

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département D'Électronique



Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion
Photovoltaïque (LDCCP)

THÈSE DE DOCTORAT

en : **Électronique**

Option : **Électronique des Systèmes de Télécommunications**

Intitulé

Conception d'antennes pour vêtements communicants

Présenté par :

BOUAZA Abdelmaoula

*Présentée et soutenue publiquement le 11 Novembre 2025,
devant le Jury composé de :*

Adel Belouchrani	Professeur, ENP	Président
Rachida Touhami	Professeur, ENP	Directrice de Thèse
Smail Tedjini	Professeur, INP-Grenoble	Co-directeur de Thèse
Sami Hebib	Professeur, Université de Blida 1	Examineur
Amine Moukraoui	MCA, ENP	Examineur
Benmahmoud Fateh	MCB , Ecole Militaire Polytechnique	Invité

ENP 2025

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département D'Électronique



Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion
Photovoltaïque (LDCCP)

THÈSE DE DOCTORAT

en : **Électronique**

Option : **Électronique des Systèmes de Télécommunications**

Intitulé

Conception d'antennes pour vêtements communicants

Présenté par :

BOUAZA Abdelmaoula

*Présentée et soutenue publiquement le 11 Novembre 2025,
devant le Jury composé de :*

Adel Belouchrani	Professeur, ENP	Président
Rachida Touhami	Professeur, ENP	Directrice de Thèse
Smail Tedjini	Professeur, INP-Grenoble	Co-directeur de Thèse
Sami Hebib	Professeur, Université de Blida 1	Examineur
Amine Moukraoui	MCA, ENP	Examineur
Benmahmoud Fateh	MCB , Ecole Militaire Polytechnique	Invité

ENP 2025

ملخص

يُعد تطوير أنظمة الاتصالات القابلة للارتداء والمثبتة على الجسم أحد التحديات الرئيسية في شبكات الجيل القادم، كما يمثل محوراً بحثياً مهماً في مجالي علوم وتكنولوجيا الاتصالات. وتُعد الهوائيات عنصراً أساسياً في هذه الأنظمة، إذ يُنَاط بها ضمان الإرسال والاستقبال اللاسلكيين سواء داخل الجسم أو خارجه، تبعاً لطبيعة التطبيق.

في هذا العمل البحثي لنيل درجة الدكتوراه، نقتراح تصميم مجموعة من الهوائيات المدمجة داخل الألبسة، بحيث تتخذ شكل شعار أو رمز غير مرئي مدمج ضمن سترة ذكية. وقد صُممت هذه الهوائيات للعمل ضمن نطاقات ISM و WBAN و WLAN عند الترددات 2.45 GHz و 5 GHz و 5.8 GHz، مع توفير وضع متميز للتشغيل • وضع الاتصال ضمن نطاق ISM: وهو وضع الوصول المفتوح الداعم لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية القياسية مثل LoRa و Wi-Fi, Bluetooth.

بضمن التصميم المقترح دمجاً بصرياً غير مرئي للهوائي داخل النسيج، بأسلوب يحاكي شعاراً زخرفياً، مع الحفاظ على أداء كهرومغناطيسي عالٍ ومتوافق مع معايير السلامة والكفاءة. وبذلك، يوفر هذا الحل ثنائي النطاق وثنائي آلية الوصول خطوة متقدمة نحو تطوير أجهزة اتصالات ذكية قابلة للارتداء، متعددة الوظائف، تجمع بين خاصيتي تحديد الهوية ونقل البيانات ضمن مكون واحد مدمج بانسيابية داخل النسيج.

الكلمات المفتاحية: هوائي؛ نطاق ISM؛ شبكة WBAN؛ شبكة WLAN؛ الواي فاي Wi-Fi

Abstract :

The development of individual on-body communication systems is a key challenge for next-generation wireless networks and one of the foremost topics in communication science and technology. Antennas, essential for wireless signal transmission, should operate both inside and outside the body, depending on the application. In this PhD work, we propose the design of a family of garment-integrated antennas, shaped as a visually discreet logo or emblem and embedded in a vest. These antennas operate in the ISM, WBAN, and WLAN bands around 2.45 GHz, 5 GHz, and 5.8 GHz, and offer an open access mode supporting standard wireless applications (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, etc.).

The chosen topology ensures a “visually discreet” integration, resembling a graphic logo while fulfilling stringent electromagnetic performance requirements. This dual-band solution paves the way for multifunctional wearable communication devices that support seamless data transmission within a single, integrated component.

Keywords : Antenna ; ISM ; WBAN ; WLAN ; WI-FI .

Résumé :

Le développement des systèmes de communication corporelle individuels constitue un enjeu majeur pour la nouvelle génération de réseaux sans fil et représente l'un des défis actuels dans le domaine des sciences et technologies de la communication. Les antennes, éléments essentiels de la transmission électromagnétique, doivent être capables de fonctionner aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur du corps, selon les applications visées. Dans ce travail de thèse, nous proposons la conception d'une famille d'antennes intégrables dans un vêtement de type gilet, prenant la forme d'un logo ou d'un sigle discret, et opérant dans les bandes de fréquences dédiées aux applications ISM, WBAN et WLAN, couvrant notamment 2,45 GHz, 5 GHz et 5,8 GHz. Ces antennes offrent un fonctionnement en accès ouvert, pleinement compatible avec les technologies sans fil courantes telles que Wi-Fi, Bluetooth ou LoRa.

La topologie retenue garantit une intégration « visuellement discrète », conférant à l'antenne l'apparence d'un élément graphique esthétique tout en répondant aux exigences électromagnétiques. Cette solution bi-bande ouvre de nouvelles perspectives pour les dispositifs de communication portables, permettant une transmission de données fluide au sein d'un composant unique intégré dans le vêtement.

Mots-clés : Antenne ; ISM ; WBAN ; WLAN ; WI-FI .

À MES PARENTS, À QUI JE DOIS
TOUT QUE ALLAH LES PRÉSERVE.
À MES FRÈRES ET MA SŒUR.
À MES ONCLES ET TANTES.
À TOUTE MA FAMILLE ÉLARGIE.
À TOUTES CELLES ET CEUX QUI
ONT CONTRIBUÉ À MON
ÉDUCATION. JE VOUS DÉDIE CE
TRAVAIL. !

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque, au sein du Département d'Électronique de l'École Nationale Polytechnique (ENP) d'Alger, Algérie..

*Avant toute chose, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à **Allah**, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la foi, la volonté et le courage nécessaires à la réalisation de ce modeste travail.*

*Je souhaite saisir cette occasion pour exprimer ma sincère reconnaissance à mes encadrants de thèse, **Prof. Rachida Touhami** et **Prof. Smail Tedjini**, pour leur encadrement constant, leur patience, leur motivation, ainsi que leur précieuse aide et soutien tout au long de ce parcours de recherche. Je leur suis également reconnaissant pour la richesse des connaissances qu'ils ont partagées avec moi.*

*Je remercie également mon encadrant dans le cadre du projet Erasmus+, **Prof. Naeem Ramzan** de University Of The West Of Scotland UWS (UK), pour son accompagnement et son soutien tout au long de mon doctorat. Un grand merci aussi à **Prof. Masood Ur-Rehman** et à **Dr.***

***Abdul Jabbar** de l'Université de Glasgow (UK), pour leurs conseils constants, leur patience, leur motivation et leur soutien indéfectible. Je leur suis profondément reconnaissant pour les savoirs qu'ils m'ont transmis.*

*Je tiens à remercier **Prof. Adel Belouchrani** d'avoir accepté de présider le jury de thèse. Mes remerciements vont également à **Prof. Sami Hebib**, **Dr. Amine Moukraoui** et **Dr. Fateh Benhamoud**, qui ont accepté*

d'évaluer ce travail. Je leur suis particulièrement reconnaissant pour leurs critiques constructives et leurs remarques pertinentes.

Je remercie également mes amis de l'ENP : Youcef Ouadjer, Yacine Hasnaoui, Nadir Alloui, Salah Eddin Zahi, Abdelmounaim Liman, Zakaria Baka.

*Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance à mes collègues de l'Université de Bordj Bou Arréridj : **Prof. Idris Messaoudene, Dr. Massinissa Belazzoug, Dr. Boualem Hammache et Dr. Elhachmi Ksouri.***

Je suis profondément reconnaissant envers mes amis et les membres de ma famille, dont le soutien, l'encouragement et la motivation ont été essentiels tout au long de mes études.

À toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce projet de doctorat, je tiens à adresser mes sincères remerciements.

Abdelmaoula Bouaza

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviations

Introduction générale 18

Chapitre 1 Généralités sur les antennes augmentées 24

1.1 Introduction 24

1.2 Les antennes multifonctions 24

1.3 Antennes de récupération d'énergie RF (Rectennas) 25

1.4 Antennes capteurs 28

1.4.1 Antenne capteur de température 30

1.4.2 Antenne capteur diélectriques (permittivité relative) 31

1.4.3 Antenne capteur fissure 33

1.4.4 Antenne capteur mécaniques 33

1.5 Les antennes à fonction graphique 33

1.6 Conclusion 37

Chapitre 2 Aperçu sur les antennes portables attachées aux vêtements 39

2.1 Introduction 39

2.2 Antennes portables attachées aux vêtements (vestimentaires) 40

2.3 Scénarios de communication des antennes portables attachées aux vêtements 41

2.4 Applications des antennes portables attachées aux vêtements 42

2.5 Les antennes de type accessoires personnels 43

2.5.1 Antenne ceinture 44

2.5.2 Antenne de type bouton 46

2.5.3 Antenne fermeture éclair 48

2.5.4 Antenne bracelet de montre 49

2.6	Les antennes patch Textiles	49
2.6.1	Les antennes imprimées sur un substrat textile	50
2.6.2	Les antennes brodées	52
2.7	Principales caractéristiques des matériaux textiles	57
2.8	caractéristiques des antennes portables attachées aux vêtements	59
2.8.1	L'effet sur le corps humain	60
2.8.2	La flexibilité	60
2.9	Conclusion	61
Chapitre 3 Performance d'une antenne textile augmentée compacte tri-		
bande inspirée de motif militaire pour les communications à courte portée		63
3.1	Introduction	63
3.2	Conception de l'antenne et les résultats de simulation en espace libre . . .	65
3.2.1	L'évolution de l'antenne textile proposée	66
3.2.2	Analyse de la flexibilité de l'antenne proposée	68
3.2.3	Caractéristiques d'antenne proposée à proximité du corps humain .	68
3.2.4	L'analyse du débit d'absorption spécifique (SAR)	71
3.3	Conclusion	73
Chapitre 4 Performances d'une antenne textile flexible et compacte à		
fente en U alimentée en CPW pour les applications WBAN, WLAN,		
ISM et Wi-Fi 6E		74
4.1	Introduction	74
4.2	Conception, simulation et analyse de l'antenne proposée	75
4.3	Fabrication de l'antenne et résultats expérimentaux	80
4.4	Performance de l'antenne textile proposée à proximité du corps humain . .	84
4.5	Conclusion	88
Chapitre 5 Miniaturisation d'une antenne monopole textile conformable		
bi-bande pour les applications WBAN et WLAN		90
5.1	Introduction	90
5.2	Conception de l'antenne proposée, résultats de simulation et analyse	91
5.3	Analyse et discussion des résultats de simulation	94
5.4	Fabrication et mesures de l'antenne	99

5.5 Performances sur le corps humain de l'antenne proposée et effet du matériau réflecteur	103
5.6 Conclusion	107
Chapitre 6 Développement d'une antenne textile augmentée, à faible coût, compacte et flexible	111
6.1 Introduction	111
6.2 Conception de d'antenne et résultats simulés	112
6.3 Fabrication de l'antenne et résultats de mesure	114
6.4 Interaction de l'antenne avec le corps humain	116
6.5 Conclusion	119
Conclusion générale et perspectives	120
Bibliographie	123

Liste des figures

1	Les antennes portables attachées aux vêtements [1]	19
2	Méthodologie adoptée pour la réalisation de ce travail	23
1.1	Structure générale d'une Rectenna [8]	26
1.2	Rectenna portable pour les réseaux sans fil centrés sur le corps humain [10] :(a) vue de face , (b) vue de dessous	27
1.3	le travail réalisé par [5],(a)Prototype complet du système de Rectenna com- pact (b) Configuration de mesure du système de Rectenna	28
1.4	Famille d'antennes-capteurs[17]	29
1.5	l'antenne patch spirale réalisé dans [19] (a) Conception d'un capteur patch en spirale logarithmique avec extrémités effilées. (b) Température mesurée du fantôme de cerveau sur une période de 4,5 heures	31
1.6	Échantillon de test avec un capteur de température à antenne fixé sur une base en cuivre étudiée dans [20] (a) fabrication d'antenne étudiée. (b) Com- paraison entre les courbes S11 simulées et mesurées du capteur d'antenne [20]	31
1.7	l'antenne-capteur de PH étudiée dans [23] (a) Prototype de mesure du capteur d'antenne proposé, et (b) coefficient de transmission valeurs de pH mesurées à trois points de fréquence différents	32
1.8	Sturctures des antennes étudiée dans [30], (a) vue de face de motifs APPL , (b) vue de dessous de motifs APPLE , (c) vue de face de motifs LACOSTE et (d) vue de dessous du motifs LACOSTE	34
1.9	Sturctures des antennes étudiée dans [31], (a) et (b) Logo du Levi Strauss et Co , (c) Schématisation d'un système de suivi basé sur le GPS et le GSM, et (d) coefficient de réflexion du prototype étudiée dans [31]	35
1.10	Géometrie des antennes proposées : (a) l'antenne fabriquée de luis Vitton [32] , (b) le schéma d'antenne luis Vitton [32] , (c) le schéma d'antenne Adidas[33]	36

1.11	géométrie des antennes proposée dans [34]	36
1.12	prototype d'antenne de logo NISSAN proposé dans [35],(a) placement de l'antenne sur le pare-brise du voiture, (b) l'antenne fabriqué,(c) le coefficient de réflexion de l'antenne proposée,(d) diagramme de rayonnement 3D d'antenne proposée placé sur le pare-brise du voiture	37
2.1	Scénarios des communications possibles entre dispositifs BAN [47]	42
2.2	La première antenne de type ceinture proposée [50]	44
2.3	La conception d'antenne de type ceinture proposée, (a) l'antenne réalisé par[51],(b-c) prototype réalisé par[52].	45
2.4	l'antenne proposée dans [53].(a) la géométrie d'antenne, (b) la réalisation d'antenne avec un EBG.	46
2.5	Géométries d'antenne bouton proposé dans [54].	46
2.6	Géométries d'antenne bouton proposé dans [56] (a) Structure de l'antenne bouton. (b) Position de l'antenne par rapport au corps humain	47
2.7	Géométries des antennes bouton proposée : (a) fabrication d'antenne dans[57], réalisation du prototype dans(b) [58] et (c) l'antenne bouton fabriqué dans [59].	47
2.8	Géométrie de l'antenne à fermeture éclair de sac à main proposée dans [60].	48
2.9	Géométrie de l'antenne bracelet de montre étudiée dans [61].	49
2.10	Différents matériaux conducteurs utilisée.	50
2.11	Sturctures des antennes étudiée, (a) [64],(b) [65] et (c) [67].	51
2.12	Sturcture des antennes étudiées, (a) et (b) fabrication d'antenne proposée dans [68], (c) l'antenne proposée dans [69]	52
2.13	Exemple de machines a brodée : (a) Brother Innov-IS 950 [72],(b) Une machine à broder assistée par ordinateur conçue, à Université de Loughborough [73] , (c) une Machine à broder industrielle Tajima Neo [74]	53
2.14	Types des fils conducteurs utilisée pour brodée les antennes textiles : (a) monofilamefint, (b) monolament en faisceau, (c),(d) fils non conducteurs torsadés avec des filaments conducteurs [72]	53
2.15	Photographie des fils conducteurs étudiés dans [72] : (a) Shieldex 40-22/7 + 110 PET 3ply, (b) Shieldex 33-17 PET 2ply et (c) Amberstrand 166	54

2.16	conception de l'antenne et photographie du prototype [72] alimentation microruban : (a) antenne rectangulaire. (b) antenne polygonale. (c) alimentation coaxile	54
2.17	L'antenne étudiée dans [75] : (a) Réalisation de l'antenne. (b) Connexion réelle de l'antenne textile conçue intégrée avec Photon de particules	55
2.18	Antenne étudié dans [76] : (a) Antenne réalisé. (b) l'intégration d'antenne avec l'arduino	56
2.19	Antenne étudié dans [77] : (b) Coefficient de réflexion des différentes antennes étudiées	56
2.20	(a) Antenne réalisé dans [78] ,(b) Coefficient de réflexion des deux antennes ULB étudiées dans [78]	57
3.1	Structure finale de l'antenne de la Gendarmerie avec dimensions spécifiées (a) structure du patch ; (b) plan de masse	65
3.2	L'évolution de l'antenne textile proposée	66
3.3	(a) changement du paramètre S_{11} au cours des étapes d'évolution de l'antenne proposée, (b)le gain et l'efficacité de l'antenne proposée	67
3.4	distribution du densité de courant de l'antenne proposée aux fréquences de 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz	67
3.5	(a) Antenne proposée déformée sous différentes courbures (b) S_{11} numérique de l'antenne suggérée sous différentes courbures	68
3.6	Placement de l'antenne proposée sur les quatre modèles rectangulaires du corps humain (a) Sans réflecteur , (b) Avec réflecteur	69
3.7	(a) S_{11} de l'antenne proposée placée sur le modèle biologique des tissus humains. (b) Le gain et le rendement en fonction de la fréquence d'antenne proposée sur le modèle biologique des tissus humains, avec et sans réflecteur	70
3.8	Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne proposée à 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz, en espace libre et sur le corps humain	71
3.9	Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz sur le corps humain	71
3.10	SAR simulé de l'antenne proposée sur le modèle biologique des tissus humains, avec et sans réflecteur	72

4.1	(a) Schéma final de l'antenne proposée (b) Étapes d'évolution de la conception de l'antenne finale	77
4.2	Résultats simulés de S_{11} aux différentes étapes de l'évolution de la conception	77
4.3	Résultats simulés de S_{11} aux différentes étapes de l'évolution de la conception.	79
4.4	Résultats simulés de S_{11} aux différentes type de substrat textile	79
4.5	(a)le prototype de l'antenne fabriquée connectée avec VNA,(b) l'antenne fabriquée	80
4.6	comparaison entre le résultat de simulation et de mesure de coefficient de réflexion	81
4.7	(a) Prototype fabriqué déformé sous différentes courbures,(b) Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sous différentes courbures	81
4.8	comparaison du diagrammes de rayonnement 2D numériques et mesurés dans les plans E ($\phi = 0^\circ$) et H ($\phi = 90^\circ$) (a) 2,45 GHz,(b) 5 GHz, (c) 5,8 GHz,(d) 6,5 GHz en espace libre	83
4.9	a) Modèle biologique cubique simulé à 4 couches des tissus humains. (b) Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sur différentes parties du corps humain	84
4.10	Analyse du Débit d'Absorption Spécifique (SAR) à 2.45 GHz, 5 GHz, 5.8 GHz et 6.5 GHz	85
4.11	(a) Mesure de l'antenne en chambre anéchoïque (b) Le Gain et le rendement de l'antenne au niveau corps humain	86
4.12	comparaison du diagrammes de rayonnement 2D numériques et mesurés dans les plans E ($\phi = 0^\circ$) et H ($\phi = 90^\circ$) (a) 2,45 GHz,(b) 5 GHz, (c) 5,8 GHz,(d) 6,5 GHz au niveau du corps humain	87
5.1	la miniaturisation de l'antenne	92
5.2	Étapes d'évolution de la conception et schéma de l'antenne proposée	92
5.3	Coefficient de réflexion simulé des configurations d'antenne évolutives	94
5.4	Analyse de la distribution du courant de surface de l'antenne proposée : (a) à 2,45 GHz et (b) à 5,38 GHz	95
5.5	le gain et l'efficacité de rayonnement du design proposé en espace libre	95

5.6	Effet sur le coefficient de réflexion : (a) variation des écarts des fentes (g) en mm, (b) utilisation de différents substrats de textiles	96
5.7	Influence de la variation de Lg sur le coefficient de réflexion	97
5.8	Coefficient de réflexion du modèle de circuit équivalent	98
5.9	Circuit équivalent de l'antenne proposée	99
5.10	Prototype fabriqué et mesure du coefficient de réflexion à l'aide du VNA. .	100
5.11	Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée	100
5.12	Diagrammes de rayonnement mesurés dans les plans $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 90^\circ$. (a) 2.45 GHz (b) 5.5 GHz	101
5.13	Prototype d'antenne fabriqué dans la chambre anéchoïque	102
5.14	Coefficient de réflexion mesuré pour différentes courbures de flexion	102
5.15	(a) Modèle rectangulaire du bras humain à quatre couches. (b) Placement de l'antenne fabriquée sur le bras humain	103
5.16	Analyse du SAR (a) 2,45 GHz sans réflecteur (b) 5,5 GHz sans réflecteur (c) 2,45 GHz avec réflecteur (d) 5,5 GHz avec réflecteur en utilisant un écart de 30 mm	105
5.17	(a) Effet sur le gain simulé pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain. (b) Effet sur l'efficacité de rayonnement simulée pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain.	106
5.18	Coefficient de réflexion mesuré et simulé sur le corps avec et sans matériau réflecteur	106
5.19	Caractéristiques des diagrammes de rayonnement ($\Phi=0^\circ$ et $\Phi=90^\circ$) de l'antenne proposée sur le corps avec et sans réflecteur à (a) 2,45 GHz et (b) 5,5 GHz	107
6.1	Illustration de l'antenne conçue : (a) Vue de dessus, (b) Vue de dessous, (c) Évolution étape par étape de la structure de l'antenne	113
6.2	Résultats simulés du coefficient de réflexion S11 aux différentes étapes d'évolution de l'antenne	113
6.3	Effet sur le coefficient de réflexion en fonction de la variation de la position de l'alimentation coaxiale	114
6.4	Prototype fabriqué et mesure du coefficient de réflexion à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA)	115

6.5	Comparaison entre le coefficient de réflexion mesuré et simulé de l'antenne proposée	115
6.6	(a) Prototype fabriqué déformé selon différentes courbures, (b) Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sous différentes courbures	116
6.7	Modèle rectangulaire à quatre couches représentant la zone du bras humain	116
6.8	Placement de l'antenne fabriquée sur le bras humain.. . . .	117
6.9	Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sous différents organes du corps humain	117
6.10	Analyse du DAS à 5,5 GHz.	118
6.11	Diagramme de rayonnement numérique 3D sur le corps à 5,5 GHz.	118
6.12	Diagramme de rayonnement 2D simulé à 5,5 GHz de l'antenne proposée en espace libre et sur le corps, dans les plans E (ϕ 0°) et H (ϕ 90°)	118

Liste des tableaux

2.1	Applications WBAN médicales et non-médicales.	43
2.2	Avantages et les inconvénients des antennes précédemment étudiées	57
2.3	Caractéristiques diélectriques de différents substrats textiles	59
2.4	Des différentes déformations appliquées sur les antennes étudiées dans cet état de l'art.	61
3.1	dimensions des paramètres de l'antenne proposée.	65
4.1	Comparaison des performances de l'antenne proposée avec des travaux antérieurs	88
5.1	Dimensions de l'antenne proposée en millimètres (mm).	93
5.2	Propriétés diélectriques des différents substrats simulés, ainsi que leurs fréquences de résonance et leurs gains.	97
5.3	Valeurs des composants optimisés du circuit équivalent.	98
5.4	Propriétés du modèle rectangulaire du corps humain en fonction des fréquences	104
5.5	Performance de l'antenne pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain dans la plage de 1 mm à 30 mm	109
5.6	Comparaison des performances de l'antenne proposée avec la littérature existante.	110
6.1	Dimensions de l'antenne conçue en millimètres (mm)	113

Abréviations

AAL	assistance à la vie ambiante
AC	Alternating Current
AMC	Artificial Magnetic Conductor
BW	Bandwidth
CPW	Coplanar Waveguide
DAS	Débit d’Absorption Spécifique
DC	Direct Current
EBG	Electromagnetic Band Gap
FCC	Federal Communications Commission
FR-4	Flame Retardant 4
GND	Graound
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HIS	High Impedance Surface
HSRR	Hairpin Shaped Resonator Ring
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
MICS	Medical Implant Communication Service
PCB	Printed Circuit Board
PDMS	Polydimethylsiloxane
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
SAR	Specific Absorption Rate
SSRR	Split Square Ring Resonator
UWB	Ultra-Wideband
VNA	Vector Network Analyzer
WBAN	Wireless Body Area Network
WBCNs	Wireless Body-Centric Networks
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPT	Wireless Power Transfer

Introduction générale

Les systèmes de communication sans fil modernes sont au cœur du développement de notre société connectée, que ce soit dans les domaines des télécommunications, des réseaux de capteurs, des systèmes de localisation ou des applications militaires et médicales. Au sein de ces systèmes, l'antenne constitue un élément déterminant : son choix et sa conception influencent directement la qualité du signal, la portée, la consommation d'énergie et la compatibilité avec les standards de communication. Les besoins croissants en mobilité, en compacité et en fiabilité ont conduit les concepteurs à relever plusieurs défis majeurs.

La miniaturisation est devenue essentielle pour répondre aux contraintes d'espace imposées par les dispositifs portables, les vêtements intelligents ou les objets connectés, tout en conservant des performances électromagnétiques élevées.

L'intégration physique de l'antenne dans des structures, des matériaux ou des formes non conventionnelles (textiles, objets du quotidien, logos), permet non seulement de réduire l'encombrement, mais aussi d'améliorer l'ergonomie et la discrétion des systèmes.

Comme il est indiqué à la Figure 1, le corps humain constitue une plateforme de grande surface favorable à l'intégration d'électroniques vestimentaires variées. Les dispositifs embarqués dans les vêtements doivent satisfaire des exigences strictes en termes de légèreté, de durabilité, de flexibilité et de compatibilité avec la peau, afin de garantir un fonctionnement fiable et un confort optimal pour l'utilisateur. Parallèlement, l'augmentation des fonctionnalités des antennes telles que le fonctionnement multibande, la récupération d'énergie RF, l'intégration de capteurs ou l'ajout d'éléments graphiques, ouvre de nouvelles perspectives, allant de l'optimisation des communications à la création de fonctions inédites. Ces évolutions reflètent une tendance forte vers des antennes intelligentes, adaptables et multifonctions, capables de s'intégrer harmonieusement dans des environnements variés tout en répondant aux exigences techniques des communications sans fil de nouvelle génération [1-3].

Dans le contexte algérien, plusieurs grandes institutions nationales ou sociétés, ou encore

les entreprises nationales, déploient quotidiennement un effectif important sur des sites sensibles, notamment dans les bases militaires, les installations pétrolières en zones désertiques ou encore en mer. Dans ces environnements, la garantie d'une communication sans fil fiable entre les équipes constitue un enjeu majeur et un véritable défi technologique.

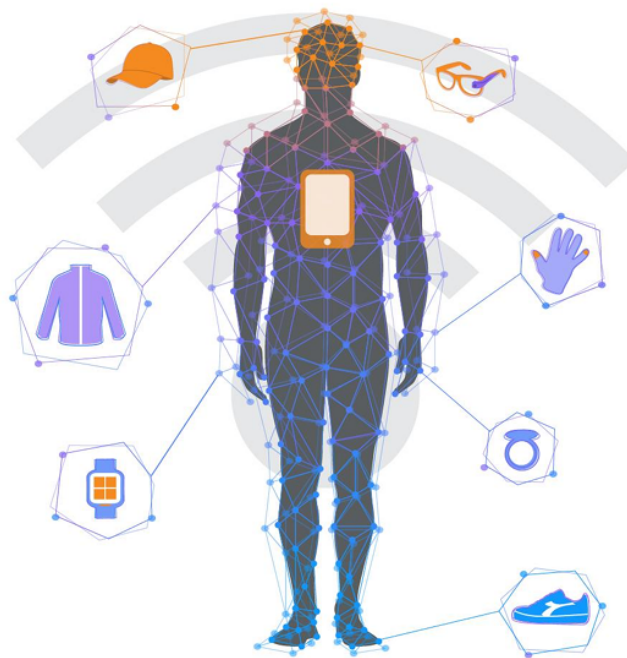


FIGURE 1 – Les antennes portables attachées aux vêtements [1]

Pour les unités de l'armée, elles sont équipées de systèmes de radiocommunication classiques reposant sur des antennes de type monopôle, dites « fouet », positionnées le long de la clavicule. Ce type d'antenne présente plusieurs inconvénients.

Ils limite le champ de vision lors des mouvements de la tête, gêne la mise en position de tir et ajoute un poids supplémentaire à l'équipement.

Par conséquent, l'intégration d'une antenne directement dans le gilet tactique offrirait une alternative ergonomique, discrète et mieux adaptée aux exigences opérationnelles. Concernant l'entreprise SONATRACH, un autre défi se pose c'est la gestion des flux d'entrée et de sortie ainsi que la localisation du personnel au sein des sites industriels. L'intégration d'un système de suivi et d'identification directement dans l'uniforme des travailleurs permet non seulement de simplifier les processus de pointage et de contrôle, mais également d'améliorer la visibilité sur la présence et les déplacements du personnel, sans dépendre des cartes d'accès traditionnelles.

À cet effet, le présent travail de thèse de doctorat propose un développement d'une famille d'antennes textiles imprimées sur des gilets, capables de fonctionner sur différentes bandes de fréquence à savoir : WBAN, ISM et WLAN autour de 2,45 GHz, 5 GHz et 5,8 GHz. L'antenne développée assure un fonctionnement bi-bande permettant la communication dans la bande ISM ainsi que la prise en charge d'applications sans fil standards telles que le Wi-Fi, le Bluetooth ou LoRa.

L'architecture proposée repose sur une antenne bi-bande à double fonctionnalité, intégrée de manière discrète dans le textile, offrant une solution adaptée aux systèmes de communication portables de nouvelle génération.

L'architecture proposée repose donc sur une antenne bi-bande à double fonctionnalité, intégrée de manière discrète dans le textile, offrant une solution adaptée aux systèmes de communication portables de nouvelle génération.

Enfin, une attention particulière est portée à l'aspect esthétique et fonctionnel de l'antenne. La topologie retenue prend la forme d'un logo ou symbole visuel.

