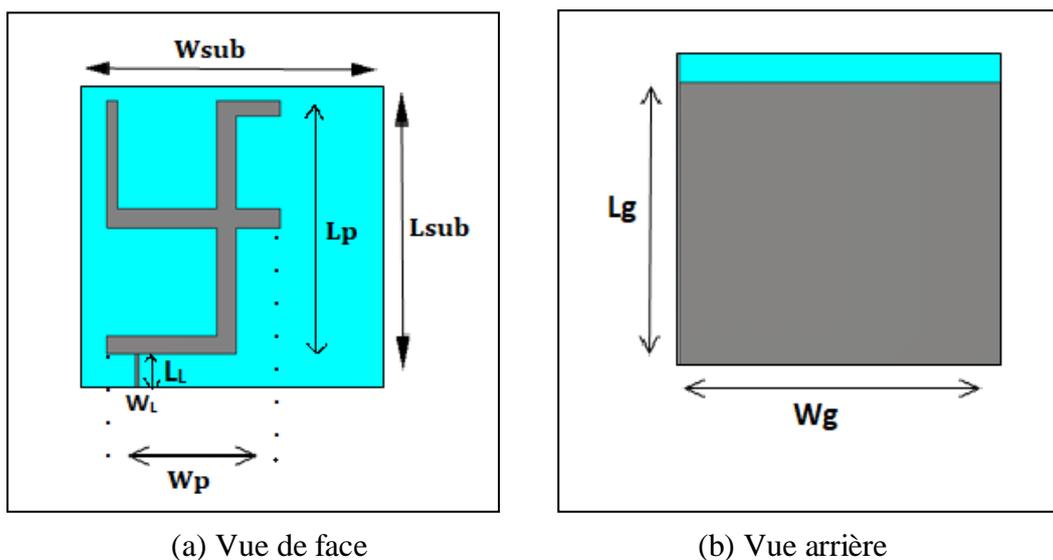


Figure III.4. Structure d'antenne patch proposée

Chapitre 03 : L'application de la technologie WEARABLE dans le domaine des applications IoT

Le patch a été modélisé sur un substrat de feutrine pour simuler l'antenne conçue dans la Figure III.4 en ajustant les paramètres géométriques et les valeurs optimisées de l'antenne proposée sont listées dans le tableau III.2. Les dimensions d'antenne, sont calculées à partir des équations de dimensionnement de l'antenne patch rectangulaire, les équations sont citées dans le chapitre I de ce mémoire.

Paramètres	Signification	Valeur
W_{sub}	La largeur de substrat	87 mm
L_{sub}	La longueur de substrat	86 mm
H_{sub}	Epaisseur de substrat	2 mm
L_g	La longueur de plane de masse	46 mm
W_g	La largeur de plane de masse	87 mm
L_P	La longueur de patch	71.36 mm
W_P	La largeur de patch	51 mm
H_P	Epaisseur de patch	2.07
W_L	La largeur de la ligne d'alimentation	1 mm
L_L	La longueur de la ligne d'alimentation	10.54 mm

Tableau III.2. Dimensions de l'antenne flexible proposée

III.8 Résultats et simulations

Plusieurs logiciels commerciaux sont utilisés pour simuler le comportement des structures imprimées et étudier leurs performances. Parmi ces logiciels on peut citer le logiciel CST qu'on a utilisée pour notre simulation :

III.8.1 Coefficient de réflexion S [11]

Le tracé du coefficient de réflexion simulé, pour la gamme de fréquences de 0 GHz à 5 GHz, est illustré à la Figure III.5 :