Le manuscrite comporte six chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale : le premier chapitre propose un état de l'art sur le développement des antennes augmentées, en mettant en lumière leur émergence dans divers domaines d'utilisation, notamment celui des communications sans fil. Il explore les principales catégories de ces antennes, telles que les antennes de récupération d'énergie RF (Rectenna), les antennes intégrant des capteurs, ainsi que celles incorporant des éléments graphiques emblématiques sous forme de logos. Chaque type d'antenne est présenté en lien avec ses usages spécifiques et ses avantages fonctionnels dans les systèmes modernes.

Le deuxième chapitre présente un aperçu sur les antennes portables intégrées aux vêtements, avec un accent particulier sur leur rôle dans les communications sans fil à courte portée, telles que les réseaux WBAN. Il aborde les différents scénarios de communication selon l'emplacement des antennes sur les vêtements intelligents, et propose une classification en deux grandes catégories :

les antennes intégrées sous forme d'accessoires (ceintures, bracelets, boutons, etc.)

et les antennes textiles imprimées ou brodées. Les conceptions de ces antennes sont élaborées. Une attention particulière est portée aux propriétés des matériaux textiles, notamment la permittivité et la tangente de perte. Une étude des performances des antennes à proximité du corps humain (flexibilité, DAS) ainsi que des tableaux récapitulatifs des antennes étudiées conclue le chapitre deux.

Le troisième chapitre présente le premier prototype de la famille d'antennes étudiée. Il s'agit d'une antenne patch textile tri-bande, intégrant l'emblème de la Gendarmerie Nationale Algérienne, conçue pour les communications sans fil sur trois bandes de fréquence : la bande ISM à 2,45 GHz (WBAN et Wi-Fi), une bande intermédiaire à 4,42 GHz, et la bande Wi-Fi 6E à 6,58 GHz. Réalisée sur un substrat souple en denim avec un plan de masse partiel, l'antenne compacte ($32 \times 30 \times 0,6 \text{ mm}^3$) a été testée sous flexion et en condition de port sur le corps. Les résultats démontrent sa stabilité et ses bonnes performances, ce qui en fait une solution adaptée aux dispositifs portables, notamment pour la gestion des effectifs, le contrôle d'accès et l'identification sécurisée.

Le deuxième prototype présenté, détaillé au chapitre 4, consiste en une antenne textile innovante intégrée dans un gilet, prenant la forme du logo de l'armée de l'air algérienne. Conçue sur un substrat en denim, elle cible les bandes WBAN, ISM et WLAN. Compacte, légère et économique, cette antenne double bande offre des performances élevées avec un rendement allant jusqu'à 98 % à 2,45 GHz et un gain maximal de 6,18 dB à 6,5 GHz. Grâce à une structure optimisée par des fentes dans le plan de masse, elle assure une large bande passante (22 % et 68 %), une bonne flexibilité, ainsi que des caractéristiques stable près du corps humain, la rendant idéale pour les applications portables comme la gestion des effectifs, le contrôle d'accès et l'identification.

Le chapitre cinq, présente le troisième prototype, qui consiste en une antenne développée sous la forme du logo de la Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures (Sonatrach). Une technique de miniaturisation a été appliquée afin de réduire la taille de l'antenne tout en maintenant de bonnes performances. Ce prototype est validé par la fabrication et l'analyse des résultats mesurés. L'antenne proposée représente une solution économique adaptée à diverses applications électroniques portables. Elle constitue une alternative prometteuse pour la gestion optimisée des effectifs, le contrôle d'accès sécurisé et les systèmes d'identification.

Enfin, le chapitre six présente le quatrième prototype, qui correspond à une antenne développée sous la forme du logo des forces spéciales algériennes. Cette antenne se distingue par sa taille extrêmement compacte et une fréquence de résonance centrée à 5,5 GHz. L'ensemble des caractéristiques électromagnétiques est testé, notamment la flexibilité de l'antenne ainsi que son comportement à proximité du corps humain. L'antenne proposée constitue une solution économique et efficace pour les applications électroniques

portables opérant dans la bande des 5,5 GHz.

-Approche méthodologique utilisée dans cette étude : Le travail sur ces antennes est scindé en deux parties principales. La première partie est consacrée à la conception et à la simulation des antennes à l'aide du logiciel CST Studio Suite. À cet effet, nous avons élaboré les différentes structures proposées et sélectionné le substrat textile, ainsi que les éléments de rayonnement (patch et plan de masse). Pour les géométries complexes telles que les logos de la gendarmerie nationale ou des forces aériennes algériennes le logiciel AutoCAD a été utilisé afin d'assurer une modélisation précise et conforme aux exigences esthétiques et fonctionnelles.

Les simulations effectuées sous CST nous ont permis d'extraire les paramètres électromagnétiques essentiels, notamment le coefficient de réflexion, le gain, le rendement, le diagramme de rayonnement, ainsi que le débit d'absorption spécifique (DAS). Par ailleurs, une attention particulière a été portée à l'impact des déformations mécaniques et des pliures induites par les mouvements, celles-ci étant critiques dans le cas d'antennes intégrées sur substrat textile.

La seconde partie porte sur la réalisation, la fabrication et la caractérisation expérimentale des prototypes. Cette phase est déterminante, car elle nécessite l'utilisation d'un matériel de précision, tant pour la fabrication que pour les mesures. Pour la partie fabrication, un ruban de cuivre adhésif a été utilisé en tant qu'élément rayonnant, en raison de sa bonne conductivité et de son excellente adhérence sur le textile de type jean. Les mesures expérimentales ont été menées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) pour l'évaluation des paramètres S, et d'une chambre anéchoïque pour la caractérisation du diagramme de rayonnement. Le prototype retenu dans le cadre de cette thèse est clairement illustré à la Figure 2.

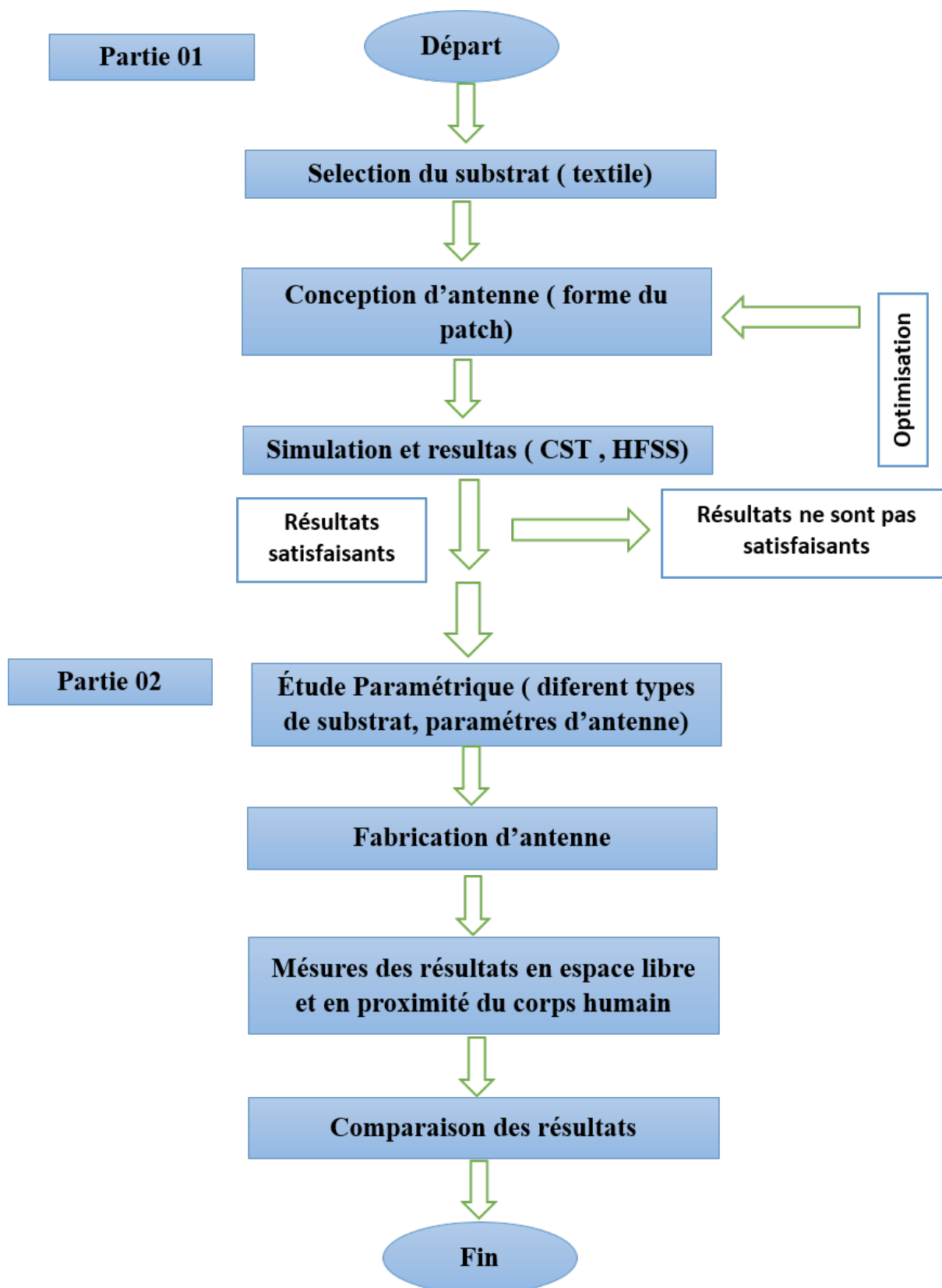


FIGURE 2 – Méthodologie adoptée pour la réalisation de ce travail

Chapitre 1

Généralités sur les antennes augmentées

1.1 Introduction

Les systèmes de communication modernes nécessitent des antennes capables d'aller au-delà des fonctions classiques de rayonnement et de réception des ondes électromagnétiques. Cette évolution a conduit à l'émergence du concept d'antenne augmentée : une antenne qui, en plus de sa fonction principale, intègre des fonctionnalités supplémentaires afin d'améliorer ses performances et/ou de lui conférer de nouvelles capacités. Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu de l'évolution des antennes augmentées dans différents domaines d'application, en particulier dans le contexte des communications sans fil. Nous examinons également les différentes catégories d'antennes augmentées, telles que les antennes de récupération d'énergie RF (Rectennas), les antennes-capteurs, ainsi que les antennes intégrant des motifs sous forme de logos, que l'on désigne comme possédant des fonctions graphiques, en tenant compte de leur mode d'utilisation.

1.2 Les antennes multifonctions

Antennes multifonctions ou une antenne augmentée selon la définition que nous proposons, sont des antenne qui, en plus de ses fonctions de transmission et de réception d'ondes électromagnétiques, intègre une ou plusieurs fonctionnalités supplémentaires destinées à augmenté ses performances et à répondre à des besoins spécifiques. Les antennes peuvent être conçues pour :

- Générer ou stocker de l'énergie,
- Surveiller des paramètres physiques ou environnementaux,
- Modifier le diagramme de rayonnement de manière adaptative,

- Présenter des caractéristiques physiques ou structurelles adaptées à leur environnement d'intégration.

Les antennes augmentées peuvent être classées en plusieurs catégories en fonction des fonctionnalités supplémentaires qu'elles intègrent :

1.3 Antennes de récupération d'énergie RF (Rectennas)

De nos jours, la majorité des ressources énergétiques proviennent des industries du gaz, du pétrole et du nucléaire. Cependant, ces sources d'énergie ne sont ni durables à long terme ni économiquement stables, et elles présentent un impact environnemental négatif. Il est donc essentiel de développer des alternatives énergétiques permettant d'atténuer ces inconvénients. Ces dernières années, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur la récupération d'énergie afin de proposer des solutions plus propres, plus durables et plus sûres [4, 5]. L'énergie peut être récoltée à partir de diverses sources, telles que l'énergie solaire, éolienne, vibratoire ou encore les signaux électromagnétiques ambiants. Cette étude se concentre principalement au moyen d'une antenne redresseuse (Rectenna). Pour permettre à la Rectenna de capter ces signaux ambiants et de fournir une tension continue aux dispositifs électroniques à faible consommation, le principe du transfert d'énergie sans fil (WPT - Wireless Power Transfer) est appliqué.[4]-[6]-[7]. La Rectenna constitue un élément clé de transfert d'énergie sans fil, car son efficacité de conversion micro-ondes - courant continu détermine la performance du transfert d'énergie et son efficacité globale. Son intégration dans des antennes augmentées permet d'élargir ses applications aux systèmes intelligents, aux dispositifs IoT et aux solutions énergétiques autonomes, renforçant ainsi son rôle dans le développement des technologies de communication et d'alimentation sans fil de nouvelle génération.[4, 6]. Une Rectenna est un dispositif utilisé pour capter les signaux RF ambiants et les convertir en une tension continue afin d'alimenter des dispositifs à faible consommation d'énergie, tels que les capteurs sans fil [8, 9]. Dans sa structure de base, une Rectenna est composée de quatre éléments (illustrés à la Figure 1.1) : une antenne, un redresseur, un filtre de suppression des harmoniques et une résistance de charge. L'antenne joue le rôle de récepteur en captant les signaux RF ambiants. Il existe une grande variété de conceptions d'antennes, chacune présentant des structures et des propriétés spécifiques, adaptées à différentes applications. Parmi les types d'antennes couramment utilisées, on

retrouve les antennes micro-ruban, dipôles, bipolaires, planes, Yagi-Uda, hélicoïdales et paraboliques, et en réseau. Ces configurations offrent des performances variées en fonction des exigences du système, permettant ainsi une adaptation aux différents domaines d'application des Rectennas. [8]-[9].

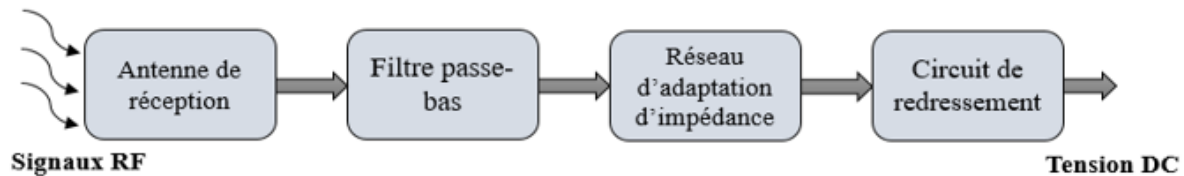


FIGURE 1.1 – Structure générale d'une Rectenna [8]

Les signaux RF incidents captés par l'antenne peuvent contenir des harmoniques susceptibles d'engendrer des interférences et de compromettre la qualité du signal utile. Pour les atténuer, un filtre passe-bas est utilisé : il rejette les composantes fréquentielles indésirables, ce qui améliore le transfert de la puissance RF utile vers l'étage de conversion. Ensuite, le signal alternatif (AC) est redressé pour produire une tension continue (DC). Cette conversion est assurée par un redresseur, typiquement composé de diodes. Il existe trois configurations principales de redresseurs : le redresseur à diode unique, le redresseur à pont de diodes, et le multiplicateur de tension. Les deux premières configurations peuvent fournir une tension continue, mais leur amplitude est généralement inférieure à celle du signal RF incident. En revanche, le multiplicateur de tension, comme le redresseur Greinacher (ou doubleur de tension de type Villard), est utilisé lorsque l'on souhaite doubler la tension de sortie [8]. Afin de maximiser la puissance DC récupérée, une résistance de charge est insérée à la sortie du redresseur. Celle-ci est ajustée lors de la phase de conception pour optimiser l'adaptation d'impédance entre le redresseur et la charge, et obtenir un rendement maximal, défini comme le rapport entre la puissance DC délivrée à la charge et la puissance RF incidente reçue par l'antenne. Il est pertinent de modéliser une rectenna comme un système à entrée-sortie : les paramètres d'entrée comprennent la densité de puissance RF, la fréquence, et l'impédance d'entrée du système, tandis que les paramètres de sortie incluent la tension continue obtenue, le courant fourni à la charge, et la puissance DC extraite. Un tel modèle permet d'estimer plus rigoureusement le rendement global et de comparer différentes architectures de récupération d'énergie [8]. Des recherches ont été menées dans le but d'améliorer le rendement des Rectennas et de réduire

leur taille. Les travaux présentés dans [10] portent sur la conception d'une Rectenna portable destinée aux réseaux corporels sans fil (Wireless Body-Centric Networks, WBCNs), avec pour objectif la récupération d'énergie RF dans des environnements à faible densité de puissance. Réalisée sur un substrat textile de type Cordura, comme illustré à la Figure 1.2, cette structure peut être intégrée directement aux vêtements. Elle associe une antenne patch planaire à un redresseur de type Greinacher, accordé à 2,45 GHz (bande Wi-Fi) au moyen de selfs d'arrêt RF (RFC). Les mesures expérimentales indiquent qu'une puissance RF incidente comprise entre 0 dBm et -40 dBm permet de générer une tension continue atteignant 2,2 V. En présence d'un routeur Wi-Fi situé à 150 cm, la Rectenna en réseau délivre une tension de 1,05 V, suffisante pour alimenter des capteurs corporels, réduisant ainsi la dépendance aux batteries traditionnelles.

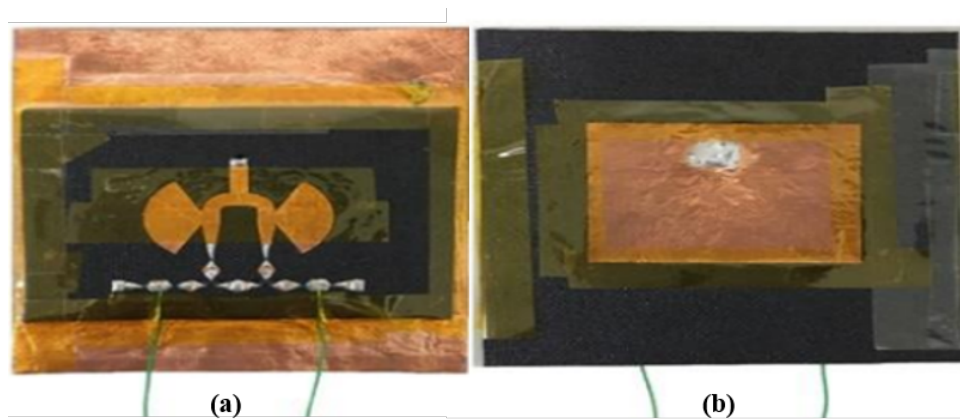


FIGURE 1.2 – Rectenna portable pour les réseaux sans fil centrés sur le corps humain [10] : (a) vue de face , (b) vue de dessous

Les auteurs de l'étude [5] se sont concentrés sur la conception d'une Rectenna à alimentation coplanaire à haut rendement. Conçue pour fonctionner à 2,45 GHz et mesurant $18 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, l'antenne est réalisée sur un substrat FR4 est connectée à un redresseur Cockcroft-Walton à un seul étage, intégrant un réseau d'adaptation d'impédance en forme de L, également fabriqué sur un substrat FR4, comme illustré à la Figure 1.3. Les résultats de simulations et mesures expérimentales montrent que cette Rectenna atteint un rendement de conversion de 75 % et 68 % respectivement pour une puissance d'entrée RF de 5 dBm et une résistance de charge de 5 k Ω . Pour des puissances d'entrée de 20 dBm et -10 dBm, l'efficacité mesurée est de 18 % et 48 %, respectivement, sous la même résistance de charge. Grâce à sa taille compacte d'environ 540 mm², cette Rectenna est particulièrement adaptée aux applications nécessitant un format réduit. Ses performances

en font une solution idéale pour les dispositifs IoT, permettant une réduction des besoins en recharge de batterie, voire un fonctionnement sans batterie lorsque la puissance requise est inférieure à 150 mW.

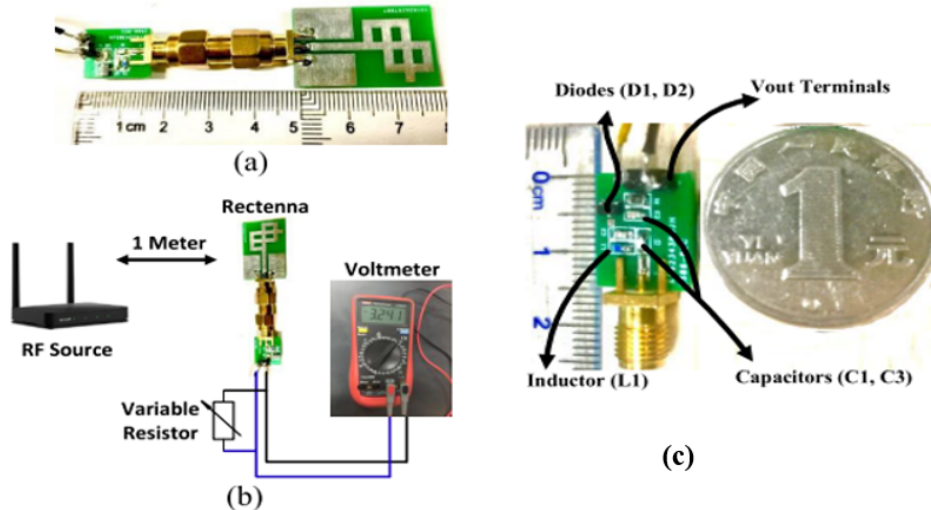


FIGURE 1.3 – le travail réalisé par [5], (a) Prototype complet du système de Rectenna compact (b) Configuration de mesure du système de Rectenna

1.4 Antennes capteurs

Les avancées récentes dans le domaine des capteurs RF ont suscité un intérêt croissant en raison de leur capacité à effectuer des mesures non invasives et en temps réel des propriétés des matériaux dans divers domaines, notamment industriel, chimique, biologique et clinique. Les capteurs RF présentent plusieurs avantages, tels qu'une taille réduite, un faible coût et une simplicité de fabrication, facilitant ainsi leur intégration par rapport aux capteurs conventionnels. Toutefois, leur sensibilité et sélectivité limitées constituent des défis qui restreignent leur champ d'application. Ces dernières années, l'essor des technologies portables et flexibles a suscité un vif intérêt académique et industriel [11]. Cette évolution est principalement motivée par le potentiel d'intégration de ces électroniques flexibles dans des applications grand public. Contrairement aux composants électroniques classiques, les dispositifs flexibles peuvent être pliés, froissés ou étirés sans altérer leur fonctionnement, ce qui améliore considérablement leur adaptabilité à des surfaces non planes, comme la morphologie du corps humain [12, 13]. Dans ce contexte, l'intégration de composants électroniques flexibles aux textiles constitue une technologie prometteuse

pour la prochaine génération d'appareils électroniques grand public. Cette approche offre plusieurs avantages, notamment une fabrication simplifiée, des substrats légers et flexibles, un faible coût de production et une réduction des coûts globaux de fabrication [14]. Les capteurs à base d'antennes ont également connu une forte croissance ces dernières années en raison de leur faible coût, de leur facilité de fabrication, de leur fonctionnement passif et de leur capacité à détecter une large gamme de signaux [15]. Le principe de fonctionnement de ces capteurs repose sur l'influence des modifications géométriques ou des propriétés intrinsèques du matériau sur la fréquence de résonance de l'antenne, analysée via le coefficient de réflexion. Ces capteurs sont aujourd'hui intégrés dans divers dispositifs électroniques, et leur fonctionnement peut être influencé par des facteurs internes ou externes. De plus, les capteurs à base d'antennes ont émergé comme une solution innovante pour la mesure d'un large éventail de propriétés physiques. Afin de répondre aux exigences de notre société moderne axée sur les communications sans fil, il est essentiel d'associer des capteurs flexibles à des instruments électroniques flexibles pour une transmission efficace des données [16].

Les différents types d'antennes capteurs

Les capteurs basés sur la technologies d'antenne se répartissent en plusieurs catégories, dont les quatre principales sont : les capteurs de température, les capteurs diélectriques, les capteurs de fissures et les capteurs mécaniques, comme illustré à la Figure 1.4. Tous ces types de capteurs exploitent les ondes radiofréquences (RF) ou micro-ondes pour détecter les variations dans l'environnement ciblé. Chaque catégorie sera détaillée dans les sections suivantes[17].

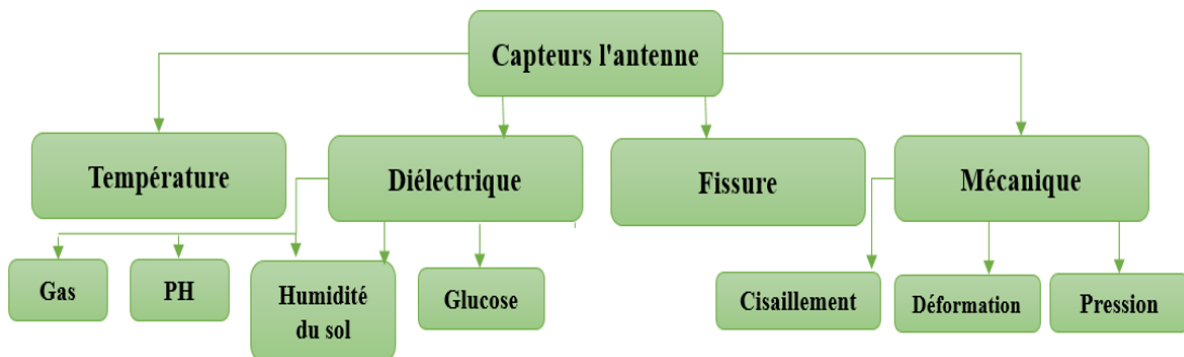


FIGURE 1.4 – Famille d'antennes-capteurs[17]

1.4.1 Antenne capteur de température

La mesure de la température est un paramètre essentiel, car elle permet d'évaluer les conditions environnementales ou physiologiques dans lesquelles évolue un système. La précision de cette mesure est cruciale dans de nombreuses applications, telles que :

- L'industrie agroalimentaire (contrôle de la production des aliments)
- Les procédés de fabrication (surveillance des températures critiques)
- Le suivi de la santé humaine (monitoring de la température corporelle)

Il existe une grande diversité de capteurs de température à base d'antennes dans la littérature, chacun possédant des caractéristiques spécifiques en fonction de son environnement d'utilisation [18].

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux capteurs de température à base d'antennes. Dans [19], un capteur radiométrique à micro-ondes a été conçu pour assurer une surveillance rapide et non invasive de la température du cerveau. Comme illustré dans la Figure 1.5, l'élément clé de ce capteur radiométrique peu coûteux, d'un diamètre de 2,8 cm, est une antenne en spirale logarithmique microstrip mesurant 2,5 cm de diamètre. Cette conception a permis d'atteindre une bande passante de 500 MHz, soit 50,3 % de la bande passante totale de l'antenne proposée. Les simulations effectuées avaient pour objectif d'évaluer l'absorption d'énergie par les tissus de la tête, du cou et du cerveau, permettant ainsi une mesure précise de la température cérébrale. La fiabilité du capteur a été validée à l'aide d'un fantôme de tête humaine multi-couches reproduisant les propriétés des tissus biologiques. Cette architecture pourrait être particulièrement bénéfique pour les études cliniques, notamment pour le suivi des patients en convalescence après une hypothermie chirurgicale. Elle offre un suivi prolongé et précis, tout en réduisant les coûts liés aux procédures médicales longues et complexes.

Un autre exemple [20] de capteur à antenne bi-bande a été conçu en utilisant la méthode de fabrication sur circuit imprimé (PCB). L'effet des cycles thermiques sur des antennes patch placées sur différents substrats métalliques a été étudié pour analyser leur réponse à la température Figure 1.6. Les variations de la fréquence de résonance de l'antenne ont été corrélées aux mesures effectuées par thermocouple. En évaluant l'impact de la température sur cette fréquence de résonance, l'antenne microstrip proposée fonctionne comme un capteur de température

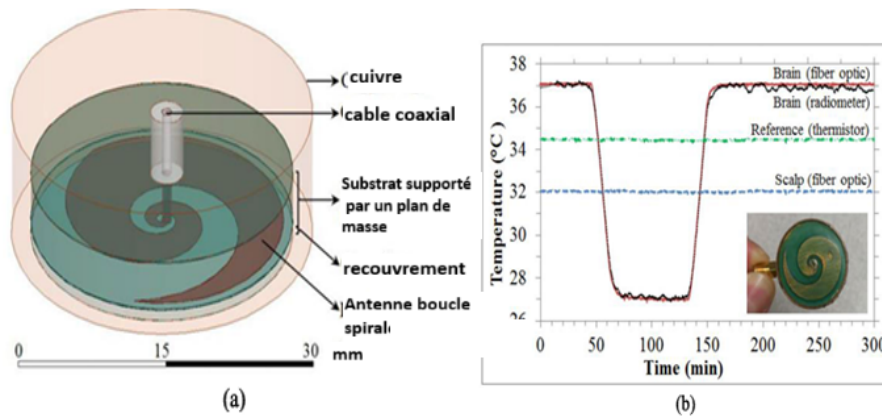


FIGURE 1.5 – l’antenne patch spirale réalisé dans [19] (a) Conception d’un capteur patch en spirale logarithmique avec extrémités effilées. (b) Température mesurée du fantôme de cerveau sur une période de 4,5 heures

Ce capteur présente plusieurs avantages tel que faible coût de fabrication, capacité de surveillance à distance sans fil, et possibilité de fonctionnement sur de longues distances. Ces caractéristiques le rendent particulièrement intéressant pour les applications de télémessure et de surveillance thermique en temps réel.