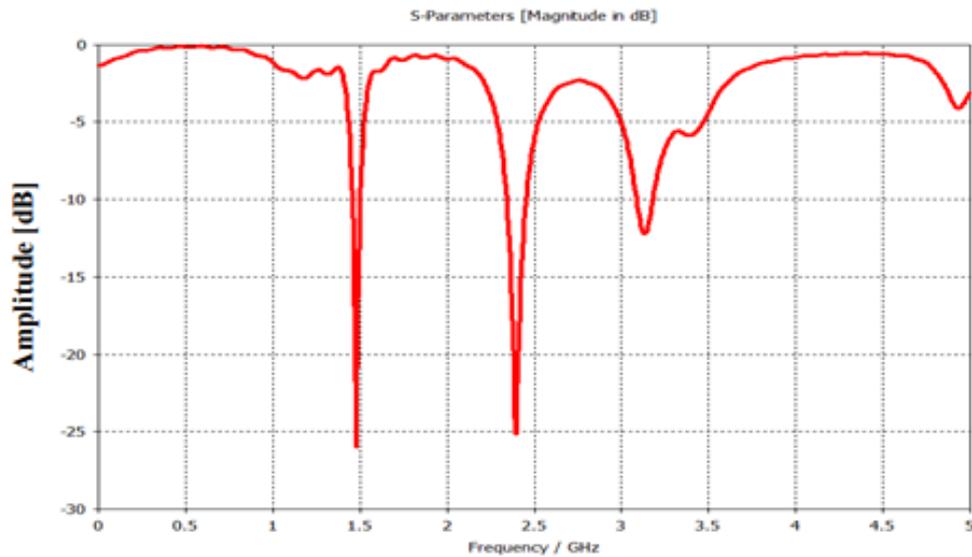


Figure III.5.Le coefficient de réflexion S11 d'antenne tri-bande proposée

Nous remarquons d'après les résultats de l'étude paramétrique que notre antenne présente trois coefficients de réflexions de [-26 ; -25 et -12] dB, pour des fréquences avoisinant les trois bandes [1,49 ; 2,45 et 3,12] GHz respectivement. On peut également remarquer que l'antenne présente une bonne caractéristique d'adaptation d'impédance à l'intérieur des trois bandes de résonance. Pour la première fréquence 1.48 GHz, l'antenne couvre des fréquences de 1,48 GHz à 1,51 GHz avec une bande passante de 30 MHz. La bande passante autour de la deuxième fréquence 2,45 GHz est d'environ 140MHz (de 2,35 à 2,49 GHz). La troisième résonance 3,12 GHz, l'antenne couvre des fréquences de 3,1 GHz à 3,9 GHz avec une bande passante de 800 MHz. Les résultats simulés répondent bien aux exigences en bande passante pour les applications IoT. Les résultats mesurés et simulés montrent une bonne concordance pour les trois bandes de fréquences de fonctionnement, c'est une antenne tri-bande.

III.8.2 Le taux d'onde stationnaire VSWR

La Figure III.6 représente le taux d'onde stationnaire d'antenne tri-bande proposée :