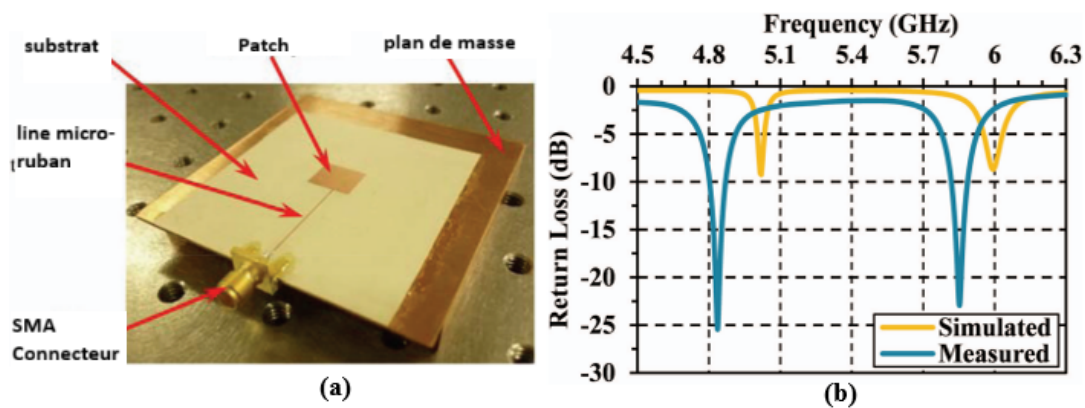


FIGURE 1.6 – Échantillon de test avec un capteur de température à antenne fixé sur une base en cuivre étudiée dans [20] (a) fabrication d’antenne étudiée. (b) Comparaison entre les courbes S11 simulées et mesurées du capteur d’antenne [20]

1.4.2 Antenne capteur diélectriques (permittivité relative)

Les antennes patch ainsi que divers types d’antennes planaires classiques constituent des options viables pour représenter un capteur diélectrique à base d’antenne. Le choix d’un matériau de superstrat spécifique dépend du paramètre à mesurer ciblé tels que l’humidité, PH, les gaz, le sucre, le sel, etc. Le substrat peut être fabriqué à partir de divers

matériaux, par exemple des nanotubes de carbone pour la détection de gaz, des polymères pour l'humidité, ou encore un matériau textile comme le jeans pour la détection de la glycémie [17]-[21]. La constante diélectrique effective (ou permittivité relative) du capteur d'antenne est déterminée à la fois par le superstrat et le substrat [17]-[22]. Un exemple d'une antenne capteur de PH celui étudiée dans [23], les auteurs ont proposé une antenne ultra-large bande (UWB) miniaturisée à résonateur en anneau fendu hexagonal (HSRR), comme illustré à la Figure 1.7. Cette conception intègre deux résonateurs annulaires à haute vitesse couplés (HSRR) ainsi qu'un résonateur carré en anneau fendu (SSRR) couplé, permettant ainsi la miniaturisation, l'augmentation de la longueur électrique et un meilleur couplage des caractéristiques essentielles pour les applications de détection du PH. L'intégration d'une cellule unitaire de métamatériau dans la structure de l'antenne contribue à améliorer les performances UWB, couvrant une plage de fréquences de 3 à 20 GHz, tout en réduisant considérablement les dimensions globales. L'antenne capteur proposée atteint une bande passante fractionnaire de 146,9 % et un rapport bande passante/dimension de 31,83 %. Elle présente une efficacité globale d'environ 70 % et un gain réalisé de 3,88 dB. Cette conception permet d'améliorer efficacement le gain et la bande passante tout en maintenant une taille compacte, répondant ainsi aux exigences fondamentales des antennes-capteurs d'utilisés pour la détection du pH.

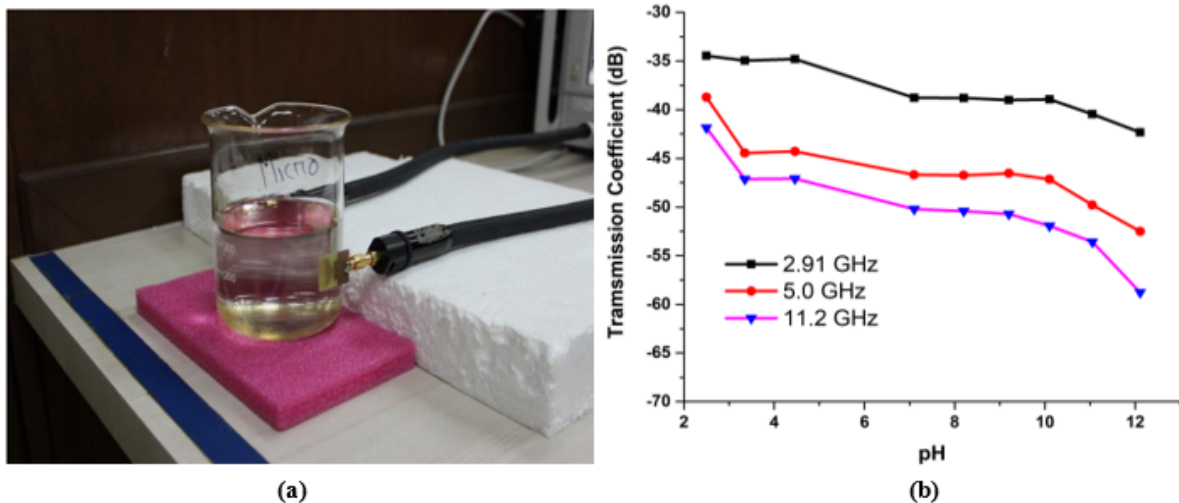


FIGURE 1.7 – l'antenne-capteur de PH étudiée dans [23] (a) Prototype de mesure du capteur d'antenne proposé, et (b) coefficient de transmission valeurs de pH mesurées à trois points de fréquence différents

1.4.3 Antenne capteur fissure

Les fissures sont des indicateurs évidents de dégradation structurelle ; leur surveillance est donc essentielle pour prévenir tout effondrement catastrophique. En effet, pour garantir l'intégrité structurelle d'un bâtiment, il est indispensable de connaître la longueur, la direction et la position de la fissure , car celle-ci peut s'étendre selon n'importe quel de ces trois axes [17]-[24]. Les variations de la fréquence de résonance peuvent indiquer non seulement la direction de propagation de la fissure, mais également la vitesse à laquelle elle progresse. Les décalages de fréquence de résonance dus aux contraintes mécaniques et aux variations de température sont, dans la majorité des cas, moins significatifs que ceux provoqués par les fissures détectées par les antenne-capteurs [17]-[25].

1.4.4 Antenne capteur mécaniques

La déformation est la constante physique la plus cruciale pour mesurer l'altération d'un matériau [26]-[27]. Le suivi de la stabilité structurelle des composants d'ingénierie repose sur leur capacité à conserver leur forme initiale. Il existe deux types de déformations : la déformation de cisaillement et la déformation normale. Le cisaillement est généralement plus critique que la flexion. Le premier peut être détecté par l'écart de l'angle par rapport à sa valeur initiale de 90° , tandis que le second est déterminé par la variation proportionnelle entre la taille actuelle de la structure et sa taille d'origine. Dans [26]-[28], les auteurs illustrent le principe fondamental de fonctionnement d'un capteur à antenne pour la détection du cisaillement. À cette fin, une antenne patch dotée d'une fente dans le plan de masse est utilisée afin de mettre en évidence l'influence du cisaillement sur le comportement de l'antenne. La fréquence de fonctionnement de l'antenne peut être désaccordée en modifiant certaines caractéristiques effectives, comme le paramètre « d », qui constitue un élément de la structure de l'antenne [26]-[29]. Il est également important de noter que le capteur de déformation est de petite taille afin d'assurer une résolution spatiale précise [26]-[27].

1.5 Les antennes à fonction graphique

Ces dernières années, le développement des antennes ornées de motifs célèbres, tels que les logos de sociétés et de compagnies mondialement connue, a connu d'énormes

progrès. Les antennes ornementées sont devenues un choix populaire pour les entreprises souhaitant se démarquer visuellement et renforcer leur image de marque sur les vêtements. Les progrès technologiques dans le domaine de l'impression ont permis de reproduire les antennes motifs avec une grande précision. Les chercheurs rivalisent pour concevoir une grande variété d'antennes décoratives, afin d'offrir un choix large aux consommateurs tout en garantissant des communications sans fil fiables et performantes, et en utilisant des logos visuellement reconnaissables. Un exemple de ceci est celui qui a été étudié dans [30]. Dans cette étude, les auteurs ont présenté deux nouveaux prototypes d'antennes textiles. La géométrie de ces antennes a été conçue pour imiter les logos de deux marques célèbres, la marque de vêtements française LACOSTE et la marque américaine APPLE. Les deux prototypes ont été fabriqués en utilisant un textile non tissé conducteur sur une couche de jeans avec une permittivité $\varepsilon_r = 1.3$. Ils ont été optimisés pour fonctionner à la fréquence de 1,8 GHz. Les prototypes ainsi obtenus résistent au lavage et au repassage et sont bien adaptés pour être intégrés dans les vêtements. D'après les données expérimentales, les antennes proposées présentent de bonnes performances à la fréquence de fonctionnement de 1,8 GHz. L'antenne APPLE a une bande de fréquence d'environ 70 % et un diagramme de rayonnement bidirectionnel avec une directivité maximale à 1,8 GHz de 3,18 dBi. L'antenne LACOSTE a une bande de fréquence d'environ 20 % et un diagramme de rayonnement directive avec un maximum de directivité à 1,8 GHz de 4,55 dBi.

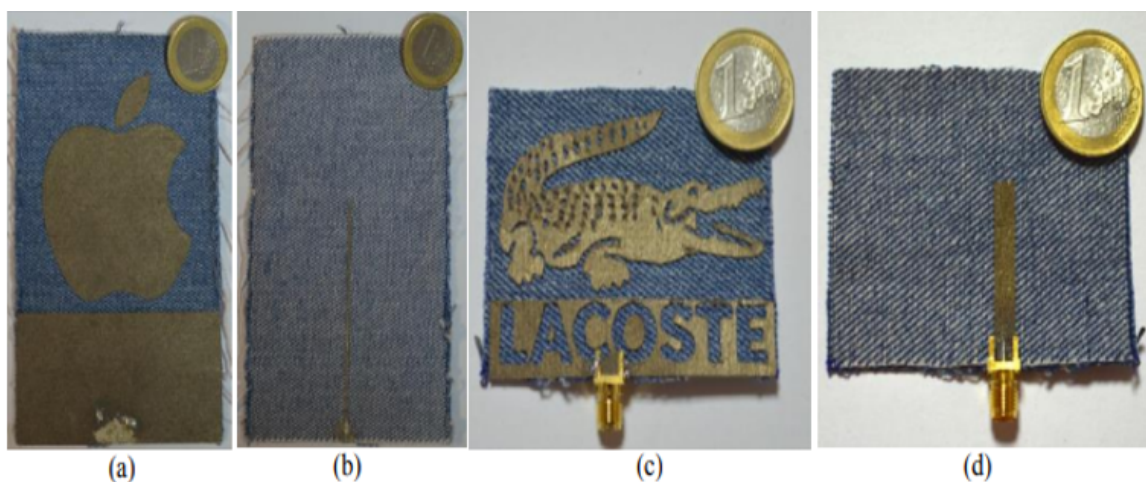


FIGURE 1.8 – Structures des antennes étudiée dans [30], (a) vue de face de motifs APPL, (b) vue de dessous de motifs APPLE, (c) vue de face de motifs LACOSTE et (d) vue de dessous du motifs LACOSTE

Dans [31], une autre structure a été réalisée sur un substrat flexible, Cette étude

présente une antenne portable textile destinée à un système de suivi anti-vol basé sur le GPS-GSM, conçu pour être intégrée dans des vêtements de luxe et des accessoires de bagagerie haut de gamme comme les sacs en cuir. Pour évaluer la faisabilité de cette solution, une antenne prototype a été conçue en imitant la forme d'un logo de Levis Strauss et Co a été fabriquée à partir d'un tissu non tissé conducteur, appliqué sur une couche de cuir. Afin d'assurer une couverture simultanée des bandes GPS L1 et GSM-1800 avec un seul élément rayonnant, des diodes PIN ont été utilisées pour reconfigurer la fréquence de fonctionnement de l'antenne. Les résultats expérimentaux présentés démontrent la faisabilité de cette approche de conception .

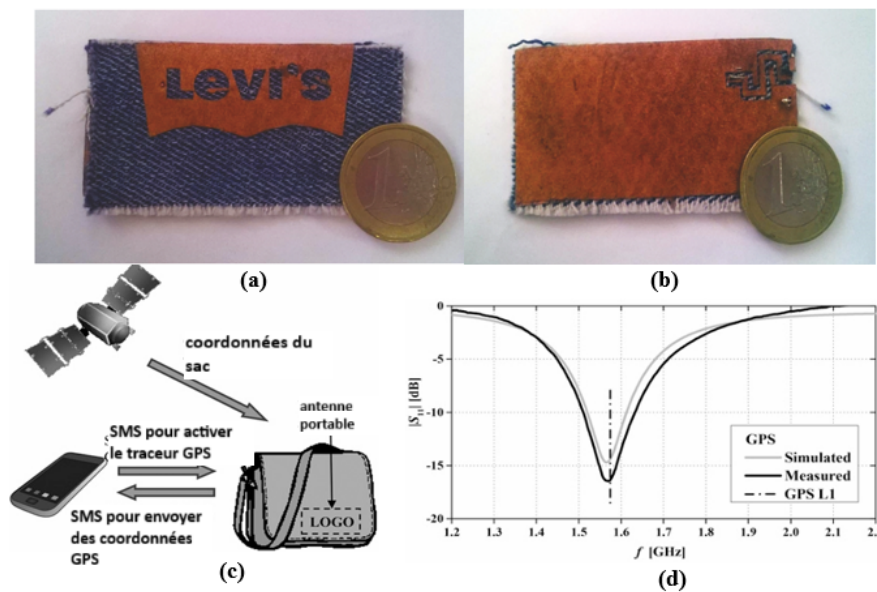


FIGURE 1.9 – Structures des antennes étudiée dans [31], (a) et (b) Logo du Levi Strauss et Co , (c) Schématisation d'un système de suivi basé sur le GPS et le GSM, et (d) coefficient de réflexion du prototype étudiée dans [31]

Jinpil Tak *et al.* présente une nouvelle structure dans [32], Le logo de la marque de vêtements Louis Vuitton a été présenté où il a été utilisé le cuir comme un substrat avec une permittivité $\epsilon_r = 2.5$ et un tangente de perte $\tan \delta = 0.035$. l'antenne est destiné pour fonctionner dans la bande ISM 2.45 GHz ainsi que dans la bande de 4,5 GHz. Une bande de fréquence obtenus de 17% et un gain de -0.29 dBi respectivement pour la bande inférieur , et de 13 % et de 3,05 dBi, respectivement, pour la bande de fréquences supérieure. Cette antenne Louis Vuitton est un bon candidat pour les communications sans fil et les applications antivol pour les dispositifs portables tels que les sacs de luxe.

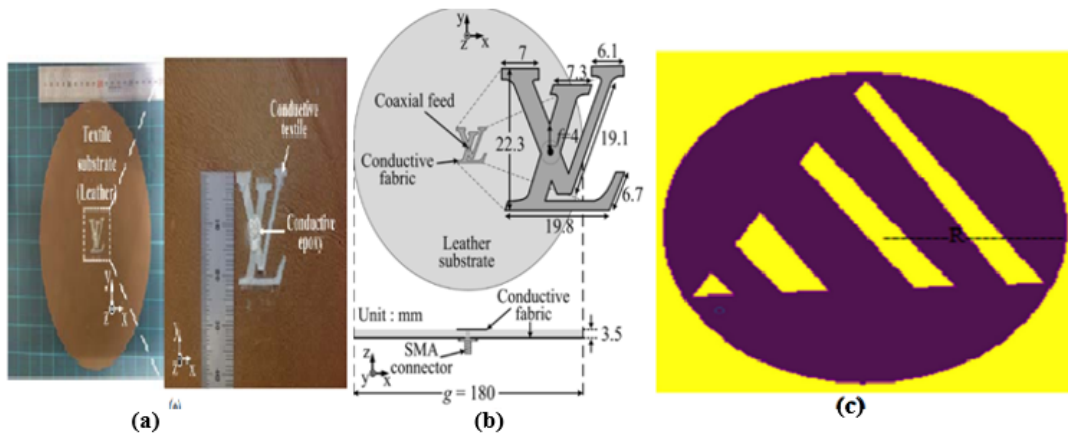


FIGURE 1.10 – Géométrie des antennes proposées : (a) l'antenne fabriquée de Luis Vitton [32] , (b) le schéma d'antenne Luis Vitton [32] , (c) le schéma d'antenne Adidas[33]

On peut également trouver des antennes comportant des logos, mais sur des substrats solides et non pas textile. Cependant, la limitation majeure de cette catégorie est que ces antennes ne sont pas flexibles et ne conviennent pas aux flexions, ce qui rend leur fixation sur les vêtements très difficile . Par exemple, l'étude [33] a présenté une antenne multi-bande (UWB) pour la marque de vêtements Adidas (figure 1-10-c), réalisée avec un substrat en FR4 epoxy. De même, dans [34] (Figure 1.11), l'antenne conçue pour le logo de la société internationale d'automobiles Mercedes-Benz fonctionne dans la bande 2,45 GHz (pour les applications WBAN) avec un substrat en FR4.

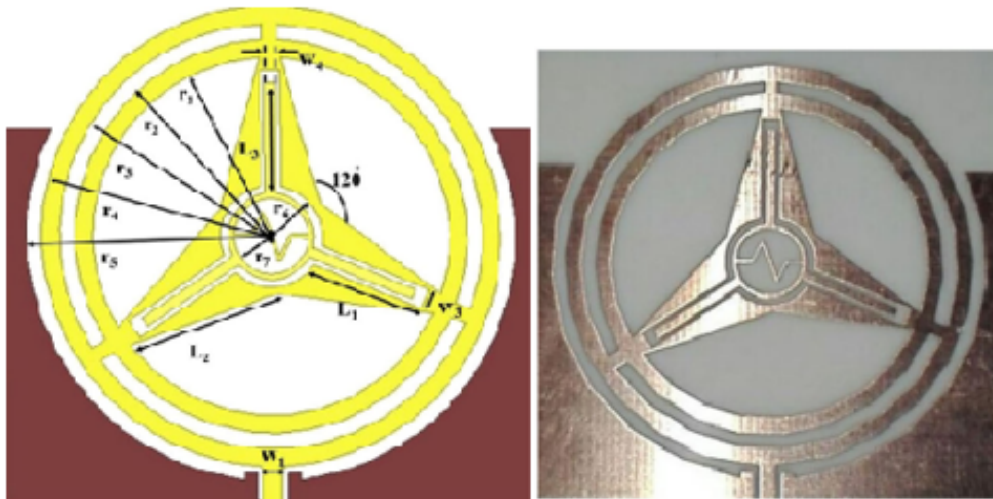


FIGURE 1.11 – géométrie des antennes proposée dans [34]

Un autre exemple des logos automobiles proposé dans [35]. Dans cette étude, une antenne UWB a été conçue sur un substrat semi-transparent. L'antenne, destinée à être montée sur le pare-brise, adopte un élément radiateur inspiré du logo de NISSAN, de manière à ne pas altérer l'apparence du véhicule. Le plan de masse est de forme rectangulaire, et une alimentation par guide d'onde coplanaire (CPW) est utilisée pour faciliter l'intégration et obtenir une large bande d'impédance. Ce type d'antenne, sous forme de logo automobile, constitue un excellent choix pour les communications sans fil, ainsi que pour les applications de sécurité telles que le suivi et la localisation des véhicules en cas de vol.

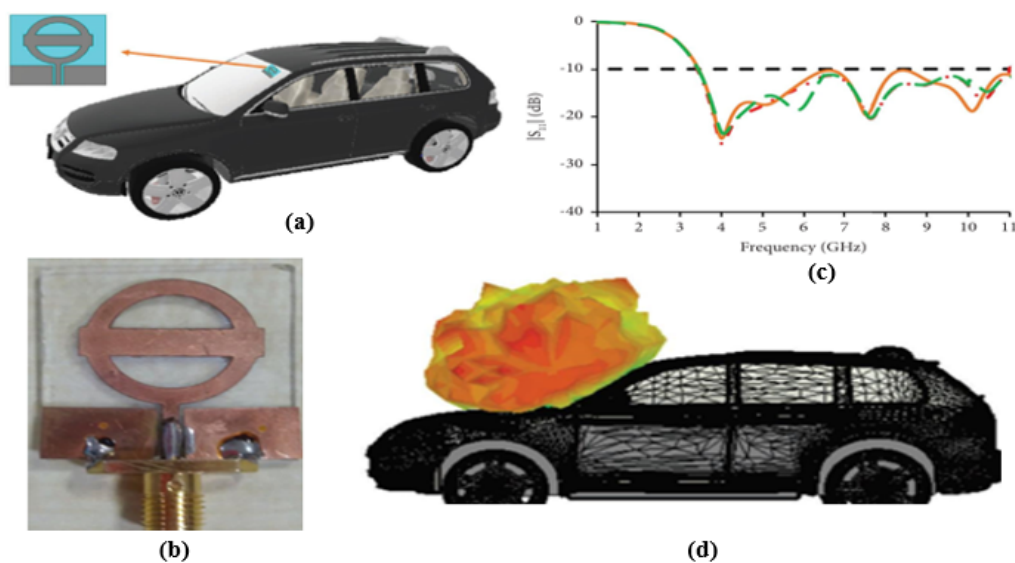


FIGURE 1.12 – prototype d'antenne de logo NISSAN proposé dans [35], (a) placement de l'antenne sur le pare-brise du voiture, (b) l'antenne fabriqué, (c) le coefficient de réflexion de l'antenne proposée, (d) diagramme de rayonnement 3D d'antenne proposée placé sur le pare-brise du voiture

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu global des antennes augmentées, qui se distinguent des antennes conventionnelles par l'intégration de fonctionnalités supplémentaires visant à améliorer leurs performances ou à répondre à des besoins spécifiques. Ces antennes vont au-delà de la simple transmission et réception des ondes électromagnétiques, en incorporant des capacités telles que la récolte d'énergie, la détection de paramètres physiques ou environnementaux, ou encore l'intégration discrète dans des objets du quotidien à travers des formes graphiques. Nous avons présenté en détail trois

grandes catégories : les rectennas, conçues pour la récupération et la conversion d'énergie radio-fréquence ; les antennes capteurs, utilisées pour la mesure de grandeurs physiques comme la température, la déformation ou les fissures ; et les antennes intégrant des motifs graphiques, telles que les logos, qui allient esthétique et fonctionnalité. Pour chacune de ces catégories, des exemples issus de la littérature scientifique ont été présentés afin d'illustrer les avancées technologiques dans ce domaine. L'intégration de motifs graphiques dans les antennes textiles constitue un véritable défi en termes de conception et d'optimisation, et c'est précisément. Cette problématique a motivé notre choix d'orienter notre travail de thèse vers le développement de cette nouvelle génération d'antennes augmentées. Dans la continuité de cette réflexion, le chapitre suivant s'intéressera plus particulièrement aux antennes textiles intégrées aux vêtements, en mettant l'accent sur leur évolution, leurs domaines d'application, leurs méthodes de fabrication ainsi que leurs performances au voisinage du corps humain. Cette revue permettra de poser les bases nécessaires pour la conception des antennes développées dans le cadre de ce travail

Chapitre 2

Aperçu sur les antennes portables attachées aux vêtements

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur l'évolution des antennes intégrées aux vêtements dans différents domaines d'application, en particulier dans les communications sans fil à courte portée, telles que les systèmes de communication centrés sur le corps humain (Wireless Body Area Networks ou WBANs). Nous examinons également les différents scénarios de communication possibles dans un réseau BAN, en tenant compte de l'emplacement de ces antennes dans les vêtements intelligents.

Ensuite, nous proposons une classification des antennes intégrées aux vêtements, en les regroupant en deux catégories principales. La première catégorie concerne les antennes de type accessoires personnels, telles que les antennes ceintures, fermetures, boutons et bracelets. La deuxième catégorie concerne les antennes patch imprimées sur des substrats textiles, qu'il s'agisse d'antennes à structures simples ou d'antennes brodées, en décrivant les outils utilisés pour leur réalisation (machines et matériaux de broderie). Nous présentons la conception de toutes ces antennes, leurs domaines d'utilisation, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Par la suite, nous détaillons les principales caractéristiques des matériaux textiles utilisés dans la conception des antennes intégrées aux vêtements, en mettant particulièrement l'accent sur deux paramètres principaux : la permittivité et la tangente de perte. Cette section se conclut par un tableau récapitulatif des caractéristiques des antennes étudiées dans cette revue.

Une dernière partie détaille les performances des antennes intégrées aux vêtements

au voisinage du corps humain. Nous abordons en particulier la flexibilité et l'effet sur le corps humain (Débit d'Absorption Spécifique, ou DAS). Finalement, deux tableaux récapitulatifs des performances des antennes étudiées dans cet état de l'art sont présentés

2.2 Antennes portables attachées aux vêtements (vestimentaires)

Les antennes portables ont gagné en popularité ces dernières années grâce à leurs caractéristiques attractives et à leur potentiel pour permettre des communications sans fil légères, compactes, peu coûteuses et adaptables à différents environnements [36]. Le terme antenne portable désigne un système flexible et efficace, porté ou intégré au corps humain, destiné aux communications sans fil dans le contexte des réseaux corporels (WBAN). Outre les exigences liées à la sécurité, à la santé et au bien-être, la conception et la réalisation de ces systèmes revêtent une importance particulière [37].

Les chercheurs manifestent aujourd'hui un intérêt croissant pour les antennes destinées aux communications centrées sur le corps, considérées comme une technologie sans fil en pleine expansion et de plus en plus essentielle dans diverses applications modernes [38]. Ces antennes peuvent être implantées, portées ou intégrées dans des textiles afin de collecter et transmettre des données. Parmi les solutions les plus étudiées, les antennes basées sur les matériaux textiles occupent une place prépondérante [39].

Étant donné que les vêtements font partie du quotidien, il apparaît logique d'y intégrer des dispositifs électroniques afin de créer des vêtements intelligents. Grâce aux antennes portables, les utilisateurs peuvent bénéficier de services sans fil de manière plus confortable et discrète [40, 41]. À mesure que les préoccupations liées à la sécurité personnelle et aux effets sanitaires des technologies augmentent, les antennes portées sur le corps deviennent de plus en plus courantes [42].

Les textiles intelligents trouvent des applications dans de nombreux domaines, notamment le sport, la mode, le secteur militaire et les technologies de la santé [26, 43]. Les principales exigences de ces applications sont la légèreté, le faible coût, la faible maintenance et la facilité d'intégration, ce qui fait des antennes portables une solution particulièrement adaptée [44]. Il est donc essentiel de concevoir des antennes plus petites, plus robustes et plus durables afin de répondre à ces contraintes [45].

L'un des principaux défis des antennes attachées aux vêtements réside dans la stabilité de leurs performances dans un environnement changeant, notamment en raison de la température, de l'humidité, de la proximité du corps humain, d'autres vêtements, ainsi que des cycles de lavage [26, 46].

2.3 Scénarios de communication des antennes portables attachées aux vêtements

Les récentes avancées technologiques ont conduit à l'émergence d'une nouvelle génération d'objets connectés appelés "objets intelligents", ainsi qu'à la mise en place de nombreux systèmes de communication sans fil à courte portée. Parmi ces systèmes, on trouve les réseaux de communication centrés sur le corps humain BAN, qui permettent une communication sans fil via un ensemble d'éléments rayonnants implantés sur ou à proximité du corps humain. Ces éléments sont capables d'échanger des données entre eux, ainsi que de communiquer avec des dispositifs intégrés dans le corps ou situés à proximité de celui-ci [47]. Divers types de liaisons sont donc possibles Figure 2.1, ainsi ils peuvent se faire de 3 façons :

- **Liaisons in-body** : distinguent à un dispositif intégré dans les tissus de d'échanger les informations avec un autre implanté sur le corps ou à proximité ;
- **Liaisons on-body** : caractérisent les échanges entre des dispositifs situés en surface du corps humain ;
- **Liaisons off-body** : permettent les communications entre un dispositif situé sur le corps humain et une station de base ou un autre appareil externe

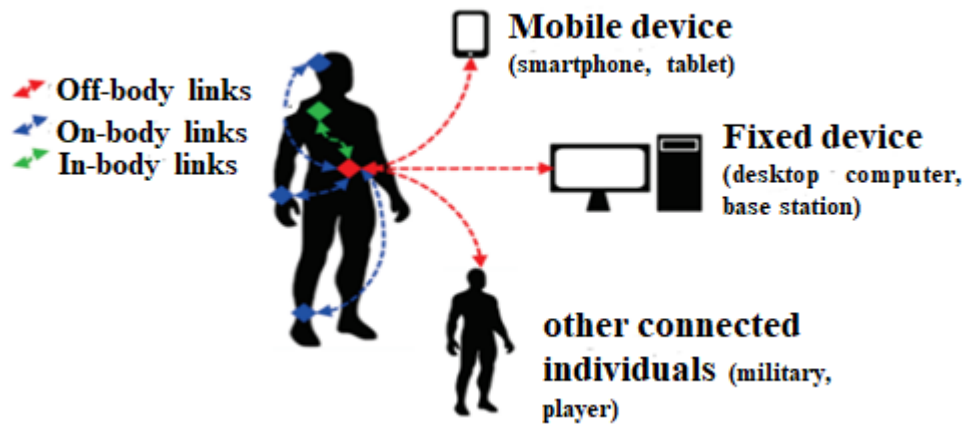


FIGURE 2.1 – Scénarios des communications possibles entre dispositifs BAN [47]

À la suite d’une analyse approfondie des antennes intégrées aux vêtements, il est possible de les regrouper en deux catégories principales. La première catégorie concerne les antennes conçues sous forme d’accessoires personnels (telles que les ceintures, bracelets, boutons, ou fermetures). La seconde catégorie rassemble les antennes de type patch, fabriquées sur des substrats textiles et destinées à être directement intégrées dans la structure du vêtement.

2.4 Applications des antennes portables attachées aux vêtements

L’application des réseaux corporels sans fil (WBAN) s’étend de plus en plus aux services médicaux, à la défense nationale, à l’informatique portable, et etc... . Plusieurs bandes de fréquences ont été attribuées aux systèmes WBAN, telles que la bande du système de communication pour implants médicaux (MICS : 400 MHz), la bande industrielle, scientifique et médicale (ISM : 2,4 et 5,8 GHz) et la bande ultra-large (UWB : 3-10 GHz). Les nombreuses applications des WBAN, incluant le militaire, les soins de santé omniprésents, le sport, le divertissement, et bien d’autres, ont été catégorisées en deux domaines principaux par la norme IEEE 802.15.6. Ces deux domaines sont les applications médicales et non médicales (électronique grand public), comme indiqué dans le Tableau 2.1 [48].

TABLE 2.1 – Applications WBAN médicales et non-médicales.

Catégories	Type	Applications
médicales	WBAN	Militaire et défense
		Professionnel et amateur
		Entraînement sportif
		Stade du sommeil
		Asthme
		Surveillance de santé portable
	Implant WBAN	Contrôle du diabète
		Détection cardiovasculaire
		Détection du cancer
	Contrôle à distance des dispositifs médicaux	Assistance à la vie ambiante (AAL)
		Surveillance des patients
		Systèmes de télémédecine
Non-médicales		Diffusion en temps réel
		Applications de divertissement
		Urgence (non médicale)
		Détection des émotions
		Authentification sécurisée
		Partage d'informations personnelles

2.5 Les antennes de type accessoires personnels

Les antennes accessoires personnels sont des dispositifs d'antennes intégrées à des accessoires tels que les montres, les ceintures, les fermetures de vêtements, les sacs à main ou les boutons. Ces antennes sont de plus en plus importantes avec la popularité croissante des dispositifs électroniques portables. Les antennes d'accessoires personnels sont conçues

pour être à profil bas, esthétiquement plaisantes et fiables pour la communication sans fil. [49].

2.5.1 Antenne ceinture

La première antenne en boucle intégrée à une ceinture a été présentée pour la première fois en 2008. [50] dans la littérature . La conception est illustrée à la Figure 2.2. Cette conception d'antenne à boucle de ceinture utilise une boucle de type "Tongue buckle" pour créer une antenne en utilisant un principe similaire à celui d'une antenne à boucle ordinaire. Le jean a été utilisé comme un substrat avec une permittivité $\varepsilon_r = 1.4$. Cette antenne a atteint un gain mesuré de plus de 1 dBi dans les bandes de 2,45 GHz et 5,25 GHz.

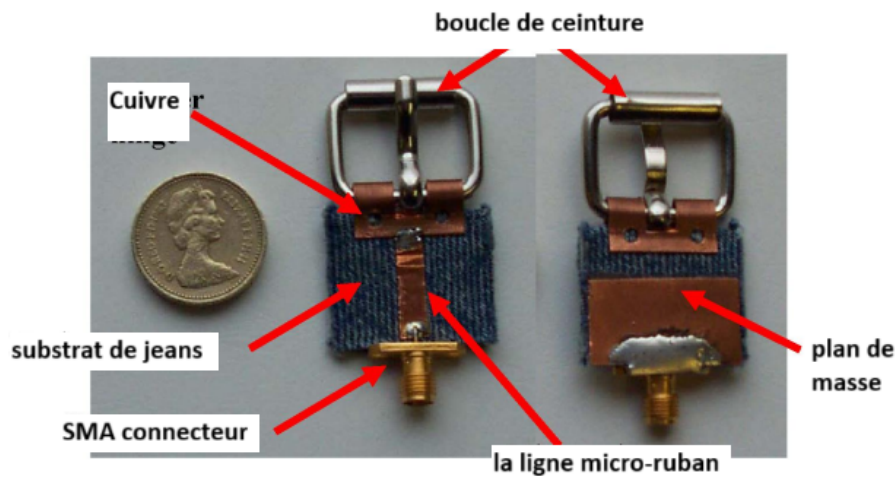


FIGURE 2.2 – La première antenne de type ceinture proposée [50]

Après cela, le développement de ces types d'antennes a suscité une grande attention des chercheurs. Un autre exemple de ce type d'antenne est celle développée dans [51] Figure 2.3. Ce travail présente une conception d'antenne de type ceinture destiné pour fonctionner dans les deux bande de GSM (900 MHz-1800 MHz) . Le substrat de cuir a été utilisé ($\varepsilon_r = 2.95$ et $\tan \delta = 0.16$). l'antenne a été conçue et testée dans un scénario de port, incluant l'influence de l'utilisateur humain. Un autre exemple bien développé est celui réalisé par Rui Pei *et al.* [52]. Dans ce travail une antenne ceinture à double bande , visant les applications Bluetooth (2,45 GHz) et Wi-Fi (2,45 / 5,2 / 5,8 GHz) basée sur une boucle à broche, comme illustré dans la Figure 2.3.(b) et (c). Pour ce type de ceinture,

il y a une broche à l'arrière de la boucle, qui s'accroche à une encoche dans le cuir ($\varepsilon_r = 2.9$ and $\tan \delta = 0.08$) de la ceinture pour maintenir celle-ci en place. La conception proposée utilise la boucle et la broche comme élément rayonnant. De plus, une couche de fibre conductrice est fixée au cuir pour fournir une isolation au corps humain et fonctionne comme un plan de masse pour la plaque. le fonctionnement de l'antenne a été testé au niveau du corps humain dans les positions de debout et assie. Elle a également été testée dans des situations de pliage et de déformation de sa structure (200 mm et 250 mm de coude). Une limite de cette étude est que le rendement observée reste relativement faible (environ 40 %).

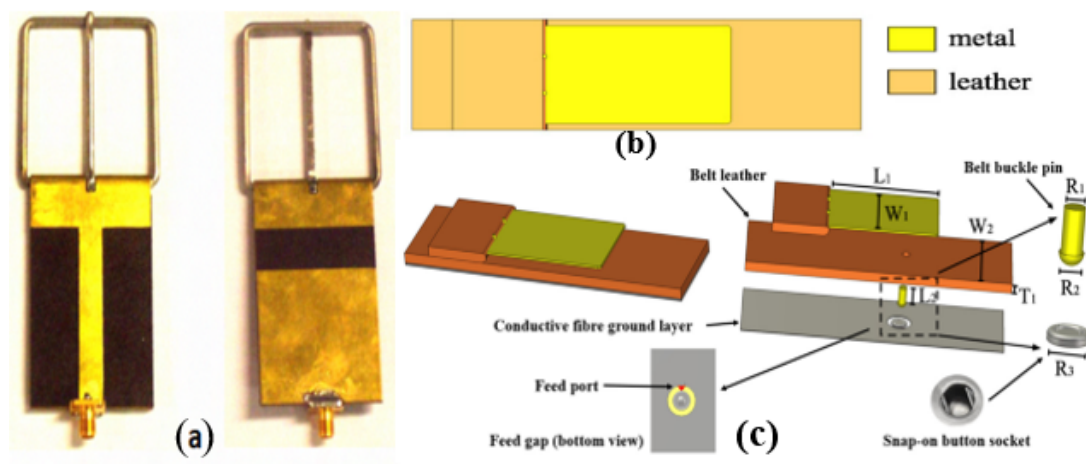


FIGURE 2.3 – La conception d'antenne de type ceinture proposée, (a) l'antenne réalisée par[51],(b-c) prototype réalisé par[52].

Le même groupe de recherche qui a mené l'étude précédente [52] a réalisé sur une autre antenne du même type. Ils ont conçu une nouvelle structure (Figure 2.4) qui vise à fonctionner dans la bande ISM (industrielle, scientifique et médicale) à 2,45 GHz [53]. Dans cette étude, les auteurs ont centré leur attention sur l'effet du corps humain sur cette antenne. en utilisant la technique EBG (Electromagnetic Band Gap) pour réduire la valeur du DAS et pour augmenter le Gain. Cette méthode permet de réduire l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par l'antenne, en particulier dans les zones proches du corps humain.

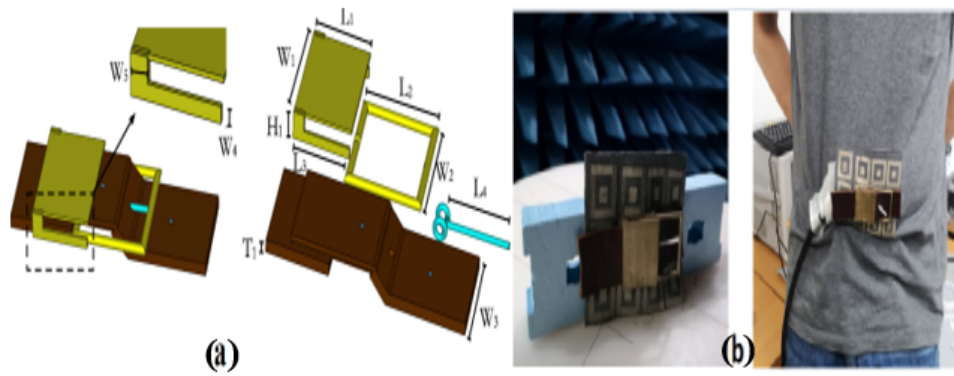
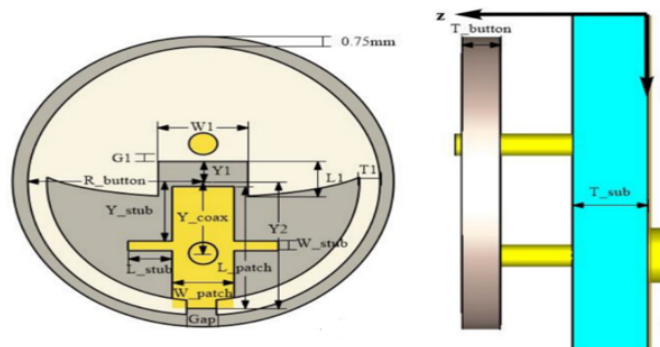


FIGURE 2.4 – l’antenne proposée dans [53]. (a) la géométrie d’antenne, (b) la réalisation d’antenne avec un EBG.

2.5.2 Antenne de type bouton

L’antenne bouton est un très bon exemple pour les antennes accessoire personnel. Elle est considérée comme la technologie la plus confortable dans l’application de WBAN car elle peut être facilement intégrée dans les vêtements humains et offre des performances stables grâce à sa rigidité [54]. le rendement obtenue à partir de l’antenne bouton est généralement plus élevée car elle utilise des conducteurs normaux pour la fabrication [55]. Les chercheurs se sont concentrés sur le développement de nombreux types d’antennes bouton adaptées à l’application WBAN. Dans [54], Un nouveau type d’antenne bouton bi-bande est proposé. Il présente deux types de diagramme de rayonnement différents, l’un dans la bande 2,4 GHz pour les communications sur le corps et l’autre dans la bande 5 GHz pour les communications hors du corps humain (Figure 2.5).



Dans [56], Une antenne bouton métallique à double bande a été conçue et présentée pour assurer une résonance correspondant aux bandes de fréquences utilisées par les applications WLAN et HiperLAN/2. Cette antenne (Figure 2.6) de grande taille offre une bande passante étroite à haute fréquence lorsqu'elle est testée sur le corps.

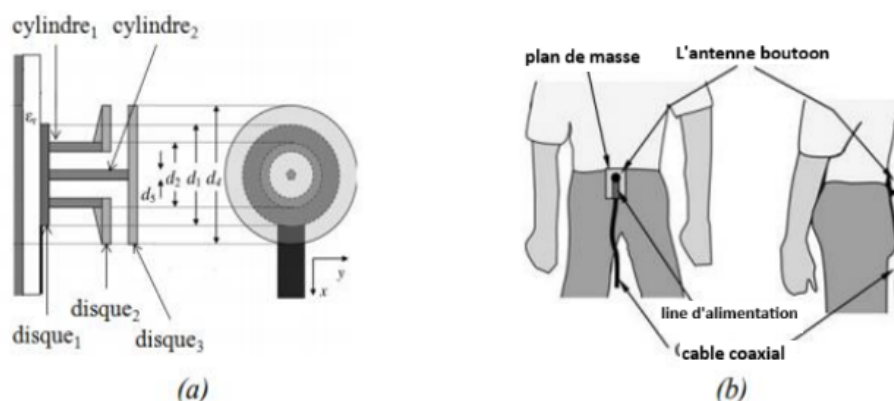


FIGURE 2.6 – Géométries d'antenne bouton proposé dans [56] (a) Structure de l'antenne bouton. (b) Position de l'antenne par rapport au corps humain .

Un autre exemple d'antenne dipôle en forme de bouton [57] utilisée comme étiquette RFID permet une intégration facile dans les vêtements à des fins d'identification, mais elle est limitée à une seule bande d'application (Figure 2.7). Dans [58], l'antenne bouton de profil élevé a été présentée pour la communication centrée sur le corps. Cependant, ces antennes [57, 58] donnent une faible valeur de gain lorsqu'elle est testée sur le corps.

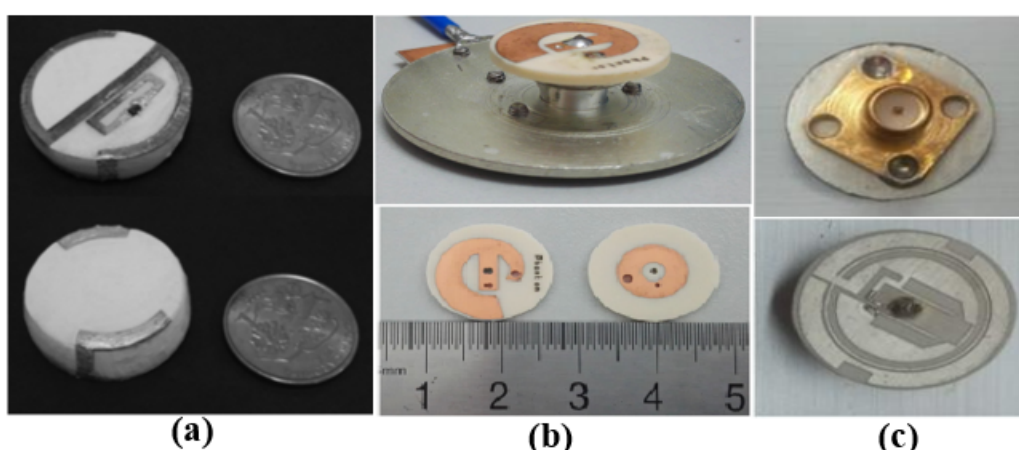


FIGURE 2.7 – Géométries des antennes bouton proposée : (a) fabrication d'antenne dans [57], réalisation du prototype dans (b) [58] et (c) l'antenne bouton fabriqué dans [59].

Une nouvelle antenne miniaturisée de type bouton pour triple bandes de fréquences est proposée dans [59]. Les bandes de fréquences sont 0,867 GHz, 2,38 GHz et 5,8 GHz. La présence d'un plan de masse complet derrière l'antenne permet d'obtenir un diagramme de rayonnement directionnel adapté à la communication OFF body. De plus, ce plan de masse joue un rôle important pour la réduction de la valeur du SAR. Les performances de cette antenne sont meilleures que celles des antennes précédentes [57] et [58].

2.5.3 Antenne fermeture éclair

Ce qui est connu pour les antennes accessoires, on cherche généralement à utiliser les structures métalliques rigides des accessoires de la vie quotidienne comme l'élément rayonnant principal de l'antenne. Un bon exemple pour les antennes de type fermeture est celui étudié dans [60]. Un gain de 5 dB à 2,44 GHz a été obtenu grâce à la forme, la taille et la nature métallique de la fermeture éclair. La conception détaillée de l'antenne est présentée dans la Figure 2.8.

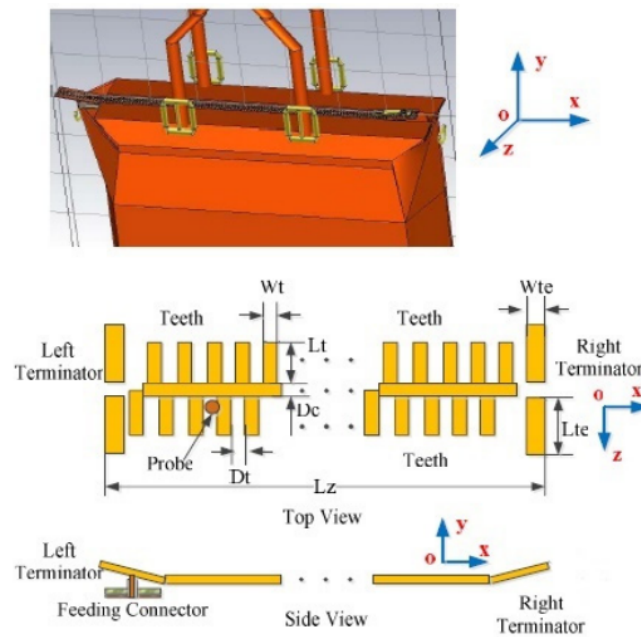


FIGURE 2.8 – Géométrie de l'antenne à fermeture éclair de sac à main proposée dans [60].

La conception de l'antenne à fermeture éclair révèle une limitation majeure pour les antennes d'accessoires métalliques. La forme et la taille de la structure de l'antenne doivent être très similaires à celles de l'accessoire d'origine pour maintenir sa fonctionnalité. Dans ce cas, la forme des dents et de la poignée de la fermeture éclair, ainsi que la longueur

totale de la fermeture éclair, sont inchangées par rapport à la conception originale du sac à main.

2.5.4 Antenne bracelet de montre

Une antenne de type bracelet de montre en métal a été étudiée dans [61] avec des études de paramètres portant sur la largeur du bracelet, le motif graphique du bracelet, les points d'alimentation ainsi que l'impact du bras et de la main (Figure 2.9). Les résultats ont montré que la fréquence de fonctionnement peut être modifiée en déplaçant le point d'excitation sur le bracelet. Cette antenne a une faible sensibilité à la largeur et à la forme du bracelet, et elle présente de légères hausses et baisses, ce qui la rend adaptée aux systèmes sans fil sur le corps. Cependant, sa taille électrique est assez grande par rapport aux types d'antennes intégrées (ou textiles), ce qui en fait un bon candidat pour les applications d'Internet des objets (IoT), de réseaux centrés sur le corps, de détection sans fil, de communications ainsi que de partage de données, etc.

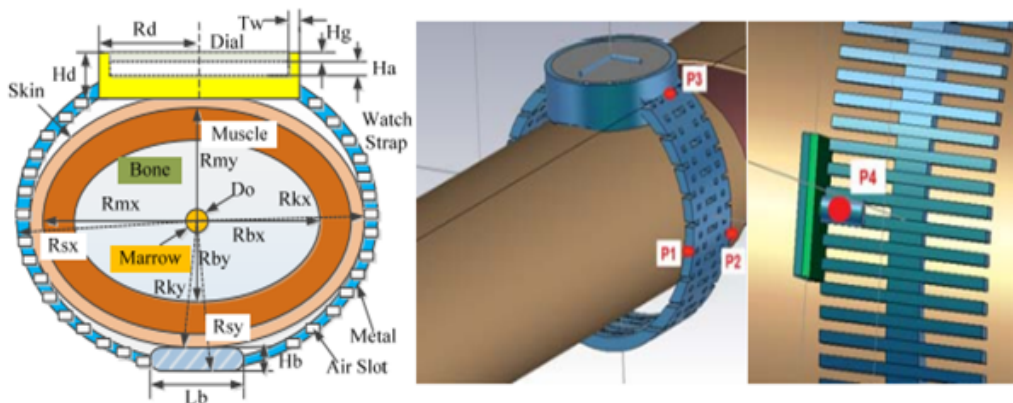


FIGURE 2.9 – Géométrie de l'antenne bracelet de montre étudiée dans [61].

2.6 Les antennes patch Textiles

Depuis 1999, les antennes textiles ont suscité un grand intérêt dans la littérature scientifique, et de nombreux travaux ont été réalisés. Il existe de nombreuses technologies permettant de réaliser des antennes sur des textiles. Ces antennes peuvent être imprimées ou brodées sur un substrat souple à l'aide de machines avancées, ou être assemblées avec

des électro-textiles et des adhésifs conducteurs. Il convient de noter que différents matériaux textiles conducteurs (ruban de cuivre (scotch de cuivre), Taffetas de cuivre, Shieldit, etc.) peuvent donner lieu à des performances d'antenne différentes [47]. La Figure 2.10 présente les différents types de conducteurs textiles utilisés dans la littérature. Les antennes textiles jouent un rôle majeur dans le développement des dispositifs portables, sans lesquelles le système dans son ensemble est incomplet. Les antennes textiles les plus couramment conçues sont les antennes patch microstrip, soit brodées, soit imprimées, car leur réalisation est plus facile que celle d'autres types d'antennes. Les principaux défis de conception des antennes textiles résident dans la fabrication de la structure. [62, 63].



FIGURE 2.10 – Différents matériaux conducteurs utilisés.

2.6.1 Les antennes imprimées sur un substrat textile

Ces types d'antennes sont les plus courants et les plus largement utilisés. Les chercheurs se sont concentrés sur le développement de nombreuses variantes structurales de ce type d'antenne, adaptées à différentes applications et utilisations. Un grand nombre de recherches ont été menées sur ce type d'antenne [62, 63].

Dans [64], une étude présente la conception d'une antenne patch textile double bande destinée à fonctionner dans les bandes GSM-900 et 1800. L'antenne patch polygonale proposée est basée sur la technique des fentes ; elle comprend une fente circulaire et des fentes verticales intégrées sur un substrat de jean ($\epsilon_r = 1.7$ et $\tan \delta = 0.025$). Cette antenne est limitée en termes de grande taille, constituant un inconvénient par rapport aux autres antennes de même performance mais de taille plus petite.

Une miniaturisation d'une antenne textile en forme de E inversé pour les applications médicales est présentée dans [65-67]. Dans [65], une antenne textile portable compacte et

de faible profil est proposée et vérifiée expérimentalement. La technique d'ajout de fentes rectangulaires a été appliquée au niveau du patch pour obtenir la bande 2.4 GHz. La taille de cette antenne est miniaturisée de 75% par rapport à une antenne conventionnelle. Pour évaluer la capacité de l'antenne à s'adapter aux déformations des vêtements, plusieurs scénarios de flexion horizontale et verticale ont été testés.

Un autre exemple est celui étudié dans [67], qui présente une antenne dipôle textile en forme de E, développée pour les applications IoT (Internet des Objets), comme l'illustre la Figure 2.11. Bien que compacte (ou relativement petite), cette antenne est très confortable pour l'utilisateur. Cette conception permet son intégration aisée dans les vêtements, tout en assurant une durabilité et des performances robustes dans des conditions de flexion variées. La caractéristique semi-omnidirectionnelle du diagramme de rayonnement offre une transmission et une réception de données efficaces lorsque l'utilisateur se déplace dans les plans de propagation xz et yz. Cependant, la principale limitation de cette antenne est qu'elle nécessite une surface plane pour son placement, cette surface demeurant relativement large.

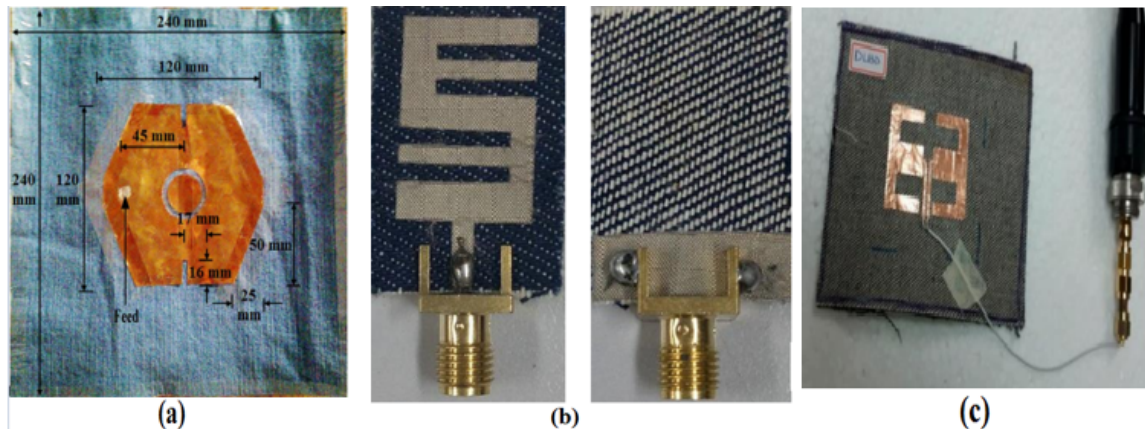


FIGURE 2.11 – Structures des antennes étudiées, (a) [64], (b) [65] et (c) [67].

En plus du jeans, qui est le plus couramment utilisé, de nombreux types de substrats textiles sont également utilisés, tels que le cuir, le feutre, le toison et le coton. Dans [68], une antenne coplanaire portable intégrée à une surface EBG fonctionnant à deux bandes de fréquences d'intérêt pour les communications de réseaux sans fil est présentée (Figure 2.12). L'antenne intégrée est à des bandes passantes de fonctionnement de 4 % à 2,45 GHz et de 16 % à 5,5 GHz. Le feutre utilisé comme substrat avec ($\epsilon_r = 1.38$ et $\tan \delta = 0.023$). Un autre type de substrat est celui présenté dans [69], Le toison ($\epsilon_r = 1.6$ et $\tan \delta = 0.025$)

est utilisé pour une antenne avec conducteur magnétique artificiel (AMC) pour améliorer la transmission entre les antennes corporelles.

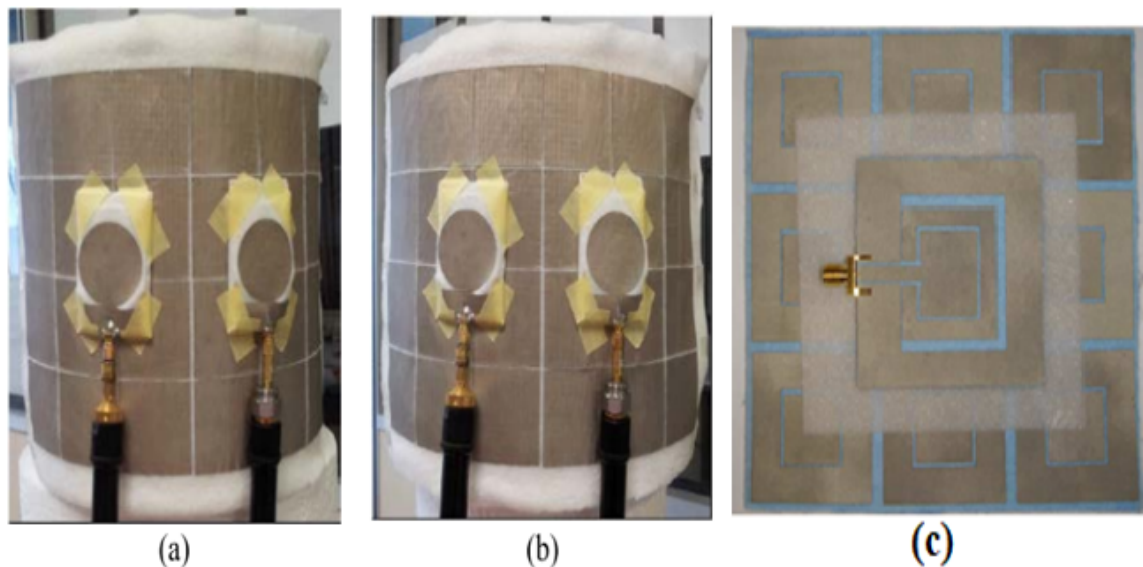


FIGURE 2.12 – Structure des antennes étudiées, (a) et (b) fabrication d'antenne proposée dans [68], (c) l'antenne proposée dans [69]

2.6.2 Les antennes brodées

Les antennes brodées sont une technologie intégrée aux vêtements qui consiste à broder des fils conducteurs dans les vêtements pour créer des antennes textiles flexibles et entièrement portables. Le processus de broderie consiste à numériser et à programmer le dessin de l'antenne pour une machine à broder, qui brode ensuite les fils conducteurs sur un substrat textile non conducteur. Les fils conducteurs sont utilisés pour créer des antennes perlées (ou à motif de perles), ce qui peut être difficile en raison des exigences de précision [70]. Les fils conducteurs les plus couramment utilisés pour les antennes brodées sont les fils d'or, d'argent et de cuivre.

Le procédé de broderie requiert ainsi l'utilisation de machines avancées à commande numérique, capables d'assurer une grande exactitude dans la réalisation du motif de l'antenne, comme illustré à la Figure 2.13. Ces fils se caractérisent par leurs propriétés électriques à haute fréquence, ce qui les rend idéaux pour une utilisation dans différents types d'antennes brodées. Ces antennes sont spécialement conçues pour les étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID) et sont optimisées pour une performance optimale dans ce domaine [71].

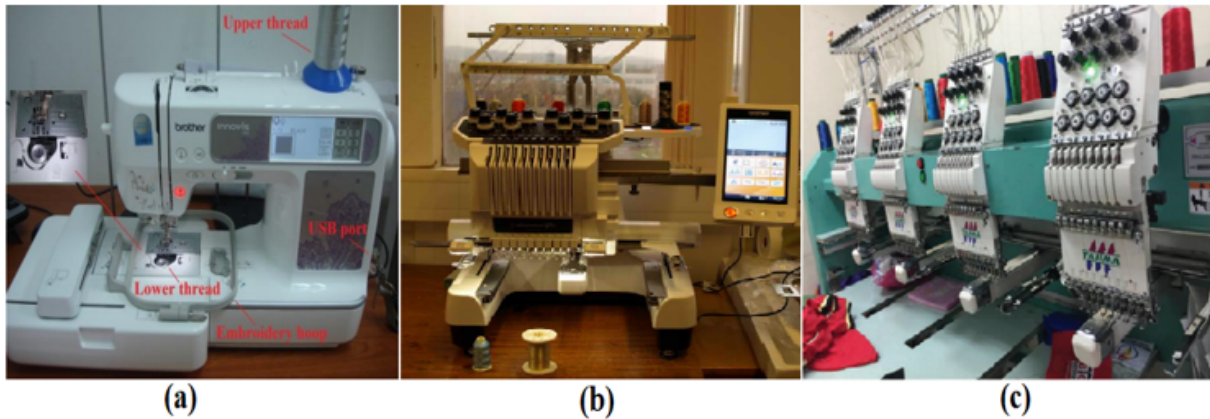


FIGURE 2.13 – Exemple de machines à broder : (a) Brother Innov-IS 950 [72], (b) Une machine à broder assistée par ordinateur conçue, à l'Université de Loughborough [73], (c) une Machine à broder industrielle Tajima Neo [74]

Dans le processus de broderie, des couches conductrices sont brodées à partir de fils conducteurs. Selon différentes propriétés électriques ainsi que des caractéristiques de durabilité et de fiabilité, les fils conducteurs sont catégorisés en deux types principaux qui sont les fils multifilaments et les fils monofilaments [72], comme indiqué dans la Figure 2.14

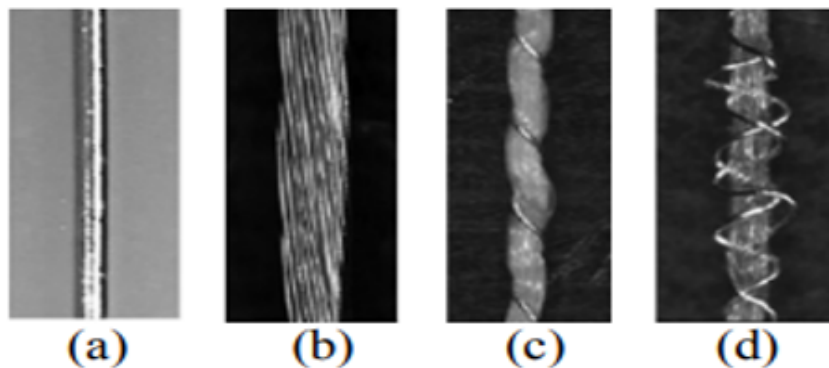


FIGURE 2.14 – Types des fils conducteurs utilisés pour broder les antennes textiles : (a) monofilament fin, (b) monofilament en faisceau, (c), (d) fils non conducteurs torsadés avec des filaments conducteurs [72]

Il existe de nombreux types de fils conducteurs bien connus et utilisés dans de nombreuses applications (la Figure 2.15). Parmi les plus connus, on peut citer : le Shieldex 40-22/7 + 110 PET 3ply (0.18 mm de diamètre), le Shieldex 33-17 PET 2ply (0.17 mm de diamètre), l'Amberstrand 166 avec des fibres enduites d'argent (0.21 mm de diamètre) [40], et le Zari avec des fils conducteurs en argent (0.05 mm de diamètre) [75, 76].