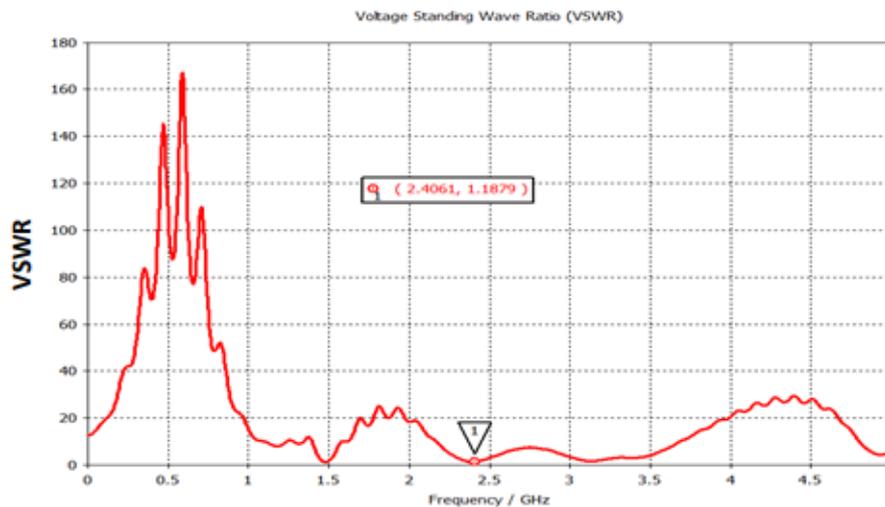


Figure III.6. Le taux d'onde stationnaire d'antenne tri-bande proposée

On constate que le diagramme du taux d'onde stationnaire VSWR est compris entre 1 et 2 ce qui montre un bon résultat de rayonnement de l'antenne. Donc le résultat obtenu est correct et aux normes dans les trois fréquences.

III.8.3 Diagramme de rayonnement (gain et directivité) d'antenne proposée

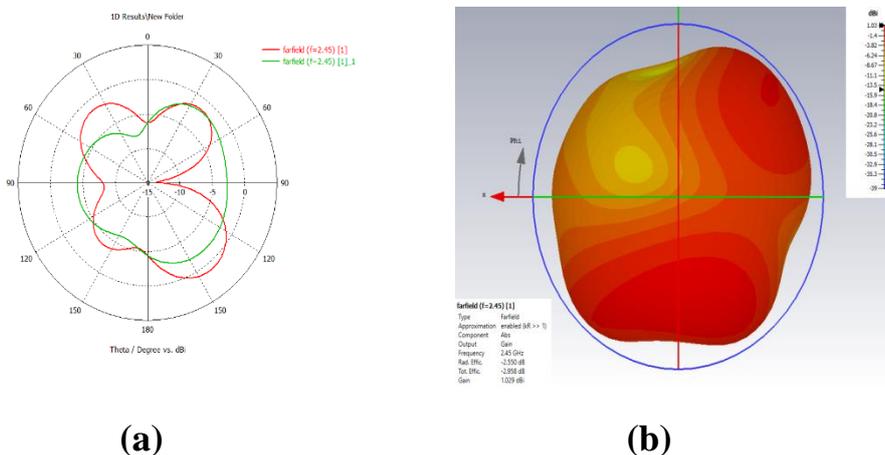


Figure III.7. (a) Le gain d'antenne proposée **(b).** Le diagramme d'antenne proposée

Nous remarquons que le diagramme de rayonnement d'antenne tri-bande proposée présente un gain de 1,029 dB pour la fréquence 2,45 GHz il présente un rayonnement presque omnidirectionnel dans le demi plan au-dessus du plan de masse (polarisation vers la verticale). A partir de cette Figure III.7, on peut noter que le gain est positif.

III.9 Conclusion

L'application de la technologie WEARABLE dans le domaine des applications IoT offre des opportunités significatives pour améliorer divers aspects de la vie humaine. Bien que des défis subsistent, les progrès technologiques et les efforts de standardisation continueront à favoriser une adoption accrue et à maximiser les bénéfices pour les utilisateurs. Cette convergence technologique promet un avenir où les données personnelles et environnementales peuvent être utilisées de manière plus efficace et sécurisée, transformant ainsi notre interaction avec le monde numérique.