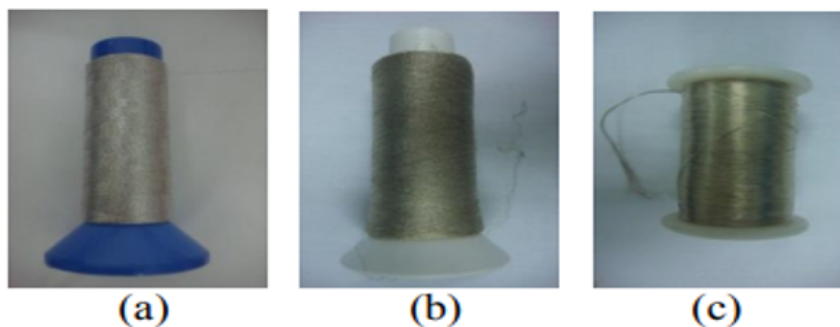


FIGURE 2.15 – Photographie des fils conducteurs étudiés dans [72] : (a) Shieldex 40-22/7 + 110 PET 3ply, (b) Shieldex 33-17 PET 2ply et (c) Amberstrand 166

Ces dernières années, et en particulier avec la croissance de la technologie industrielle, les chercheurs ont développé des antennes brodées plus efficaces afin de répondre aux besoins des applications de communication sans fil. Ils sont présentés deux exemples ayant exploré la conception d'antennes brodées à l'aide de fils conducteurs comme illustrée dans la Figure 2.16. En 2014, Loc Ngo Quang Bao et al [72], cet article présenté un prototype de conception pour une nouvelle classe d'antennes patch brodées sur un substrat polymère (PDMS) ($\epsilon_r = 3$ et $\tan \delta = 0.02$). Il est présenté trois structures différentes ainsi que des techniques d'alimentation (ligne microstripe et câble coax). L'analyse de l'effet du poids du patch en utilisant différentes structures de broderie sur la performance de l'antenne a été effectuée.

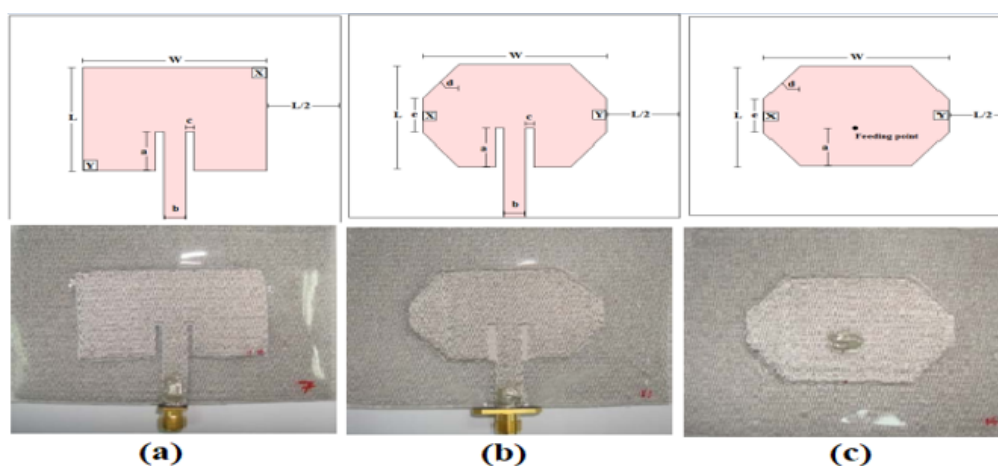


FIGURE 2.16 – conception de l'antenne et photographie du prototype [72] alimentation microruban : (a) antenne rectangulaire. (b) antenne polygonale. (c) alimentation coaxiale

Dans [75], Abirami Anbalagan et al. présentent un prototype concernant une nouvelle antenne textile brodée à profil bas pour la surveillance des impulsions en temps réel. Dans

cet article, une nouvelle antenne textile multicouche et à faible profil fonctionnant dans la bande ISM (Industrielle, Scientifique et Médicale) a été proposée pour des applications portables. L'antenne proposée a été entièrement fabriquée à partir de matériaux textiles, le substrat étant en coton ($\epsilon_r = 1.51$ et $\tan \delta = 0.04$) et les parties conductrices (patch et plan de masse) étant réalisées en brodant des fils de Zari sur le substrat. La structure générale de l'antenne est en forme de la lettre A. Pour améliorer le coefficient de réflexion et le gain, une fente rectangulaire de $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ a été introduite au niveau du patch. Une alimentation externe a été utilisée pour alimenter le Photon. Particle Photon est une carte Wi-Fi basée sur la puce Broadcom BCM43362, exclusivement conçue pour les applications IoT.

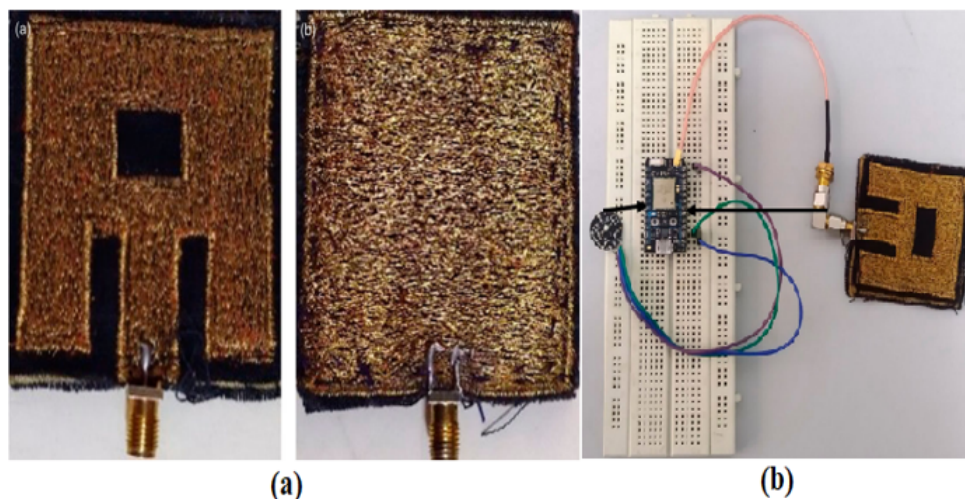


FIGURE 2.17 – L'antenne étudiée dans [75] : (a) Réalisation de l'antenne. (b) Connexion réelle de l'antenne textile conçue intégrée avec Photon de particules

Dans une autre étude [76], les auteurs ont conçu une antenne textile multicouche composée de quatre épaisseurs de coton, destinée à opérer dans la bande ISM. Le prototype utilise le même fil conducteur Zari, comme l'illustre la Figure 2.18. Des mesures sur l'antenne fabriquée sont effectuées pour valider les caractéristiques de la structure dans des conditions de pliage, de froissement et d'humidité. L'antenne a été intégrée à une carte de développement Arduino. Le circuit de traitement est fourni par le module NRF24L01 qui offre une portée de 1,1 km. Le prototype est validé (ou vérifié) pour des applications de transmission de messages, tant pour les applications portées sur le corps que pour les applications WBAN.

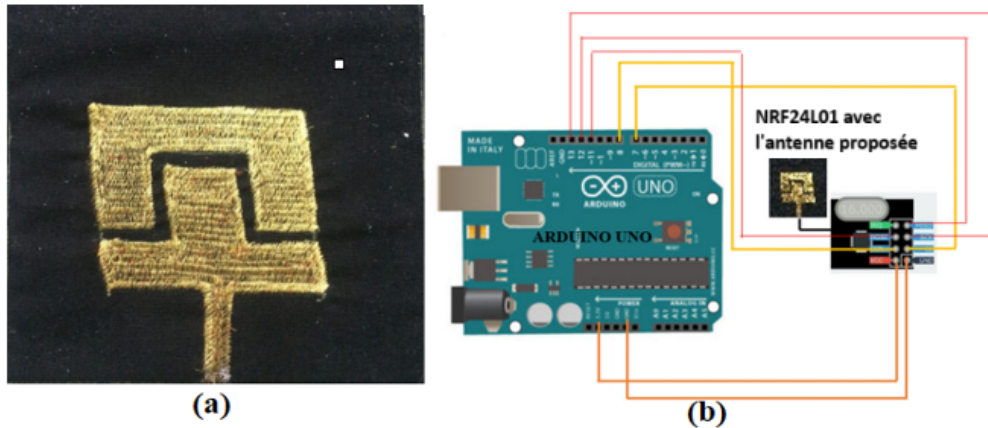


FIGURE 2.18 – Antenne étudié dans [76] : (a) Antenne réalisé. (b) l'intégration d'antenne avec l'arduino

Des chercheurs de [77] ont présenté les défis liés à la fabrication d'antennes à broderie en utilisant des fils conducteurs, tels que des fils métalliques gainés de polymère. Ils ont brodé ces antennes sur un tissu en coton et les ont placées sur un substrat FR4 doté d'un plan de masse en cuivre avec une colle non conductrice. Ils ont conclu que les principaux défis de la conception d'antennes avec des fils conducteurs sont de trouver des matériaux adaptés en termes de conductivité, de résistance et de flexibilité et d'évaluer le comportement des nombreux fils formant un objet continu et d'améliorer ainsi le rendement de ces antennes.

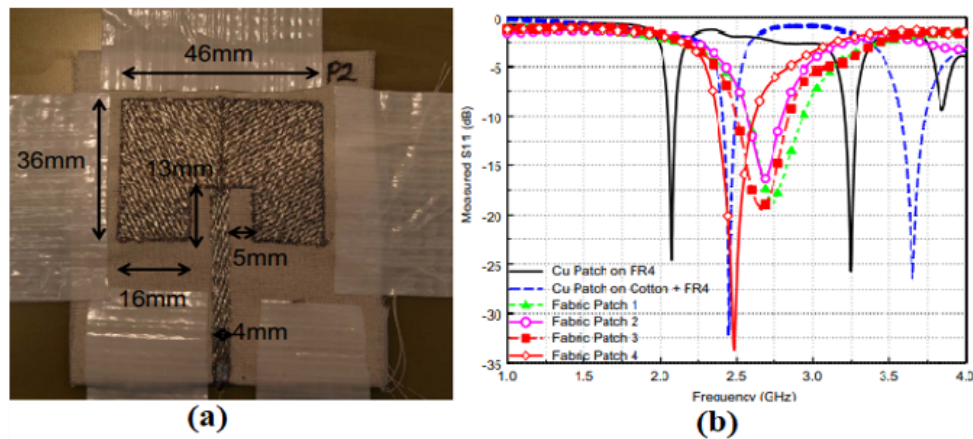


FIGURE 2.19 – Antenne étudié dans [77] : (b) Coefficient de réflexion des différentes antennes étudiées

Une antenne UWB entièrement textile a été conçue dans [78], par M. A. R. Osman et al. Des couches conductrices ont été brodées à l'aide de fils de nylon argentés directement sur le tissu de flanelle ($\epsilon_r = 1.7$ et $\tan \delta = 0.025$) pour le patch supérieur et le plan de masse, tandis que le tissu de flanelle isolé est utilisé comme substrat (la Figure 2.20). Trois couches de tissu de flanelle sont empilées et cousues ensemble pour compléter l'antenne

et améliorer la bande passante. Une feuille autocollante en cuivre est également utilisée pour la fabrication d'antenne en cuivre.

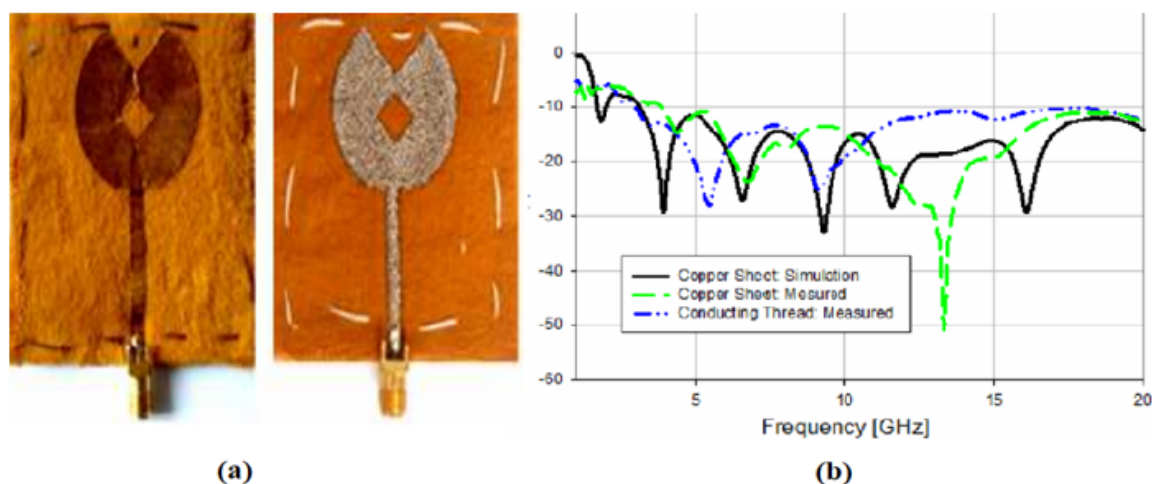


FIGURE 2.20 – (a) Antenne réalisé dans [78] , (b) Coefficient de réflexion des deux antennes ULB étudiées dans [78]

Le tableau 2.2 donne un aperçu exhaustif des atouts et des limites des antennes précédemment évoquées, en termes de performances, dans le cadre des applications portables.

TABLE 2.2 – Avantages et les inconvénients des antennes précédemment étudiées

type d'antenne	la taille	coût	la flexibilité	manufacturation	intégration au vêtements
accessoires personnel	moyenne	coûteux	oui	difficile	peu difficile
antenne bouton	faible	Peu coûteux	non	peu difficile	facile
antenne textile imprimée	faible	moins cher	oui	très facile	très facile
antenne textile brodée	faible	moins cher	oui	très facile	très facile

2.7 Principales caractéristiques des matériaux textiles

Les tissus sont des matières fibreuses planes dont les propriétés sont principalement déterminées par les caractéristiques des fibres qui les composent ainsi que par la structure des fils et/ou du tissu. Ce sont des matériaux poreux où la densité des fibres, le volume d'air et la taille des pores influencent le comportement global, notamment la perméabilité à l'air et l'isolation thermique. Par conséquent, les tissus se révèlent flexibles et compressibles, et leur épaisseur et leur densité peuvent varier sous de faibles pressions. De plus, l'orientation prédominante des fibres et/ou des fils confère une anisotropie planaire intrinsèque aux propriétés générales. Les fibres interagissent également en permanence avec leur

environnement, échangeant des molécules d'eau qui peuvent affecter leur morphologie et leurs propriétés.

Toutes ces caractéristiques sont relativement complexes à contrôler dans les applications réelles des textiles. Il est donc important de comprendre comment elles peuvent influencer le comportement de l'antenne afin de minimiser les effets indésirables. De plus, certaines caractéristiques des matériaux textiles, dont l'impact sur les performances de l'antenne est connu et mentionné dans la littérature, sont examinées dans le Tableau 2.3. [79]. Le paramètre constitutif des diélectriques est la permittivité ϵ , est un paramètre à valeur complexe. Il est généralement exprimé comme une valeur relative :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r), \quad (2-1)$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide est de 8.854×10^{-12} F/m [79]. La permittivité dépend de plusieurs facteurs tels que la fréquence, la température, la rugosité de la surface, ainsi que la teneur en humidité, la pureté et l'homogénéité du matériau. La constante diélectrique, ϵ'_r , représente la partie réelle de la permittivité relative, mais elle varie en fonction de la fréquence. Le rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle est appelé tangente de perte, $\tan \delta = \epsilon''_r / \epsilon'_r$. [79]-[49].

TABLE 2.3 – Caractéristiques diélectriques de différents substrats textiles

Références	Matériel	Permittivité (ϵ_r)	Tangente de perte ($\tan \delta$)
[49]	jeans	1.4	/
[50]	jeans	2.95	0.16
[51]	Cuir	2.9	0.08
[52]	Cuir	2	0.16
[63]	jeans	1.7	0.025
[64]	jeans	1.7	0.02
[66]	jeans	1.7	0.024
[67]	feutre	1.38	0.023
[68]	toison	1.3	0.025
[69]	Jeans	1.3	/
[30]	Cuir	2.5	0.035
[71]	PDMS	3	0.02
[74]	Coton	1.51	0.04
[75]	Coton	1.51	0.04
[76]	Coton + FR4	/	/
[77]	flanelle	1.7	0.025
[80]	jeans	1.7	0.02

2.8 caractéristiques des antennes portables attachées aux vêtements

Les antennes portables jouent un rôle essentiel lorsqu'elles sont ajustées et intégrées dans les vêtements, ce qui confère une importance cruciale à leurs performances. Deux aspects majeurs de ces antennes revêtent une grande importance : leur flexibilité, qui leur permet de se plier et de se déformer sans compromettre leur fonctionnalité, ainsi que leur débit d'absorption spécifique DAS. La flexibilité assure un ajustement confortable de ces antennes aux mouvements de l'utilisateur, tandis qu'un faible DAS garantit la sécurité et la santé de l'utilisateur.

2.8.1 L'effet sur le corps humain

La quantité de rayonnement absorbée par les tissus du corps lorsqu'ils sont exposés à un champ électromagnétique est connue sous le nom Débit d'Absorption Spécifique (DAS) en anglais (SAR). La FCC (Federal Communications Commission) établit des directives limitant le SAR à 1,6 W/kg pour 1 gramme de tissu, tandis que les recommandations de la ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) fixent une limite de 2 W/kg pour 10 grammes de tissu [36, 59, 81]. Plusieurs stratégies ont été développées afin de minimiser les niveaux de DAS au minimum possible, tout en préservant un rendement accru. Le DAS des antennes intégrées est en partie influencé par le couplage en champ proche avec le corps humain. Parmi ces stratégies, on cite par exemple, EBG (Electromagnetic Band Gap), AMC (Artificial Magnetic Conductor), HIS (High Impedance surface), Réflecteur et l'utilisation d'un espace entre l'antenne et le corps humain (GAP) [36].

2.8.2 La flexibilité

Les antennes portables attachées aux vêtements doivent démontrer une cohérence de performance malgré les différentes déformations qu'elles peuvent subir lorsque le corps humain est en mouvement. En effet, le corps humain est constamment soumis à de nombreux petits mouvements, que ce soit en position debout, assise, pendant les activités normales ou même lors de la pratique sportive. Cette caractéristique évalue la capacité des antennes à se plier lorsque les rayons de leur plan principal varient, tout en prenant en compte le coefficient de réflexion simulé [36, 48, 49]. Le Tableau 2.4 présente quelques études antérieures ayant abordé ce phénomène.

TABLE 2.4 – Des différentes déformations appliquées sur les antennes étudiées dans cet état de l’art.

Ref	substrat	Pliage	applications
[51]	cuir	200 mm / 250 mm	ISM-WLAN
[63]	jeans	75 mm / 125 mm	GSM
[64]	jeans	70 mm/ 80/100/140 y-axis + x-axis	ISM
[66]	jeans	30 mm / 50 mm / 70 mm	IOT
[67]	feutre	80 mm / 140 mm	IMS
[68]	toison	250 mm/ 310 mm	WBAN
[74]	cotton	40 mm/ 60 mm y-axis + x-axis	ISM
[75]	cotton	80 mm/ 120 mm / 160 mm y-axis + x-axis	ISM
[80]	jeans	60 mm/ 80/100/140 y-axis + x-axis	ISM

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre d’état de l’art sur les antennes intégrées aux vêtements, nous avons fourni une revue d’ensemble complète et approfondie de leur évolution dans différents domaines d’application, en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients. De plus, nous avons présenté une classification des antennes en fonction de leur type et de leur conception, tout en discutant de leurs performances, notamment en termes de flexibilité et de Débit d’Absorption Spécifique (DAS). Enfin, nous avons également abordé les caractéristiques des matériaux utilisés. Dans la continuité de cette revue, les chapitres suivants sont consacrés au développement d’antennes textiles augmentées intégrant des éléments graphiques symboliques. Cette démarche de recherche s’articule autour de la conception, de la simulation, de la fabrication et de la caractérisation expérimentale de plusieurs antennes textiles intégrant des logos institutionnels algériens. Chaque chapitre abordera un cas d’étude spécifique, permettant d’évaluer l’impact de cette intégration graphique sur les

caractéristiques électromagnétiques, tout en explorant les défis liés à la miniaturisation, à la flexibilité et à l'esthétique.

Chapitre 3

Performance d'une antenne textile augmentée compacte tri-bande inspirée de motif militaire pour les communications à courte portée

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une conception innovante d'une antenne patch textile tri-bande augmentée, intégrant une fonctionnalité graphique : l'emblème de la Gendarmerie Nationale Algérienne. Cette intégration graphique confère à l'antenne une dimension supplémentaire, au-delà de sa fonction de transmission et de réception d'ondes électromagnétiques. Elle constitue une antenne augmentée, au sens où elle intègre un élément visuel à forte valeur symbolique, sans compromettre les performances RF. Conçue pour fonctionner sur trois bandes de fréquences distinctes, l'antenne est adaptée à diverses applications de communication sans fil. La première bande cible la bande ISM et le Wi-Fi pour les applications de réseaux corporels sans fil (WBAN) à 2,45 GHz (2,37 GHz - 2,52 GHz). La deuxième bande est centrée à 4,42 GHz (4,2 GHz - 4,5 GHz), tandis que la troisième couvre la plage de 6,58 GHz (6,4 GHz - 6,8 GHz), répondant aux exigences des applications Wi-Fi 6E. La structure repose sur un substrat textile flexible en denim, avec une empreinte compacte de $32 \times 30 \times 0,6 \text{ mm}^3$ et un plan de masse partiel. Des évaluations approfondies ont été menées sous diverses conditions de flexion ainsi qu'en présence du corps humain. Les résultats montrent que l'antenne maintient des performances satisfaisantes en espace libre comme en configuration portée. Grâce à sa flexibilité, son faible

coût et son intégration graphique personnalisée, cette antenne augmentée offre une solution prometteuse pour les applications électroniques portables, notamment dans la gestion des effectifs, le contrôle d'accès sécurisé et les systèmes d'identification.

Notre conception propose plusieurs caractéristiques distinctives et avancées qui contribuent significativement au domaine des WBAN . Ces contributions incluent :

- **Une conception innovante du patch rayonnant** : L'antenne adopte une forme d'un logo militaire et est intégrée à un plan de masse partiel. Elle est directement alimentée via un connecteur coaxial SMA. L'ensemble de la structure repose sur un substrat flexible, optimise ainsi son adaptabilité aux applications vestimentaires.
- **Une taille compacte** : L'antenne présente une empreinte réduite de $32 \times 30 \times 0,6$ mm³, soulignant son profil mince. Cette configuration est idéale pour une intégration dans des dispositifs à espace restreint, garantissant une intrusion minimale tout en maintenant des performances optimales.
- **Une couverture multi-bande** : L'antenne est conçue pour fonctionner sur trois bandes de fréquences distinctes, lui permettant ainsi de répondre à diverses applications de communication sans fil.
- **Une amélioration de la sécurité et des performances** : L'intégration d'un réflecteur à l'arrière de l'antenne permet de réduire considérablement le Débit d'Absorption Spécifique (SAR), garantissant ainsi un faible niveau d'exposition aux radiations pour l'utilisateur. En parallèle, ce réflecteur augmente le gain de l'antenne, offrant ainsi des performances supérieures par rapport aux conceptions récentes comparables.

le travail présenté dans ce chapitre est principalement basé sur la publication suivante :

Bouaza.A, Hamrioui, F. Z., Touhami, R., Tedjini, S., Jabbar, A., Ur-Rehman, M., & Ramzan, N. (2024, October). Performance of a Novel Military Shape Compact Tri-Band Textile Patch Antenna For Short Range Communications Applications. *In 2024 International Conference on Advances in Electrical and Communication Technologies (ICAE-COT)* (pp. 1-6). IEEE.

3.2 Conception de l'antenne et les résultats de simulation en espace libre

La Figure 3.1 illustre la configuration globale de notre antenne textile . Cette antenne utilise un substrat en jean, un matériau largement disponible sur le marché, caractérisé par une permittivité relative de 1,7, une tangente de perte de 0,025 et une épaisseur de 0,6 mm. Le patch rayonnant et le plan de masse sont tous deux fabriqués en cuivre, avec une épaisseur de 0,035 mm. L'antenne est alimentée par un connecteur coaxial SMA 50 Ω standard. Les dimensions globales de la conception proposée sont de $32 \times 30 \times 0,6$ mm³ . Les paramètres et dimensions détaillés de l'antenne, exprimés en millimètres, sont répertoriés dans le Tableau 3.1.

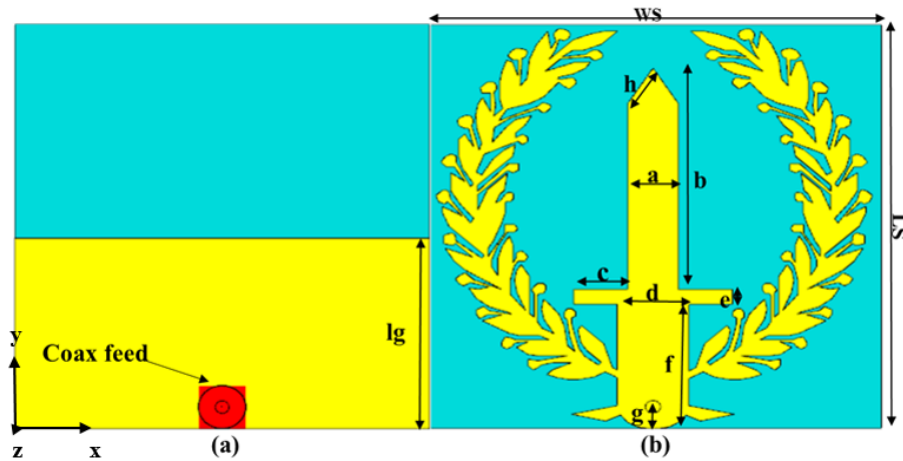


FIGURE 3.1 – Structure finale de l'antenne de la Gendarmerie avec dimensions spécifiées (a) structure du patch ; (b) plan de masse

TABLE 3.1 – dimensions des paramètres de l'antenne proposée.

paramètre	valeur (mm)	paramètre	valeur (mm)
L	32.5	d	4.70
W	30	e	1.20
Lg	15.30	f	10
a	3.30	g	2.20
b	18	h	3.27
c	3.55		

3.2.1 L'évolution de l'antenne textile proposée

La Figure 3.2 illustre l'évolution de la conception de l'antenne militaire proposée. Le processus commence avec une antenne monopôle en forme d'épée (étape a), alimentée par un connecteur coaxial SMA, présentant une résonance unique à 4,5 GHz avec un S_{11} de -5 dB. À l'étape (b), l'ajout d'une branche d'olivier sur le côté gauche introduit de nouvelles résonances à 1,9 GHz (-22 dB), 3,8 GHz (-7 dB) et 6 GHz (-11 dB). Ensuite, à l'étape (c), une seconde branche symétrique est ajoutée sur le côté droit, optimisant les performances aux fréquences de 2,45 GHz (-21 dB), 4,5 GHz (-17 dB) et 6,65 GHz (-12,5 dB). Enfin, à l'étape (d), l'optimisation des jambes parallèles de l'épée améliore la bande passante du S_{11} tout en maintenant les trois résonances. La conception finale adopte une forme emblématique inspirée de l'uniforme de la Gendarmerie Nationale Algérienne, garantissant des performances optimales. La Figure 3.2 illustre les courbes S_{11} correspondant à chaque étape de l'évolution. La Figure 3.3 présente le gain et le rendement de l'antenne. Les résultats montrent des valeurs de gain positives de 1,9 dBi à 2,45 GHz, 1,6 dBi à 4,42 GHz, et 4,75 dBi à 6,5 GHz. De plus, l'antenne affiche un rendement satisfaisant, atteignant 73% à 2,45 GHz, 60% à 4,42 GHz, et 84% à 6,5 GHz.

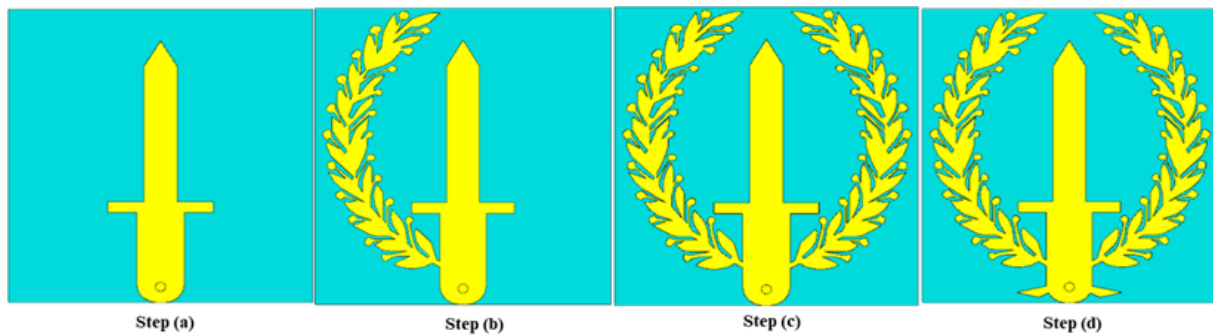


FIGURE 3.2 – L'évolution de l'antenne textile proposée

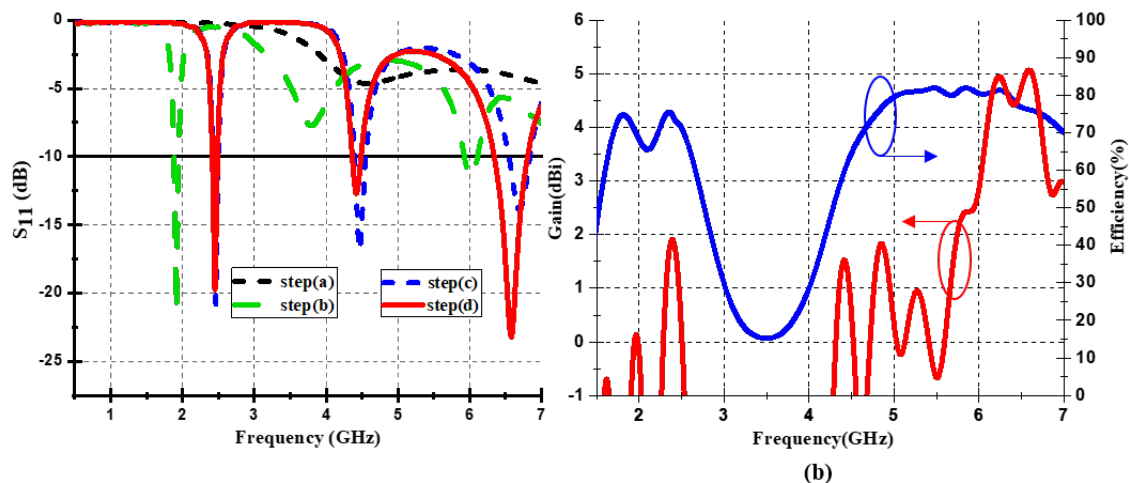


FIGURE 3.3 – (a) changement du paramètre S_{11} au cours des étapes d'évolution de l'antenne proposée, (b) le gain et l'efficacité de l'antenne proposée

La Figure 3.4 illustre la distribution du densité de courant de l'antenne proposée aux fréquences de 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz, On observe que la répartition du champ varie en fonction de la fréquence, traduisant une modification du comportement électromagnétique de la structure. À 2,45 GHz, le champ est principalement concentré autour de la zone d'alimentation, indiquant une forte activité dans la région rayonnante principale. À 4,42 GHz et 6.5 GHz le champ devient plus étendu le long des bords, ce qui suggère l'excitation d'un mode supérieur.

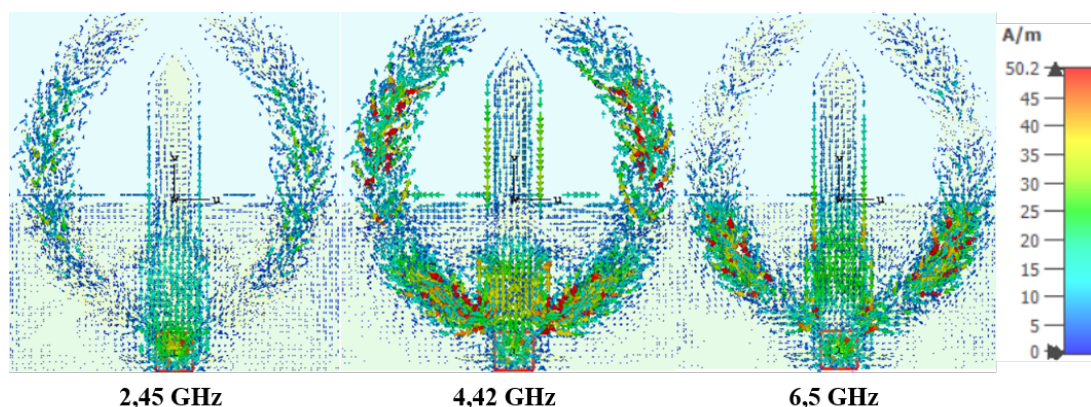


FIGURE 3.4 – distribution du densité de courant de l'antenne proposée aux fréquences de 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz

3.2.2 Analyse de la flexibilité de l'antenne proposée

Les antennes vestimentaires en matériaux textiles sont souvent intégrées directement aux vêtements. Cependant, les mouvements du corps humain peuvent entraîner des déformations telles que la flexion, le froissement ou l'étirement de l'antenne. Afin d'évaluer la résilience de notre conception, nous avons analysé numériquement les performances de l'antenne sous différents rayons de courbure (80 mm, 90 mm et 100 mm), comme illustré dans la Figure 3.5 (a). Les résultats de la simulation montrent que le coefficient de réflexion (S_{11}) reste stable, avec un impact minimal sous diverses conditions de flexion, comme démontré dans la Figure 3.5 (b).

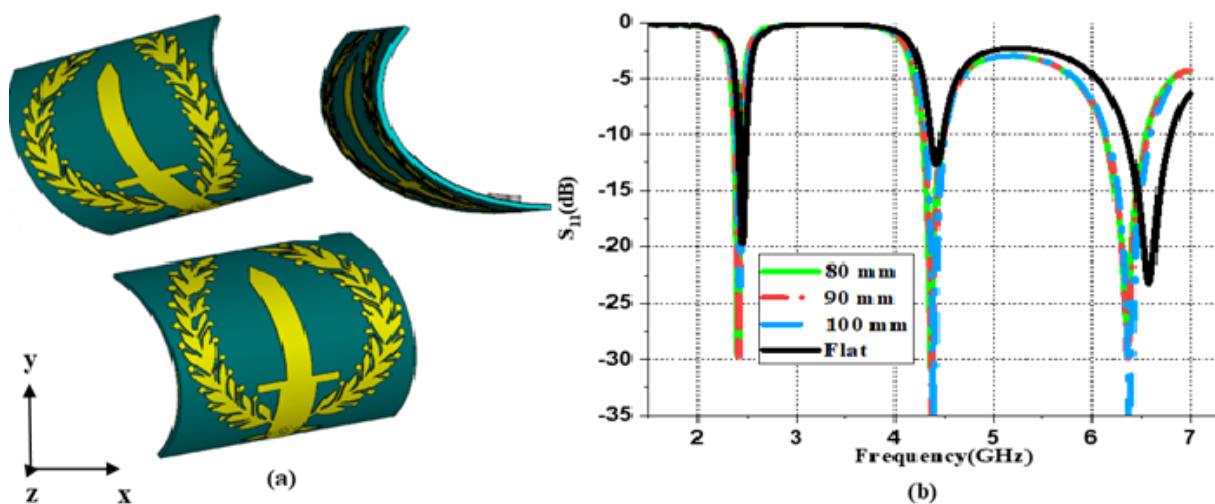


FIGURE 3.5 – (a) Antenne proposée déformée sous différentes courbures
(b) S_{11} numérique de l'antenne suggérée sous différentes courbures

3.2.3 Caractéristiques d'antenne proposée à proximité du corps humain

Lorsqu'une antenne vestimentaire est placée à proximité du corps humain, une partie du rayonnement électromagnétique émis est absorbée par les tissus biologiques, tandis qu'une autre est réfléchi. Il est donc essentiel d'analyser en détail les modifications attendues des performances de l'antenne et leur impact potentiel sur la physiologie humaine. Pour garantir son bon fonctionnement, l'antenne est simulée à l'aide d'un modèle rectangulaire du corps humain à quatre couches, comme illustré en Figure 3.6 (a). L'analyse est réalisée avec une puissance d'entrée de 0,5 W, en prenant en compte les propriétés

diélectriques et l'épaisseur de chaque tissu aux trois fréquences de fonctionnement (2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz), calculées selon [82].

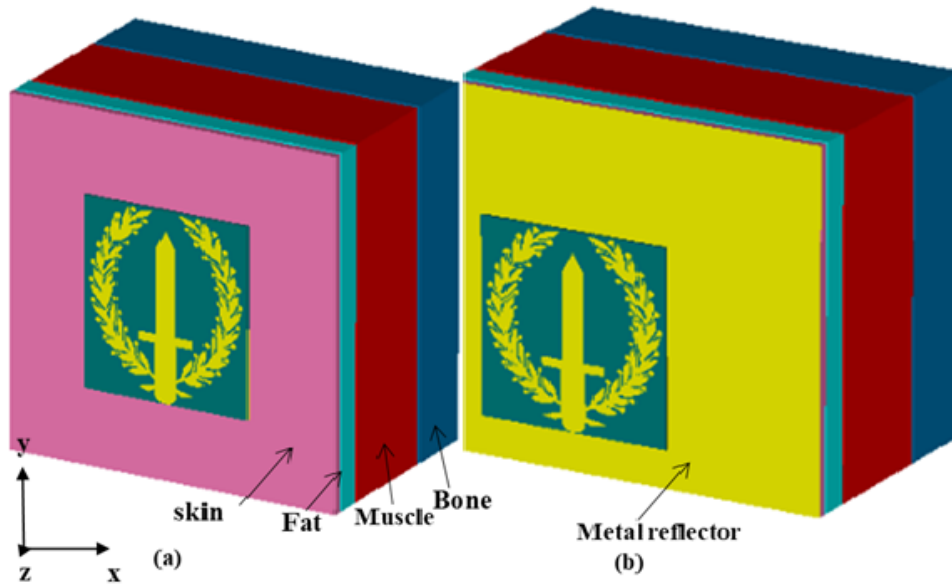


FIGURE 3.6 – Placement de l'antenne proposée sur les quatre modèles rectangulaires du corps humain (a) Sans réflecteur , (b) Avec réflecteur

Nous avons proposé l'ajout d'un réflecteur métallique derrière l'antenne afin de réduire le Débit d'Absorption Spécifique (SAR) et d'améliorer son gain. La disposition du réflecteur, positionné entre l'antenne et le modèle du corps humain à quatre couches, est illustrée en Figure 3.6 . Par ailleurs, le coefficient de réflexion simulé de l'antenne, prenant en compte un vide entre l'antenne et les tissus humains de 20 mm, est présenté en Figure 3.7 . Les résultats démontrent que l'antenne conserve d'excellentes performances, avec une bande passante caractérisée par un S_{11} inférieur à -10 dB. La Figure 3.7 (b) illustre le gain et le rendement simulés de l'antenne, avec et sans réflecteur métallique. Les résultats mettent en évidence une amélioration significative du gain en présence du réflecteur, tout en maintenant un rendement acceptable dans les deux configurations.

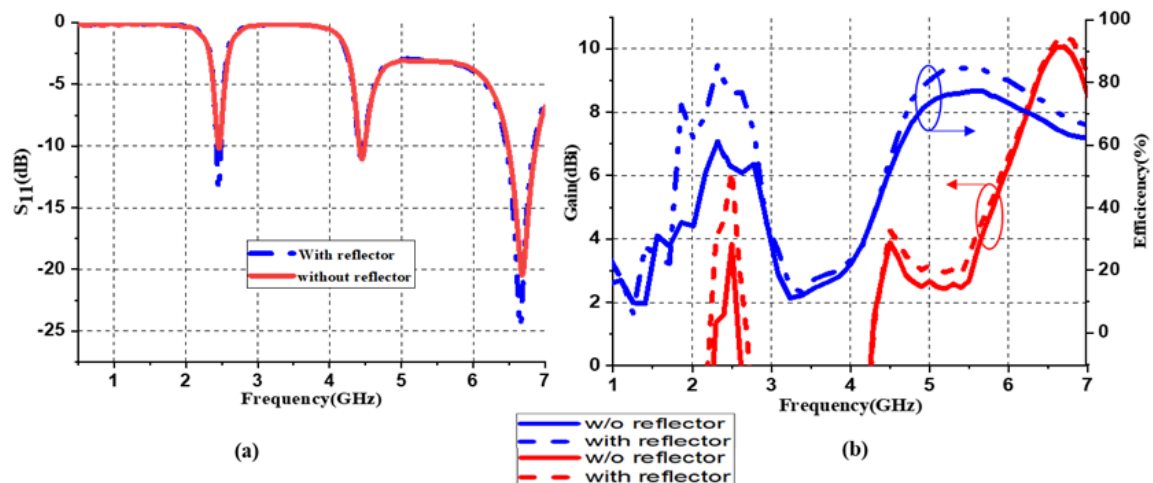


FIGURE 3.7 – (a) S_{11} de l'antenne proposée placée sur le modèle biologique des tissus humains. (b) Le gain et le rendement en fonction de la fréquence d'antenne proposée sur le modèle biologique des tissus humains, avec et sans réflecteur

La Figure 3.8 illustre le diagramme de rayonnement 2D de l'antenne proposée aux fréquences de 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz, à la fois en espace libre et lorsqu'elle est placée sur le corps humain.

En espace libre, on observe que l'antenne présente un rayonnement omnidirectionnel dans le plan $\phi = 0^\circ$ aux trois fréquences ciblées, tandis qu'elle montre un rayonnement bidirectionnel dans le plan $\phi = 90^\circ$ aux mêmes fréquences.

Cependant, lorsqu'elle est positionnée sur le corps humain, l'antenne affiche un rayonnement directionnel dans les deux plans $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 90^\circ$. Ce comportement directionnel est dû à l'interaction avec le modèle du corps humain, qui modifie la propagation des ondes électromagnétiques et les canalise principalement dans une seule direction.

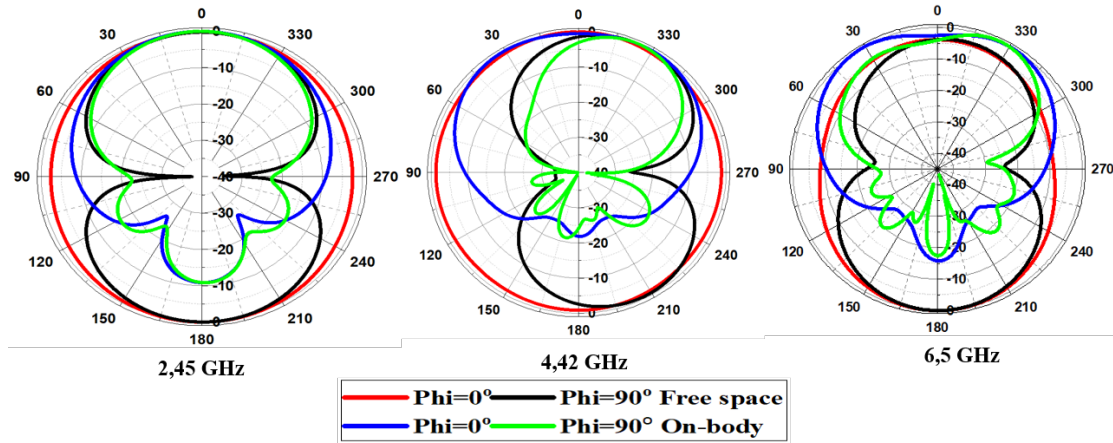


FIGURE 3.8 – Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne proposée à 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz, en espace libre et sur le corps humain

D'autre part, le diagramme de rayonnement 3D, dans le cas où l'antenne est placée sur le corps humain, est illustré dans la Figure 3.9

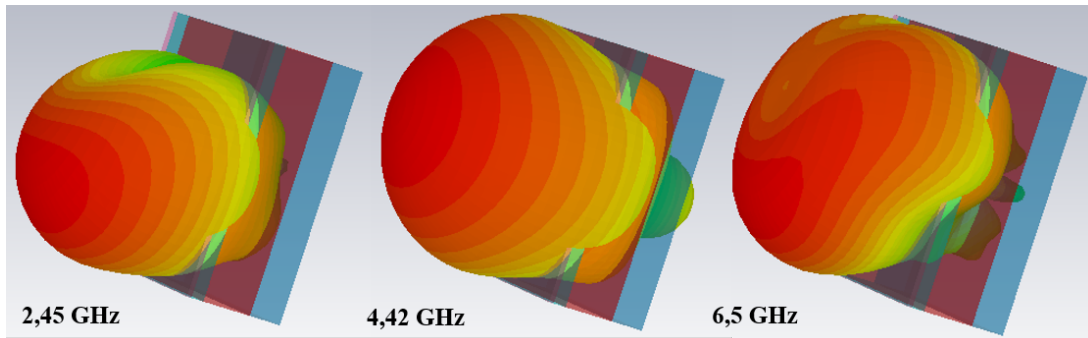


FIGURE 3.9 – Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne proposée à 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz sur le corps humain

3.2.4 L'analyse du débit d'absorption spécifique (SAR)

Le Taux d'Absorption Spécifique (SAR) quantifie l'énergie électromagnétique absorbée par les tissus biologiques lorsqu'ils sont exposés à un champ électromagnétique. La FCC (Federal Communications Commission) établit des directives limitant le SAR à 1,6 W/kg pour 1 gramme de tissu, tandis que les recommandations de la ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) fixent une limite de 2 W/kg pour 10 grammes de tissu. [82]. Le calcul théorique du SAR est défini comme suit :

$$SAR = \frac{\delta E^2}{\rho} \quad (3-1)$$

Où : δ est la conductivité électrique du tissu, exprimée en siemens par mètre (S/m) ; E : intensité du champ électrique local en volts par mètre (V/m) et ρ la masse volumique du tissu, en kilogrammes par mètre cube (kg/m³).

La Figure 3.10 illustre les distributions simulées du Taux d'Absorption Spécifique (SAR) pour l'antenne proposée, avec et sans réflecteur métallique. Aux bandes de fréquences ciblées, les niveaux de SAR sans réflecteur dépassent les seuils de sécurité fixés par la FCC et ICNIRP. Toutefois, l'intégration du réflecteur métallique entraîne une réduction significative du SAR, le maintenant bien en deçà des limites de sécurité.

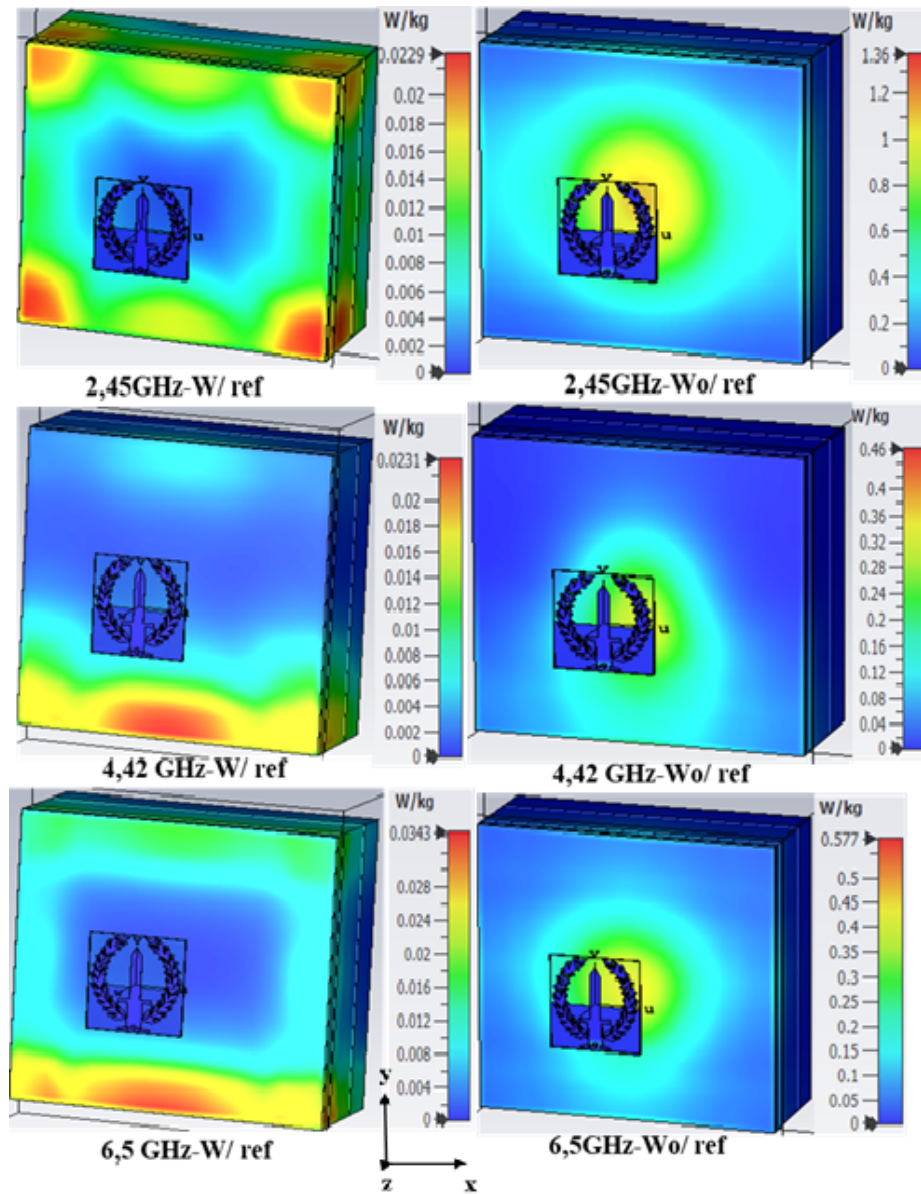


FIGURE 3.10 – SAR simulé de l'antenne proposée sur le modèle biologique des tissus humains, avec et sans réflecteur

3.3 Conclusion

Cette étude présente la conception novatrice et l'évaluation approfondie d'une antenne textile tribande, élaborée sur un substrat économique en jean et alimentée par un connecteur coaxial SMA. Spécifiquement adaptée aux applications des réseaux WBAN, ISM et Wi-Fi 6E, cette antenne fonctionne efficacement aux fréquences de 2,45 GHz, 4,42 GHz et 6,5 GHz. Son design géométrique innovant, inspiré du logo de la Gendarmerie Nationale algérienne, allie à la fois esthétique et optimisation des propriétés électromagnétiques. L'antenne atteint des gains remarquables de 1,5 dBi à 2,45 GHz, 1,6 dBi à 4,42 GHz et 4,65 dBi à 6,5 GHz, tout en maintenant un rendement élevée, dépassant 84% sur l'ensemble des bandes de fonctionnement, garantissant ainsi des pertes minimales et des performances optimales. Sa robustesse mécanique a été validée sous des courbures de flexion comprises entre 80 mm et 100 mm, attestant de sa durabilité et de son adéquation aux applications portables. De plus, lorsqu'elle est placée à proximité du corps humain, l'antenne ne subit qu'une dégradation négligeable de ses performances, la rendant idéale pour des applications embarquées. Cette stabilité est confirmée par des simulations numériques, démontrant un diagramme de rayonnement directionnel fiable même en présence du corps humain. L'analyse approfondie du Taux d'Absorption Spécifique (SAR), réalisée à l'aide d'un modèle biologique, valide la conformité de l'antenne aux normes de la FCC et ICNIRP, garantissant ainsi une utilisation sécurisée et prolongée sur le corps humain. Grâce à sa flexibilité, ses caractéristiques à large bande et sa conformité aux exigences de sécurité, cette antenne multifonctionnelle constitue une solution prometteuse pour les applications de gestion du personnel, de contrôle d'accès sécurisé et d'identification.

Chapitre 4

Performances d'une antenne textile flexible et compacte à fente en U alimentée en CPW pour les applications WBAN, WLAN, ISM et Wi-Fi 6E

4.1 Introduction

Cette étude porte sur le développement d'une antenne portable innovante, conçue pour être intégrée de manière transparente dans un vêtement de type gilet, facilitant ainsi la communication sur trois bandes de fréquences distinctes : WBAN (Wireless Body Area Network), ISM (Industrial, Scientific and Medical) et WLAN (Wireless Local Area Network). L'antenne proposée, fabriquée sur un substrat en denim (jeans) facilement disponible, présente une forme visuellement distinctive inspirée du logo de l'Armée de l'Air algérienne. Cette conception exploite les propriétés uniques des matériaux textiles afin d'offrir une solution compacte, légère et économique pour les systèmes de communication portables. L'antenne est optimisée pour fonctionner efficacement sur de larges plages de fréquences, avec des fréquences de résonance allant de 2,2 GHz à 2,75 GHz et de 3,63 GHz à 7,43 GHz. Elle présente des propriétés de conformabilité et assure des performances robustes même sous flexion, ce qui la rend adaptée à une intégration dans des vêtements. L'antenne atteint un gain maximal de 6,18 dB à 6,5 GHz et un rendement maximal de 98% à 2,45 GHz dans des conditions normales. Le prototype réalisé montre une excellente concordance entre les résultats simulés et mesurés. La bande passante d'impédance simulée s'étend de (2,20 – 3 GHz) pour la première bande et de (4,41 – 7,43 GHz) pour la

seconde bande. Les résultats mesurés indiquent que l'antenne offre des bandes passantes d'impédance à -10 dB de 22% (2,2 – 2,75 GHz) pour les applications WBAN et de 68% (3,63 – 7,43 GHz) pour les applications WLAN et WI-FI 6E, grâce à l'intégration stratégique de fentes dans le plan de masse (fente en U symétrique et fente rectangulaire). De plus, les performances de l'antenne restent stables sous différentes conditions de flexion et présentent un comportement satisfaisant à proximité du corps humain, ce qui la rend adaptée aux applications portables. Cette conception économique constitue une solution prometteuse pour l'intégration dans divers appareils électroniques grand public. L'antenne proposée représente une alternative à faible coût pour de nombreuses applications électroniques portables, offrant un potentiel significatif pour l'amélioration de la gestion des effectifs, le contrôle d'accès sécurisé et l'identification.

Ce travail présenté dans ce chapitre est principalement basé sur la publication suivante :

Bouaza.A, Touhami, R., Tedjini, S., Jabbar, A., Ur-Rehman, M., & Ramzan, N. (2025). High-Performance Flexible Compact Wideband U-Slot CPW-Fed Textile Antenna for WBAN, WLAN, ISM, and WI-FI 6E Applications. *International Journal of Communication Systems*, 38(4), e70004.

4.2 Conception, simulation et analyse de l'antenne proposée

La Figure 4.1 présente l'évolution du processus de conception, la structure finale de l'antenne . L'antenne est réalisée sur un substrat textile en jeans, un matériau facilement accessible, présentant une permittivité relative de 1,7, un facteur de perte de 0,025 et une épaisseur de 0,6 mm. Le patch rayonnant et le plan de masse sont fabriqués en cuivre d'une épaisseur de 0,035 mm, tandis que l'alimentation est assurée par une ligne micro-ruban standard de 50Ω . Les dimensions globales de l'antenne proposée sont de 56 mm $\times$ 36 mm $\times$ 0,6 mm. Le processus de conception débute avec une géométrie initiale constituée d'un patch rectangulaire (étape 1, Figure 4.1). Cette configuration de base, comprenant une ligne d'alimentation simple et des plans de masse rectangulaires distincts, présente une fréquence de résonance unique autour de 5,7 GHz avec un coefficient de réflexion de -13 dB. À l'étape 2, la structure du patch est modifiée afin d'adopter un profil géométrique

spécifique évoquant des ailes d'oiseau, tout en intégrant des fentes en étoile et en croissant. Cette optimisation aboutit à une architecture inspirée du logo de la forces aériennes algériennes et entraîne un décalage significatif de la fréquence de résonance, avec une résonance unique observée à environ 7,3 GHz et un coefficient de réflexion améliorée à -30 dB. L'optimisation du plan de masse (étape 3) constitue une étape clé dans l'amélioration des performances de l'antenne. Le plan de masse est étendu et les éléments rectangulaires distincts sont fusionnés pour former une structure unifiée, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement en double bande. Ainsi, la première bande opérationnelle s'étend de 2,2 GHz à 3 GHz, tandis que la seconde couvre une plage plus large, allant de 4,56 GHz à 7,71 GHz. L'itération finale du design (étape 4) introduit une paire de fentes symétriques en U ainsi que deux fentes rectangulaires sur le plan de masse. L'ajout stratégique de ces fentes optimise l'adaptation d'impédance et améliore la perte de retour sur la plage de fonctionnement cible de la deuxième bande (4,42 GHz – 7,47 GHz). Plus spécifiquement, les fentes en U permettent de modifier le chemin du courant, contribuant ainsi à un meilleur contrôle des caractéristiques électromagnétiques de l'antenne. Toutefois, cette modification a été principalement introduite dans le but d'améliorer l'adaptation d'impédance, comme en témoigne la nette amélioration du coefficient de réflexion observée entre l'étape 3 et l'étape 4. Cette optimisation vise également à garantir la stabilité des performances mesurées après fabrication, en réduisant les risques de dégradation du paramètre S11, souvent constatés lors du passage du modèle simulé au prototype réel. Les coefficients de réflexion correspondant aux différentes étapes d'évolution de la conception, illustrées dans la Figure 4.1, sont présentés dans la Figure 4.2.

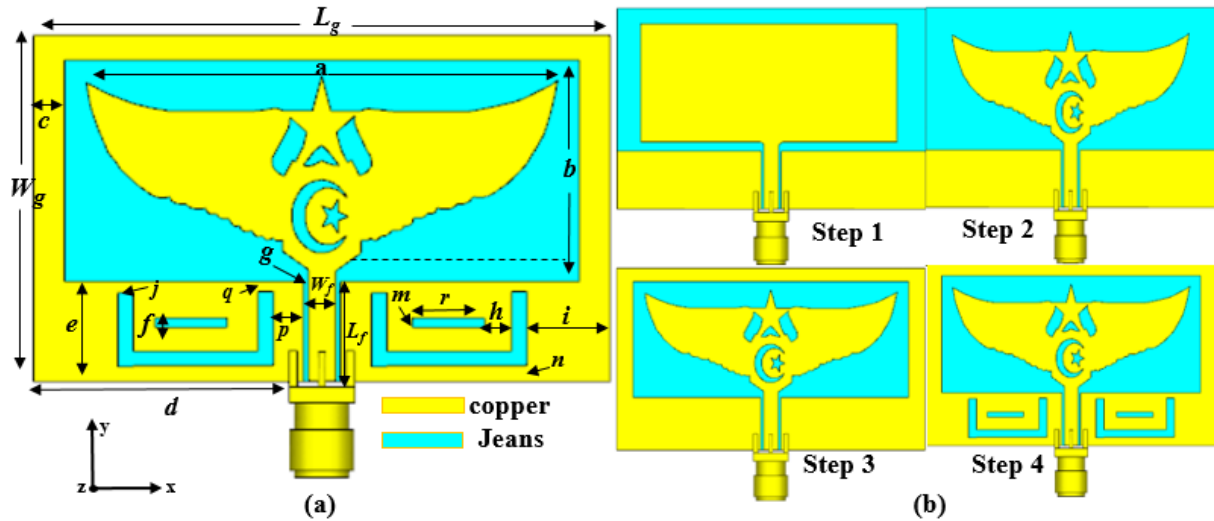


FIGURE 4.1 – (a) Schéma final de l'antenne proposée (b) Étapes d'évolution de la conception de l'antenne finale

Les paramètres de l'antenne proposée sont les suivants : $L_g = 56$ mm, $W_g = 36$ mm, $a = 45,7$ mm, $b = 20,5$ mm, $c = 3$ mm, $d = 26,2$ mm, $e = 10,5$ mm, $f = 2,5$ mm, $h = 2,5$ mm, $g = 0,5$ mm, $i = 8,1$ mm, $j = 1,5$ mm, $m = 1$ mm, $n = 1,65$ mm, $p = 3$ mm, $q = 1$ mm, $r = 7$ mm, $W_f = 2,65$ mm, $L_f = 11,75$ mm.