Références bibliographiques

- [1] BOUHAÏ, N., & Saleh, I. (2017). Internet des objets: Évolutions et Innovations. ISTE Group.
- [2] GUIGA, T. (2021). Authentification transparente dans un environnement numérique ubiquitaire (Doctoral dissertation, Normandie).
- [3] https://www.researchgate.net/figure/Vue-schematique-dun-reseau-BAN-pour-les-communications-In-body-Onbody-et-Off-body-7_fig1_328353254
- [4] CHEMCHAM, R., KHENIEN, M., &BOUKABOU, A. E. (2023). Etude et réalisation d'une console de commande de tapis de course sportif (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [5] <https://moodle.luniversitenumérique.fr/mod/page/view.php?id=1493>
- [6] EL MAY, Wissem. Développement d'antennes textiles pour des applications IoT. 2021. Thèse de doctorat. Université Côte d'Azur; Université de Tunis El Manar.
- [7] DE L'ÉTHIQUE, N. C. PASCAL FERREN. L'hybridation des mondes, 157.
- [8] GRIFFON, M., MAUGET, C., GUYOT, C., SPOTO, E., MOREL, V., & YANG, P. Internet des objets pour la smartcity.
- [9] https://blog.cellenza.com/wp-content/uploads/2021/07/Schema_IoT-scaled-1-e1654420581844.jpg.
- [10] HELLUY-LAFONT, Étienne. Sécurité et détection d'intrusion dans les réseaux sans fil. 2021. Thèse de doctorat. Université de Lille.
- [11] Hertleer, C.; Laere, A.V.; Rogier, H.; Langenhove, L.V. Influence of Relative Humidity on Textile Antenna Performance. Text. Res. J. 2009, 80, 177–183.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de fin d'étude, la conception d'antennes flexibles pour les vêtements intelligents ouvre de vastes horizons dans le domaine des technologies portables, fusionnant l'innovation technique avec la fonctionnalité esthétique. Cette convergence offre des solutions novatrices pour répondre aux besoins croissants de connectivité tout en intégrant harmonieusement la technologie dans notre vie quotidienne. Cette conclusion générale explore les principaux aspects de la conception d'antennes flexibles pour les vêtements intelligents, examine les défis rencontrés et offre une vision prospective de l'avenir de ce domaine.

Le premier chapitre a fait l'objet d'une étude approfondie de l'antenne patch. Ainsi, le principe de fonctionnement, la conception et les caractéristiques de l'antenne et les différents types d'alimentation sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, était consacrée à une étude comparative entre les différents substrats flexibles de l'antenne patch micro ruban pour les applications dans la bande ISM. Les résultats de simulation obtenus, sous le logiciel CST, les résultats de simulations obtenus sont satisfaisants et acceptables et ont montrés une nette amélioration sur les performances de l'antenne étudiée (adaptation, directivité, S11, gain et taux d'ondes stationnaire VSWR...).

Le troisième chapitre, a été consacré à la conception d'antennes imprimées portables destinées aux applications IoT. Elle présente la procédure complète de conception d'antennes imprimées portables, incluant le concept des liaisons des communications possibles entre dispositifs, et le fonctionnement des antennes portables pour l'IoT. Les antennes textiles sont de taille réduite et ont un diagramme de rayonnement omnidirectionnel avec un gain moyen d'environ 1.029 dB.

En conclusion, la conception d'antennes flexibles pour les vêtements intelligents représente une avancée significative dans le domaine des technologies portables. Elle ouvre la voie à une nouvelle ère d'innovation, offrant des solutions élégantes et fonctionnelles pour intégrer la connectivité dans notre vie quotidienne. Alors que nous avançons vers l'avenir, il est essentiel de continuer à repousser les limites de la technologie, à explorer de nouvelles possibilités et à collaborer pour créer des vêtements intelligents qui améliorent véritablement notre qualité de vie et notre bien-être.

PERSPECTIVES

L'avenir de la conception des antennes flexibles pour les vêtements intelligents promet des avancées significatives grâce à l'utilisation de matériaux de nouvelle génération comme les nanomatériaux et les polymères conducteurs, offrant flexibilité et durabilité accrues. Les techniques de fabrication évolueront avec l'impression 3D et 4D, permettant des antennes adaptatives qui s'ajustent aux mouvements du corps, ainsi que la broderie électronique pour des motifs précis et esthétiques. Les antennes multifonctionnelles intégreront des capteurs et des dispositifs d'énergie, élargissant les applications dans la santé, la sécurité, la mode et le divertissement. Cependant, pour assurer leur adoption à grande échelle, il sera crucial de développer des normes de sécurité et de recyclage tout en rendant ces technologies plus abordables. Les vêtements intelligents deviendront ainsi des outils indispensables dans notre quotidien, transformant notre interaction avec la technologie portable.