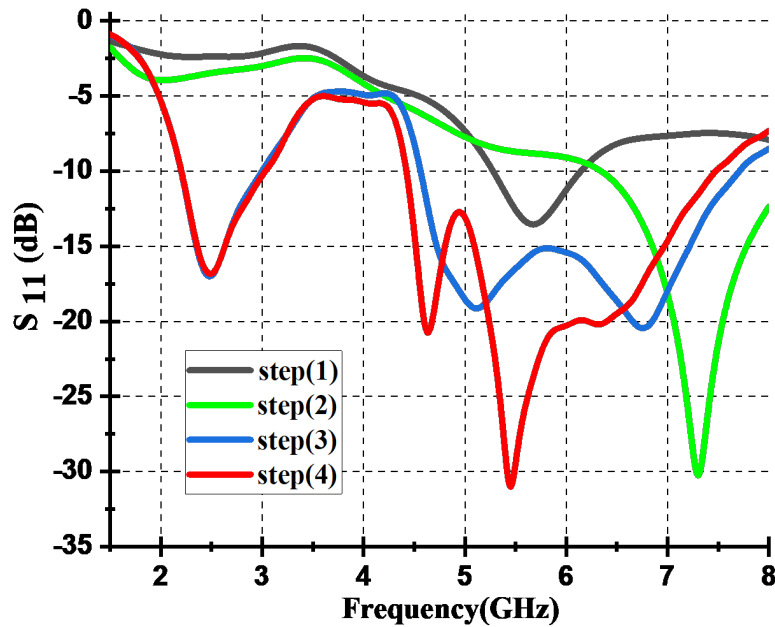


FIGURE 4.2 – Résultats simulés de S11 aux différentes étapes de l'évolution de la conception

Les dimensions de la ligne d'alimentation, la permittivité du substrat et le gap g entre la ligne CPW et les plans de masse déterminent l'impédance caractéristique Z_0 de l'antenne, comme indiqué dans l'Équation (4-1). Il est important de noter que ces paramètres sont liés : une permittivité plus élevée nécessite généralement un écart plus large g pour obtenir la même impédance. Ici, k'_0 représente le module complémentaire de k_0 [83, 84].

$$Z_0 = \frac{30\pi K(k'_0)}{K(k_0) \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \quad (4-1)$$

où

$$k_0 = \frac{W_f}{W_f + 2g}, \quad k'_0 = \sqrt{1 - k_0^2}.$$

La permittivité effective est donnée par :

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} - \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)}. \quad (4-2)$$

La Figure 4.3(a) illustre la distribution simulée du courant de surface sur l'antenne proposée à différentes fréquences de résonance (2,45 GHz, 5 GHz, 5,8 GHz et 6,5 GHz). Le courant suit un schéma cohérent sur l'ensemble de ces fréquences, avec une densité surfacique de courant maximale observée au niveau du patch rayonnant. Il est intéressant de noter qu'aux basses fréquences de 2,45 GHz et 5 GHz, l'intensité minimale du courant est localisée sur le plan de masse. La Figure 4.3(b) présente les résultats simulés du gain et de l'efficacité de l'antenne proposée. Celle-ci affiche des valeurs de gain significatives : 3,7 dBi à 2,45 GHz, 3,41 dBi à 5 GHz, 5,65 dBi à 5,8 GHz et 6,18 dBi à 6,5 GHz. L'efficacité de rayonnement demeure élevée sur l'ensemble des bandes de fonctionnement, atteignant 98,5% à 2,45 GHz, 91% à 5 GHz, 95% à 5,8 GHz et 94,5% à 6,5 GHz. Ces résultats mettent en évidence les performances optimisées du design, assurant une excellente efficacité de rayonnement.

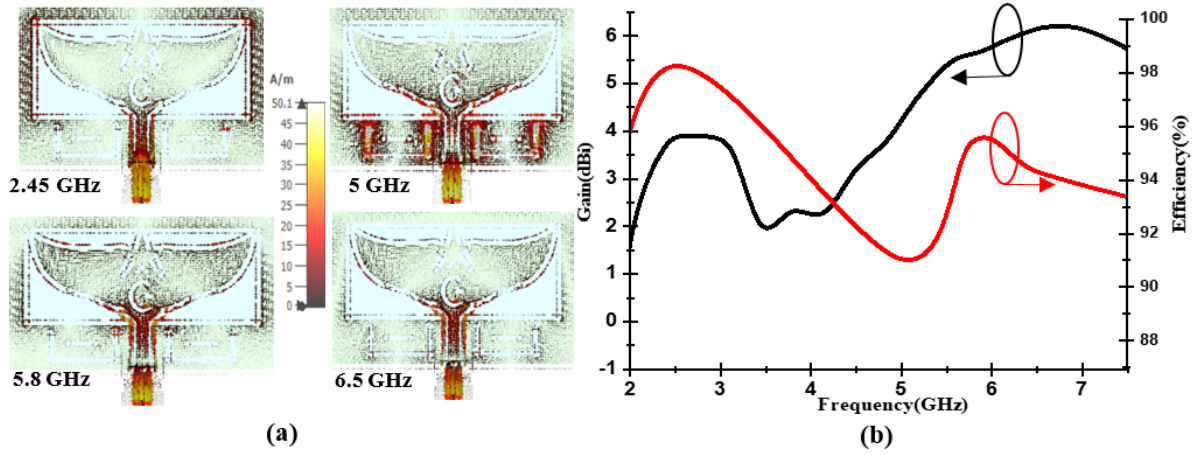


FIGURE 4.3 – Résultats simulés de S_{11} aux différentes étapes de l'évolution de la conception.

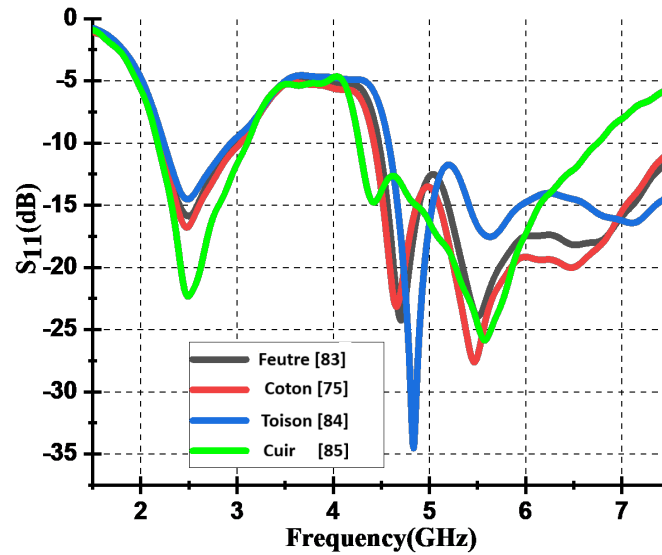


FIGURE 4.4 – Résultats simulés de S_{11} aux différentes type de substrat textile

Un facteur déterminant pour évaluer l'adaptabilité de l'antenne proposée aux applications pratiques est la stabilité de ses performances sur différents substrats textiles. À cette fin, des simulations ont été réalisées en utilisant des données établies sur les propriétés diélectriques de quatre matériaux textiles couramment rencontrés : le feutre [83] (permittivité $\epsilon_r = 1,38$, tangente de perte $\delta = 0,02$), le coton [75] ($\epsilon_r = 1,51$, $\delta = 0,04$), le toison [85] ($\epsilon_r = 1,06$, $\delta = 0,004$) et le cuir [86] ($\epsilon_r = 2,72$, $\delta = 0,02$). Comme illustré dans la Figure 4.4, l'analyse approfondie du coefficient de réflexion S_{11} pour l'antenne proposée

sur ces différents matériaux textiles révèle un bon adaptation d'impédance (faibles valeurs de S_{11}) sur toute la bande de fréquences. Ces résultats confirment la polyvalence de l'antenne et son potentiel d'intégration dans divers vêtements. Le coefficient de réflexion obtenu est présenté dans la Figure 4.4.

4.3 Fabrication de l'antenne et résultats expérimentaux

Le prototype fabriqué de l'antenne proposée, illustré aux Figure 4.5(a) et Figure 4.5(b), le coefficient de réflexion S_{11} a été mesuré à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA E8362B), comme présenté dans la Figure 4.6. Les résultats de simulation et de mesure sont en bon accord. L'antenne présente des bandes passantes d'impédance à -10 dB de 22% (2,2 – 2,75 GHz) et 68% (3,63 – 7,43 GHz).

Afin d'évaluer l'impact de la flexion et l'adaptabilité de l'antenne dans un contexte vestimentaire, des tests pratiques ont été effectués sous différentes conditions de courbure. L'antenne a été placée sur un cylindre en polystyrène de constante diélectrique $\epsilon_r \approx 1$, avec des diamètres variables de 70 mm, 80 mm, 100 mm et 140 mm, introduisant ainsi différents degrés de courbure, comme illustré en Figure 4.7(a). Les mesures montrent que le coefficient de réflexion demeure stable sur une large plage de courbures, avec un impact minimal sur l'adaptation d'impédance, comme démontré en Figure 4.7(b).

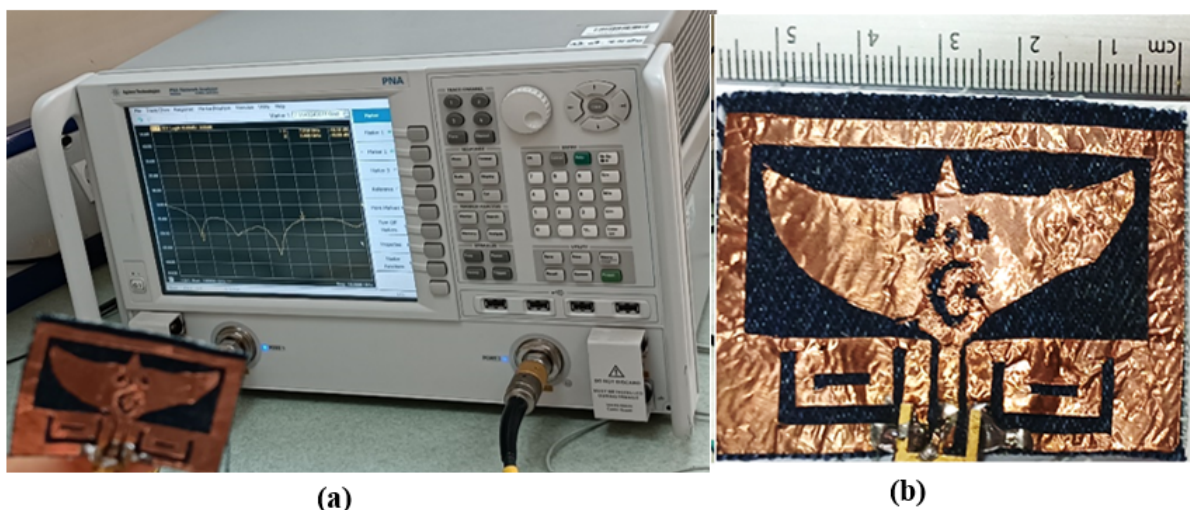


FIGURE 4.5 – (a) le prototype de l'antenne fabriquée connectée avec VNA, (b) l'antenne fabriquée

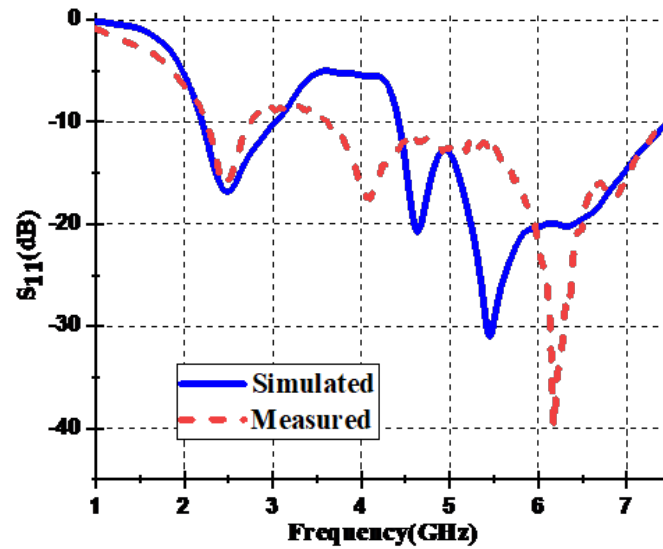


FIGURE 4.6 – comparaison entre le résultat de simulation et de mesure de coefficient de réflexion

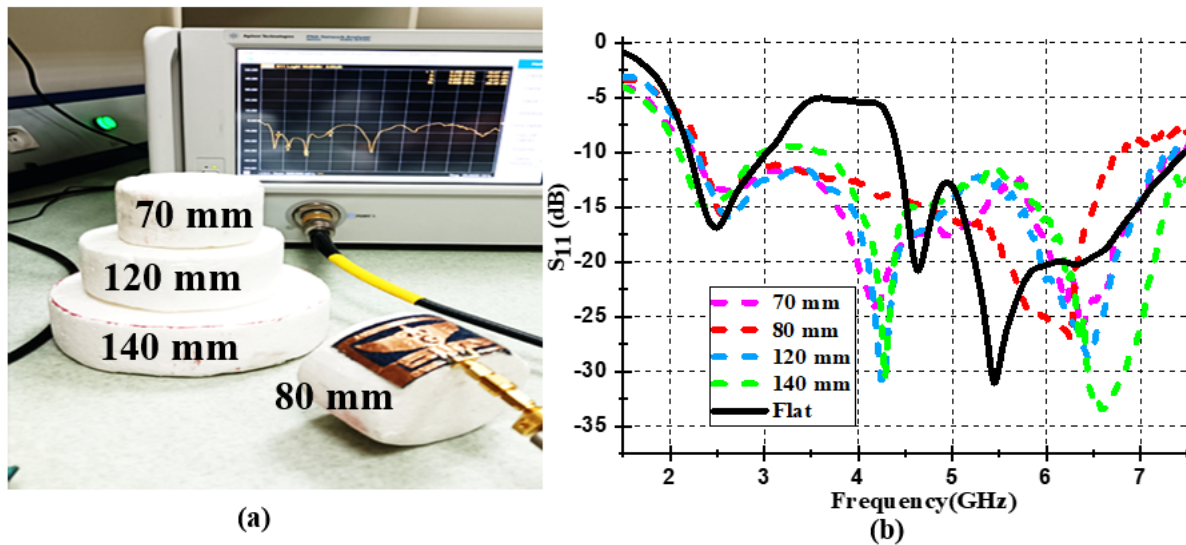


FIGURE 4.7 – (a) Prototype fabriqué déformé sous différentes courbures, (b) Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sous différentes courbures

Une comparaison entre les simulations numériques et les diagrammes de rayonnement 2D mesurés de l'antenne proposée en espace libre est présentée dans la Figure 4.8, montrant une bonne corrélation aux fréquences de fonctionnement de 2,45 GHz, 5 GHz, 5,8 GHz et 6,5 GHz. Les résultats simulés et expérimentaux confirment que l'antenne présente des caractéristiques de rayonnement omnidirectionnelles dans le plan H ($\phi = 90^\circ$)

et bidirectionnelles dans le plan E ($\phi = 0^\circ$) à ces fréquences. Cette cohérence sur une large gamme de fréquences souligne la polyvalence et l'efficacité de l'antenne dans diverses applications. Ces observations mettent en évidence la flexibilité de l'antenne, qui maintient ces propriétés de rayonnement sur une large bande passante couvrant les bandes de 2,45 GHz, 5 GHz, 5,8 GHz et 6,5 GHz.

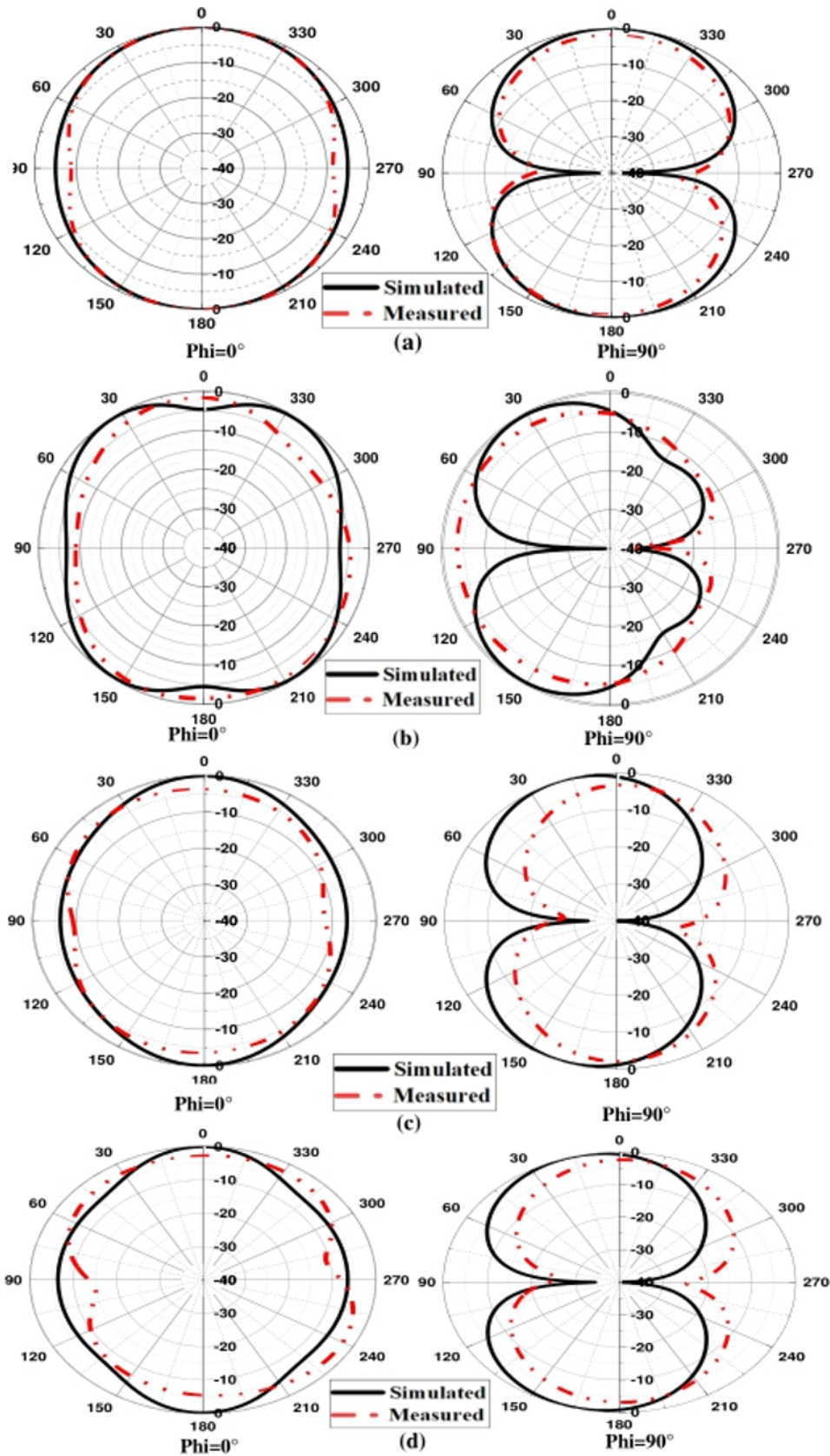


FIGURE 4.8 – comparaison du diagrammes de rayonnement 2D numériques et mesurés dans les plans E ($\phi = 0^\circ$) et H ($\phi = 90^\circ$) (a) 2,45 GHz, (b) 5 GHz, (c) 5,8 GHz, (d) 6,5 GHz en espace libre

4.4 Performance de l'antenne textile proposée à proximité du corps humain

L'antenne vestimentaire, placée près du corps, voit une partie de son rayonnement absorbée ou réfléchi. Il est donc nécessaire de simuler son comportement sur un modèle humain à quatre couches illustré dans la Figure 4.9(a), avec une puissance de 0,5 W, afin d'évaluer correctement ses performances et son impact sur le corps. Les épaisseurs des différentes couches—peau, graisse, muscle et os—sont respectivement de 1,6 mm, 8 mm, 10 mm et 5,4 mm. Les propriétés diélectriques de chaque tissu (permittivité, conductivité (S/m), $\tan \delta$ et densité (kg/m^3)) aux fréquences de 2,45 GHz, 5 GHz, 5,8 GHz et 6,5 GHz sont calculées à l'aide de la méthode décrite dans [82].

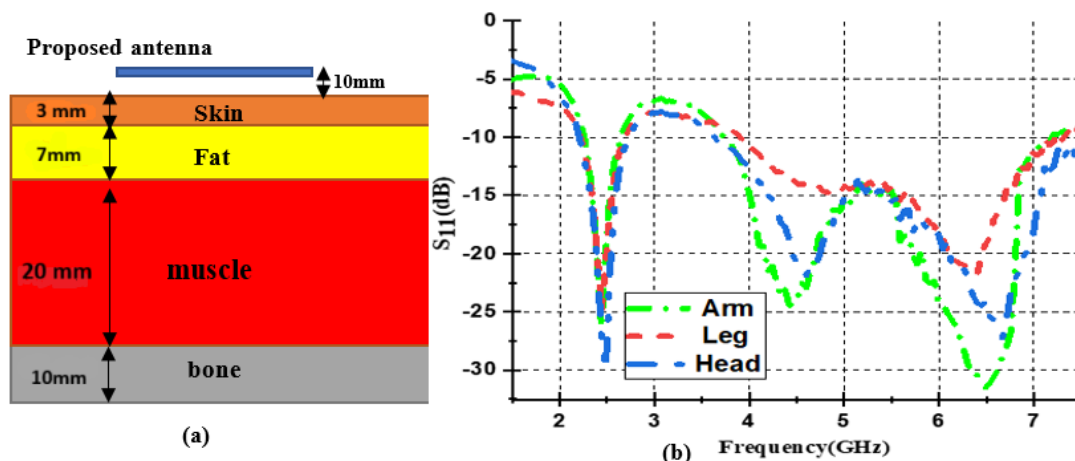


FIGURE 4.9 – a) Modèle biologique cubique simulé à 4 couches des tissus humains. (b) Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sur différentes parties du corps humain

Afin d'évaluer les performances de l'antenne lorsqu'elle est portée sur différentes parties du corps (bras, jambe et tête), des mesures ont été effectuées en positionnant l'antenne sur chacun de ces organes. Les résultats présentés dans la Figure 4.9(b) montrent que l'antenne proposée conserve ses performances quelle que soit la partie du corps sur laquelle elle est placée. De plus, elle couvre efficacement la bande de fréquences requise pour les mesures effectuées sur ces organes.

Figure 4.10 illustre les valeurs du Débit d'Absorption Spécifique (SAR) de l'antenne à différentes fréquences. Comme le montre l'analyse, le SAR reste dans des limites sûres pour les applications impliquant une proximité avec le corps humain. À 2,45 GHz avec

une puissance d'entrée de 0,5 W, la valeur moyenne du SAR sur 10 grammes est de 2 W/kg. De même, les valeurs de SAR sont de 1,1 W/kg à 5 GHz, 1,23 W/kg à 5,8 GHz et 1,37 W/kg à 6,5 GHz. Ces résultats confirment que l'antenne respecte les limites de SAR établies par la FCC et ICNIRP, validant ainsi son adéquation pour des applications portables sur le corps humain.

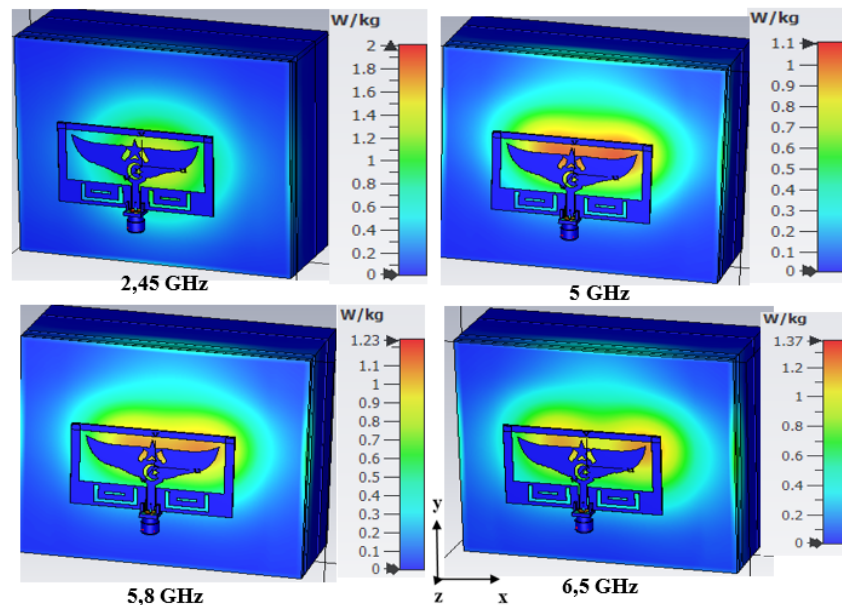


FIGURE 4.10 – Analyse du Débit d'Absorption Spécifique (SAR) à 2.45 GHz, 5 GHz, 5.8 GHz et 6.5 GHz

Le gain et l'efficacité de l'antenne lorsqu'elle est placée à proximité du corps humain sont illustrés dans la Figure 4.11(b). La Figure 4.12 compare les diagrammes de rayonnement mesurés et simulés, obtenus en chambre anéchoïque (Figure 4.11(a)), pour l'antenne proposée en présence du corps humain aux fréquences ciblées. Les résultats montrent une forte corrélation entre les simulations et les mesures, confirmant que l'antenne présente un diagramme de rayonnement directionnel dans le plan E ($\phi = 0^\circ$) et le plan H ($\phi = 90^\circ$), ce qui est particulièrement avantageux pour la communication hors-corps. Cette directivité s'explique notamment par la présence du corps humain, qui agit comme un réflecteur des ondes électromagnétiques, contribuant ainsi à concentrer le rayonnement dans une direction privilégiée. Les légères différences observées peuvent être attribuées aux variations pratiques de la permittivité diélectrique du substrat en jean et aux imperfections de fabrication. La Figure 4.12 représente une comparaison des diagrammes de rayonnement 2D numériques et mesurés dans les plans E ($\phi = 0^\circ$) et H ($\phi = 90^\circ$) (a) 2,45 GHz, (b) 5 GHz, (c) 5,8 GHz, (d) 6,5 GHz au niveau du corps humain

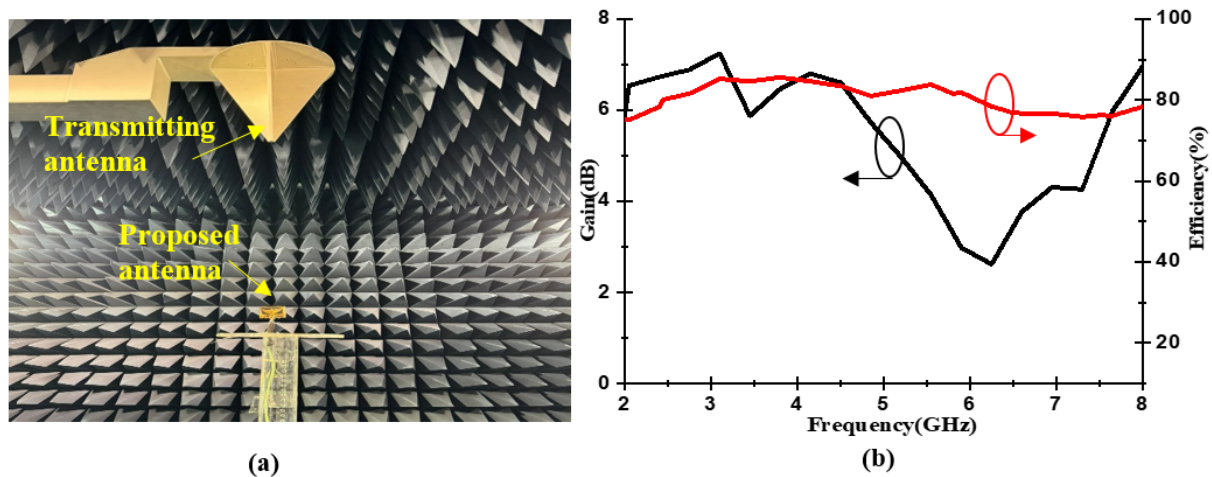


FIGURE 4.11 – (a) Mesure de l'antenne en chambre anéchoïque (b) Le Gain et le rendement de l'antenne au niveau corps humain

Pour évaluer la nouveauté de l'antenne proposée, une analyse comparative approfondie a été réalisée par rapport aux antennes précédemment rapportées utilisant des substrats textiles flexibles, comme résumé dans le Tableau 4.1. Cette analyse montre que la configuration de l'antenne proposée offre des avantages considérables en termes de compacité, de gain et d'efficacité par rapport aux autres antennes étudiées. De plus, l'antenne démontre des performances exceptionnelles en large bande sur les deux bandes de fréquence et maintient un seuil de débit d'absorption spécifique (SAR) remarquablement bas. Ces caractéristiques positionnent l'antenne proposée comme une solution très prometteuse pour les dispositifs portables en réseau corporel (WBAN et WLAN).

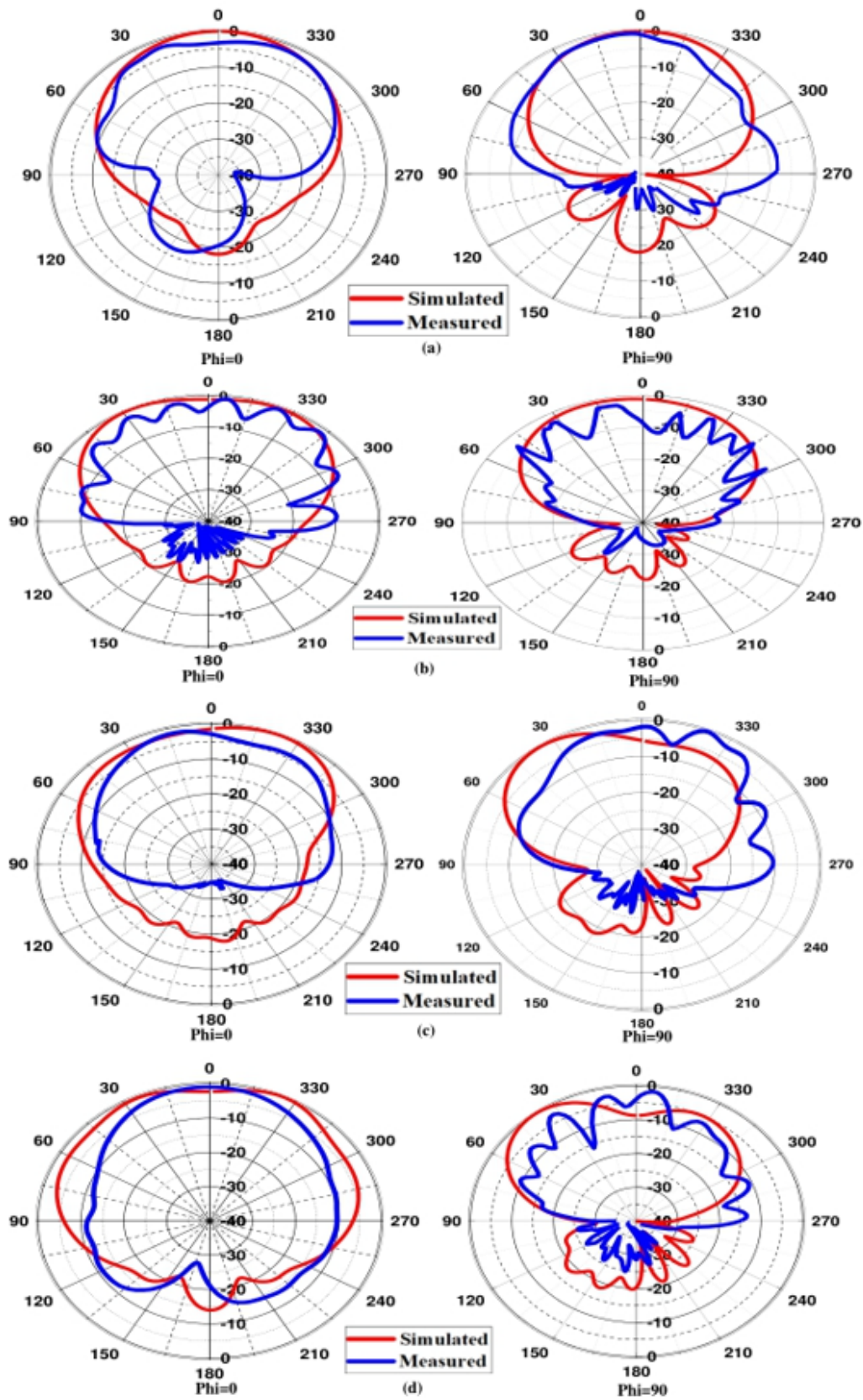


FIGURE 4.12 – comparaison du diagrammes de rayonnement 2D numériques et mesurés dans les plans E ($\phi = 0^\circ$) et H ($\phi = 90^\circ$) (a) 2,45 GHz, (b) 5 GHz, (c) 5,8 GHz, (d) 6,5 GHz au niveau du corps humain

TABLE 4.1 – Comparaison des performances de l'antenne proposée avec des travaux antérieurs

Réf.	Taille de l'antenne (λ_0^2)	Bp (GHz)	Substrat	Gain (dB)	Rendement (%)	SAR (W/kg)
[6] 2020	0.601×0.601×0.020	0.9–1 / 2.4–2.48	Feutre	2.23–2.38	/	0.47 / 0.52
[9] 2019	9.62×9.62×0.096	2.36–2.49	toison	6.8	74	0.09
[12] 2018	1.28×1.92×0.045	2.23–2.59	Denim	2	/	/
[13] 2020	7.23×7.73×0.0031	2.38–2.45	Coton	7.11	67.03	0.0328 (1g)
[14] 2022	3.27×2.8×0.05	2.43–2.48	Coton	4.34	/	0.48
[15] 2022	3.90×4.40×0.296	2.26–2.49	Denim	3.73	/	/
[16] 2023	3.13×2.79×0.052	1.8–4.87	Denim	5	90	/
[18] 2020	6.41×6.41×0.128	2.4–2.5 / 5.7–5.9	Feutre	6.33 / 6.98	/	0.042 / 0.09
[21] 2019	20.96×13.97×0.74	4.3–5.9	Pellon	6.12	/	0.37 (1g)
[22] 2023	5.13×5.13×0.109	1.4–3	Feutre	4.7	/	/
Ce travail	3.19×2.04×0.04	2.2–3 / 4.42–7.43	Denim	3.73 / 6.18	98 / 94.6	2 / 1.1 / 1.23 / 1.37

4.5 Conclusion

Ce travail présente la conception, la fabrication et la caractérisation d'une nouvelle antenne textile flexible et double-bande, adaptée aux applications WBAN, WLAN, ISM et Wi-Fi 6E (2,2-2,75 GHz et 3,63-7,43 GHz), et réalisée sur un substrat en jean économique. Conçue pour ces applications spécifiques, l'antenne intègre une forme géométrique unique inspirée du logo de la forces aériennes algériennes. Un mécanisme d'alimentation par guide d'ondes coplanaire (CPW) est utilisé pour obtenir un fonctionnement large bande. Un excellent accord entre les coefficients de réflexion simulés et mesurés valide l'approche de conception, tant en espace libre qu'à proximité du corps humain. L'antenne présente des diagrammes de radiation omnidirectionnels et bidirectionnels robustes dans le plan E et le plan H, respectivement. Les valeurs de gain atteignent 3,7 dBi à 2,45 GHz, 3,41 dBi à 5 GHz, 5,65 dBi à 5,8 GHz et 6,18 dBi à 6,5 GHz. Une haute efficacité de radiation est maintenue sur l'ensemble des bandes de fonctionnement, dépassant 91%. L'antenne démontre une excellente stabilité mécanique sous des courbures de flexion variant de 70 mm à 140 mm. De plus, l'antenne présente une dégradation minimale de ses performances lorsqu'elle est placée à proximité du corps humain, sur différents emplacements (bras, jambe et tête). Les simulations numériques et les mesures confirment le diagramme de radiation directionnelle de l'antenne. Enfin, une analyse complète du DAS (Débit d'Absorption Spécifique) sur un modèle de fantôme biologique garantit la conformité avec les réglementations de la FCC et ICNIRP pour les applications portées sur le corps. Cette antenne multifonctionnelle offre une solution prometteuse pour des applications dans la gestion de la main-d'œuvre, le contrôle d'accès sécurisé et les systèmes d'identification,

grâce à sa combinaison unique de flexibilité, de performance large bande et de conformité aux normes de sécurité.

Chapitre 5

Miniaturisation d'une antenne monopole textile conformable bi-bande pour les applications WBAN et WLAN

5.1 Introduction

Ce travail présente une antenne microstrip textile bi-bande miniaturisée, offrant des caractéristiques conformables et des performances robustes pour les bandes des réseaux WBAN (Wireless Body Area Network) et WLAN (Wireless Local Area Network) à 2,45 GHz et 5,38 GHz. L'antenne proposée est 78% plus petite qu'une antenne conventionnelle. Son design intègre le logo de la Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures (Sonatrach). L'antenne est réalisée sur un substrat en denim, un matériau diélectrique léger et peu coûteux, et offre une bande passante d'impédance de -10 dB pour deux bandes de fréquences allant de 2,37 à 2,51 GHz et de 4,99 à 5,72 GHz. Un prototype a été fabriqué et validé par des mesures expérimentales. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec les simulations. De plus, les performances de l'antenne à proximité du corps humain ont été étudiées, démontrant des performances satisfaisantes aussi bien en espace libre qu'en présence du corps humain. L'antenne proposée constitue une solution économique pour diverses applications électroniques portables. Elle se présente comme une alternative prometteuse pour la gestion optimisée des travailleurs, le contrôle d'accès sécurisé et l'identification.

Ce travail présenté dans ce chapitre est principalement basé sur la publication suivante :

Bouaza.Abdelmaoula, Touhami, R., Tedjini, S., Jabbar, A., Ur-Rehman, M., & Ramzan, N. (2025). Miniaturization of a Conformal Dual-Band Wearable Textile Monopole Antenna for WBAN and WLAN Applications. *International Journal of Communication Systems*, 38(7), e70046.

5.2 Conception de l'antenne proposée, résultats de simulation et analyse

Les étapes d'évolution de la conception ainsi que la structure de l'antenne proposée sont illustrées dans la Figure 5.2. L'antenne est fabriquée sur un substrat en jean d'une épaisseur de 0,7 mm, avec une permittivité relative $\epsilon_r = 1,7$ et une tangente de perte de 0,025. Les pistes conductrices sont réalisées en cuivre d'épaisseur 0,08 mm. L'antenne textile est alimentée par une ligne micro-ruban de 50 Ω . L'évolution de la conception comprend un calcul initial des dimensions du patch rectangulaire, déterminées à 46,5 mm de largeur et 52,69 mm de longueur, respectivement [92]. La taille de l'antenne proposée a été réduite d'environ 78% par rapport à celle d'une antenne conventionnelle, comme l'illustre la Figure 5.1. La largeur est calculée en utilisant l'équation (5-1).

$$w = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (5-1)$$

La permittivité diélectrique effective du substrat est calculée en utilisant l'équation (5-2) :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5-2)$$

En raison de l'effet de frange, l'augmentation de la longueur est donnée par l'équation (5-3) :

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (5-3)$$

La longueur du patch est calculée en utilisant l'équation donnée par l'équation (5-4) :

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta l \quad (5-4)$$

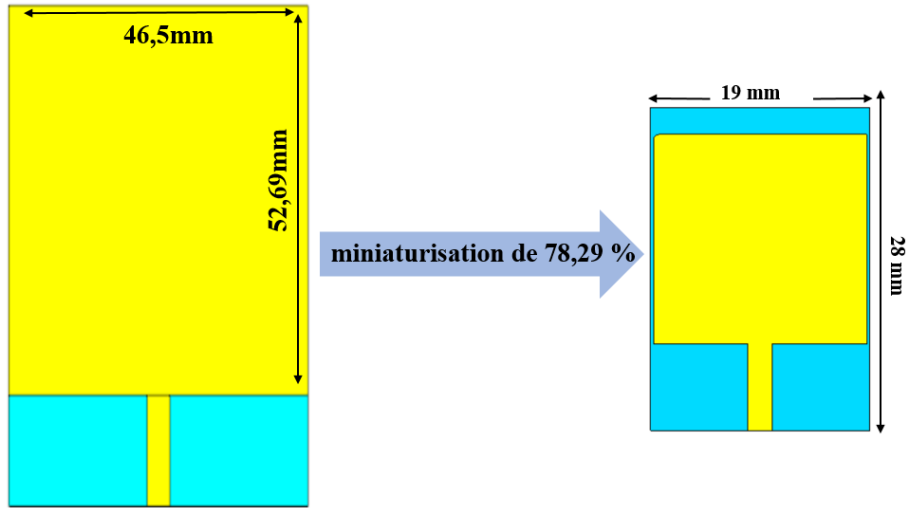


FIGURE 5.1 – la miniaturisation de l'antenne .

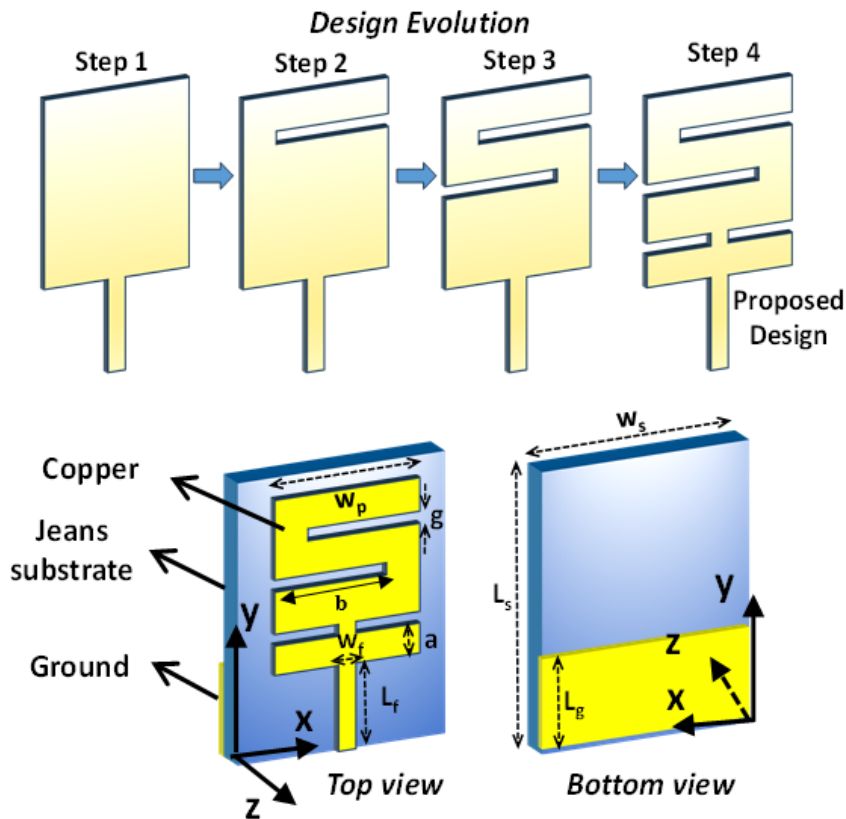


FIGURE 5.2 – Étapes d'évolution de la conception et schéma de l'antenne proposée

F_r est la fréquence de résonance, c est la vitesse de la lumière : 3×10^8 m/s, and ε_r est la permittivité relative du substrat diélectrique[92]. Les dimensions de la ligne micro-ruban

sont choisies pour répondre à deux objectifs essentiels : premièrement, le paramètre W est sélectionné afin d'obtenir une impédance de 50Ω , L'impédance de la ligne micro-ruban est déterminée par le type de substrat utilisé (ϵ_r) l'épaisseur du diélectrique (h), l'épaisseur de la métallisation, ainsi que la largeur de la ligne micro-ruban W_f . La largeur de la ligne micro-ruban peut être calculée à partir de l'équation de l'impédance caractéristique donnée par [92]

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) \quad (5-5)$$

For $W/d \leq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right) \right]} \quad (5-6)$$

For $W/d \geq 1$

La longueur de la ligne micro-ruban est choisie afin d'assurer une bonne adaptation et de maximiser le couplage souhaité entre la ligne micro-ruban et la fente étagée. L'antenne micro-ruban standard présente intrinsèquement une bande passante étroite; par conséquent, des fentes soigneusement conçues ont été introduites afin de couvrir plusieurs bandes de résonance (bi-bande) pour les applications WBAN. Le plan de masse a été réduit au quart de la longueur totale de l'antenne. La conception optimisée d'antenne est illustrée dans la Figure 5.2. Le Tableau 5.1 présente les dimensions optimisées de la configuration d'antenne conçue.

TABLE 5.1 – Dimensions de l'antenne proposée en millimètres (mm).

paramètres	Valeur (mm)
L_S longueur du substrat	28
W_s largeur du patch	19
W_p Width of the patch	18.5
L_g longueur du plan de masse	6.9
L_f longueur de la ligne d'alimentation	2.20
W_f largeur de la ligne d'alimentation	7.5
a	3.8
b longueur de la fente	16.5
g largeur de la fente	1.1

5.3 Analyse et discussion des résultats de simulation

Le patch rectangulaire présenté à l'étape 1 de la Figure 5.2 montre une résonance unique autour de 4,6 GHz. Afin de modifier la distribution du courant et d'introduire de nouvelles résonances, une fente rectangulaire horizontale est ajoutée dans le coin supérieur droit du patch (étape 2). Cette fente génère une résonance supplémentaire aux environs de 3,15 GHz et 5,75 GHz, où le coefficient de réflexion (S_{11}) est inférieur à -10 dB. À l'étape 3, une autre fente rectangulaire de mêmes dimensions est insérée au centre du patch, orientée vers la gauche. Cette modification allonge davantage le trajet du courant, entraînant une diminution de la fréquence de résonance à environ 2,54 GHz, avec un facteur de qualité élevé et un (S_{11}) d'environ -36,74 dB. Cependant, la seconde résonance (présente à l'étape 2) disparaît en raison d'une interférence destructive mutuelle et de directions opposées du courant. Enfin, à l'étape 4, deux fentes rectangulaires horizontales symétriques sont ajoutées dans la partie inférieure du patch, permettant d'obtenir une résonance double bande. Cette configuration prolonge encore davantage le trajet du courant par rapport aux étapes précédentes, ce qui entraîne un décalage de la fréquence de résonance de 2,54 GHz à 2,45 GHz et l'apparition d'une nouvelle résonance autour de 5,38 GHz. La bande passante d'impédance obtenue pour (S_{11}) inférieur à -10 dB s'étend de 2,37 à 2,51 GHz et de 4,99 à 5,72 GHz. Les coefficients de réflexion pour les différentes étapes de l'évolution du design (Figure 1) sont illustrés dans la Figure 5.3.

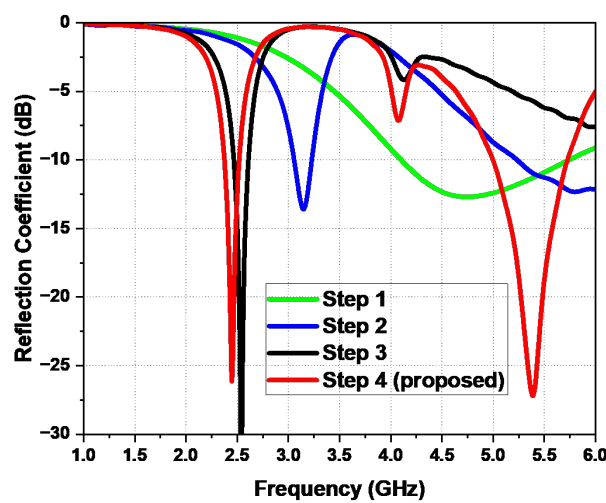


FIGURE 5.3 – Coefficient de réflexion simulé des configurations d'antenne évolutives

La distribution du courant de surface de l'antenne bi-bande proposée est clairement illustrée dans la Figure 5.4. Il est possible d'observer que la densité de courant maximale se situe principalement au niveau des fentes du patch. À 2,45 GHz, la concentration maximale du courant électrique est localisée sur les deux fentes supérieures (étapes 2 et 3). En revanche, à 5,38 GHz, une forte concentration du courant est observée au niveau des deux fentes symétriques situées dans la partie inférieure du patch. Par conséquent, les deux premières fentes sont responsables de la résonance autour de 2,45 GHz (Figure 5.4(a)), tandis que la résonance à 5,38 GHz est générée par les deux fentes symétriques de l'étape 4 (Figure 5.4(b)).

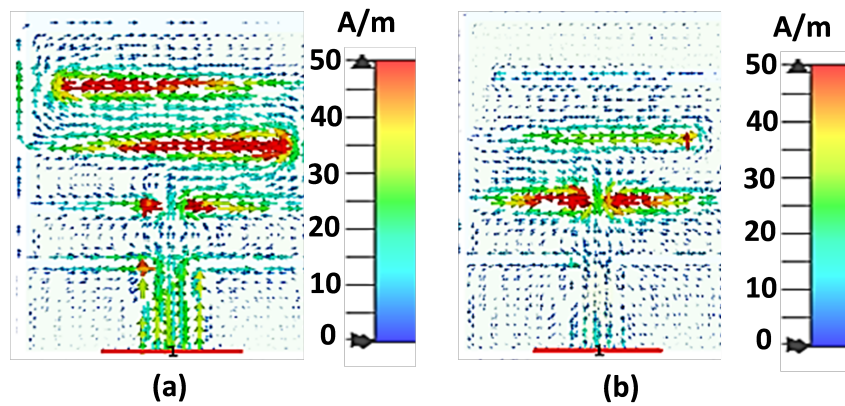


FIGURE 5.4 – Analyse de la distribution du courant de surface de l'antenne proposée : (a) à 2,45 GHz et (b) à 5,38 GHz

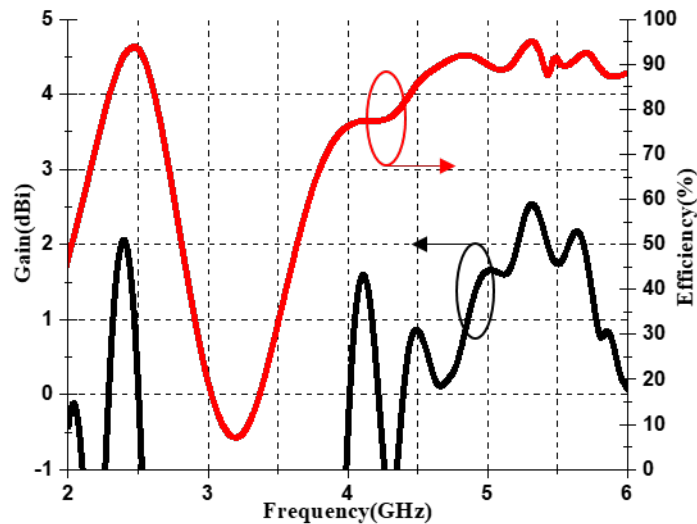


FIGURE 5.5 – le gain et l'efficacité de rayonnement du design proposé en espace libre

La Figure 5.5 présente le gain réalisé simulé ainsi que le rendement de rayonnement de l'antenne proposée. Cette dernière atteint un gain réalisé de 2 dBi dans la bande basse et de 2.31 dBi dans la bande haute. De plus, le rendement de rayonnement atteint 94% dans la bande basse et 91% dans la bande haute.

L'étude paramétrique de la géométrie de l'antenne est essentielle pour analyser son impact sur les performances. Une analyse de la variation du paramètre correspondant à la largeur des fentes (g) a été menée, révélant un effet minimal sur la résonance, comme illustré dans la Figure 5.6(a). Par ailleurs, l'effet de différents types de matériaux textiles (ayant la même épaisseur) sur le coefficient de réflexion de l'antenne (bande passante) est illustré dans la Figure 5.6(b). Comme le montre cette figure, la bande passante d'impédance de l'antenne est affectée par la variation de la permittivité des matériaux textiles utilisés. Les paramètres des matériaux textiles étudiés, ainsi que leurs coefficients de réflexion et les gains simulés correspondants, sont présentés dans le Tableau 5.2.

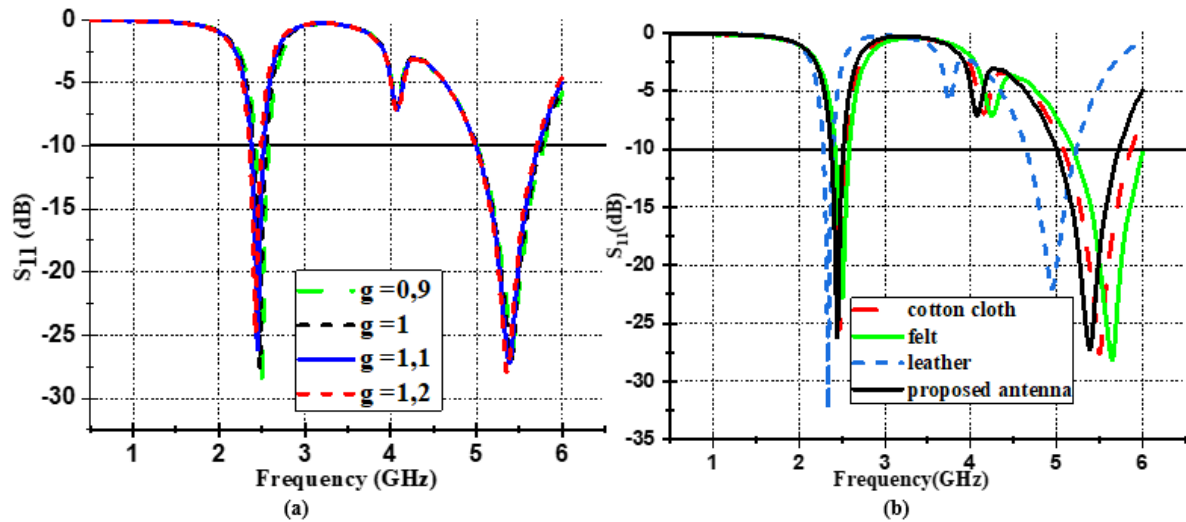


FIGURE 5.6 – Effet sur le coefficient de réflexion : (a) variation des écarts des fentes (g) en mm, (b) utilisation de différents substrats de textiles

Un autre paramètre crucial influençant les performances de l'antenne bi-bande proposée est la longueur du plan de masse partiel (L_g). Afin d'évaluer son impact, une étude paramétrique a été réalisée en faisant varier L_g . Comme illustré dans la Figure 5.7, le fonctionnement de l'antenne reste largement inchangé malgré les variations de la longueur du plan de masse partiel.

TABLE 5.2 – Propriétés diélectriques des différents substrats simulés, ainsi que leurs fréquences de résonance et leurs gains.

Substrat	Fréquence (GHz)	permittivité	Loss tangent	Gain (dB)
Coton [75]	2.47 / 5.5	1.51	0.04	1.65/1.69
Cuir [86]	2.34 / 4.95	2.72	0.02	1.77/1.84
Feutre [93]	2.5 / 5.65	1.3	0.044	1.65/1.67
Jeans (Ce travail)	2.45 / 5.38	1.7	0.025	2/2.31

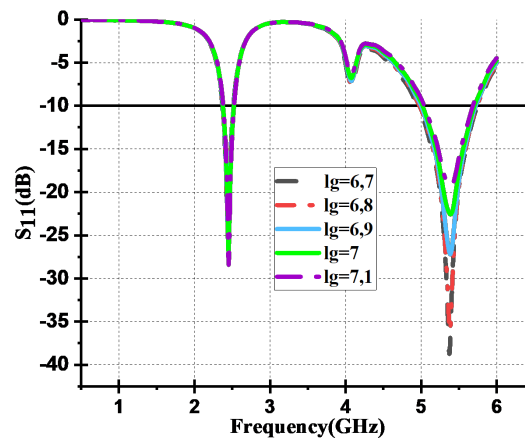


FIGURE 5.7 – Influence de la variation de L_g sur le coefficient de réflexion

L'évolution du modèle de circuit équivalent pour l'antenne proposée est illustrée dans la Figure 5.9. Une antenne patch textile rectangulaire conventionnelle peut être approximée par un circuit RLC parallèle simple résonant (Figure 9, Étape 1). Les valeurs de R , L et C sont présentées dans le Tableau 5.3 et peuvent être déterminées par des formules standards [65]. Ce modèle présente une seule résonance à 13 GHz.

L'introduction d'une fente rectangulaire dans le patch (Figure 5.2, Étape 2) modifie de manière significative le comportement résonant (Figure 5.9, Étape 2). Deux composantes de courant apparaissent : (I) le courant conventionnel et (II) un courant sinusoïdal circulant autour de la fente, allongeant ainsi le chemin effectif du courant [65]. Cela entraîne des discontinuités dans les champs électrique et magnétique à travers la fente, introduisant une inductance série supplémentaire ΔL_1 et une capacité ΔC_1 dans le circuit équivalent. Ce modèle modifié permet d'obtenir une fréquence de résonance réduite, d'environ 11 GHz. De manière similaire, l'ajout d'une seconde fente (Figure 5.2, Étape 3) modifie davantage

le circuit en introduisant une autre inductance série ΔL_2 et une capacité ΔC_2 (Figure 5.9, Étape 3), ce qui réduit la fréquence de résonance à 8,5 GHz. La configuration finale de l'antenne (Figure 5.2, Étape 4), comprenant deux fentes symétriques horizontales, est modélisée en ajoutant des capacités parallèles ΔC_{S1} ΔC_{S2} , au circuit précédent (Figure 5.9, Étape 4) [94]. Cela permet d'obtenir une résonance unique à 2,45 GHz. Pour introduire une seconde résonance à 2,38 GHz, un bloc de circuit identique, incluant une inductance supplémentaire L_c et une capacité C_c est connecté en parallèle au circuit existant (Figure 5.9, Étape 5). Le coefficient de réflexion simulé pour chaque étape est présenté dans la Figure 5.8.

TABLE 5.3 – Valeurs des composants optimisés du circuit équivalent.

Components	Values	Components	Values
R	50 Ω	ΔL_2	0.95 nH
L	0.3 nH	ΔC_{s1}	1.2 pF
C	0.5 pF	ΔC_{s2}	1.4 pF
ΔC_1	0.7 pF	L_c	0.34 nH
ΔL_1	0.4 nH	C_c	1.4 pF
ΔC_2	0.7 pF	Z_a	50 Ω

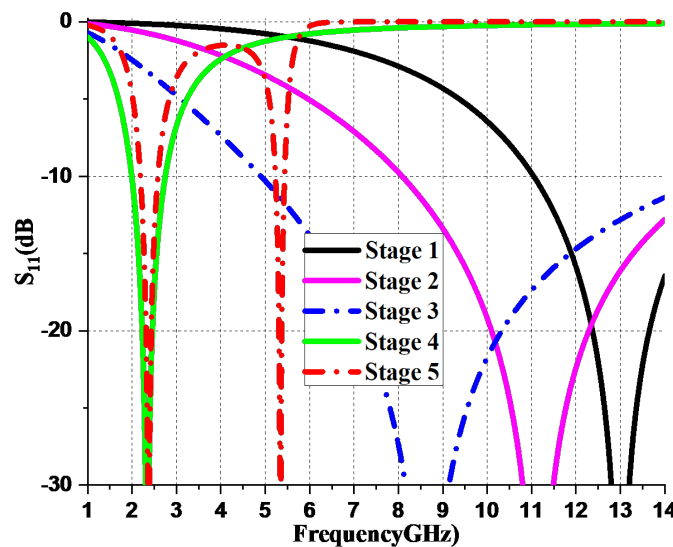


FIGURE 5.8 – Coefficient de réflexion du modèle de circuit équivalent

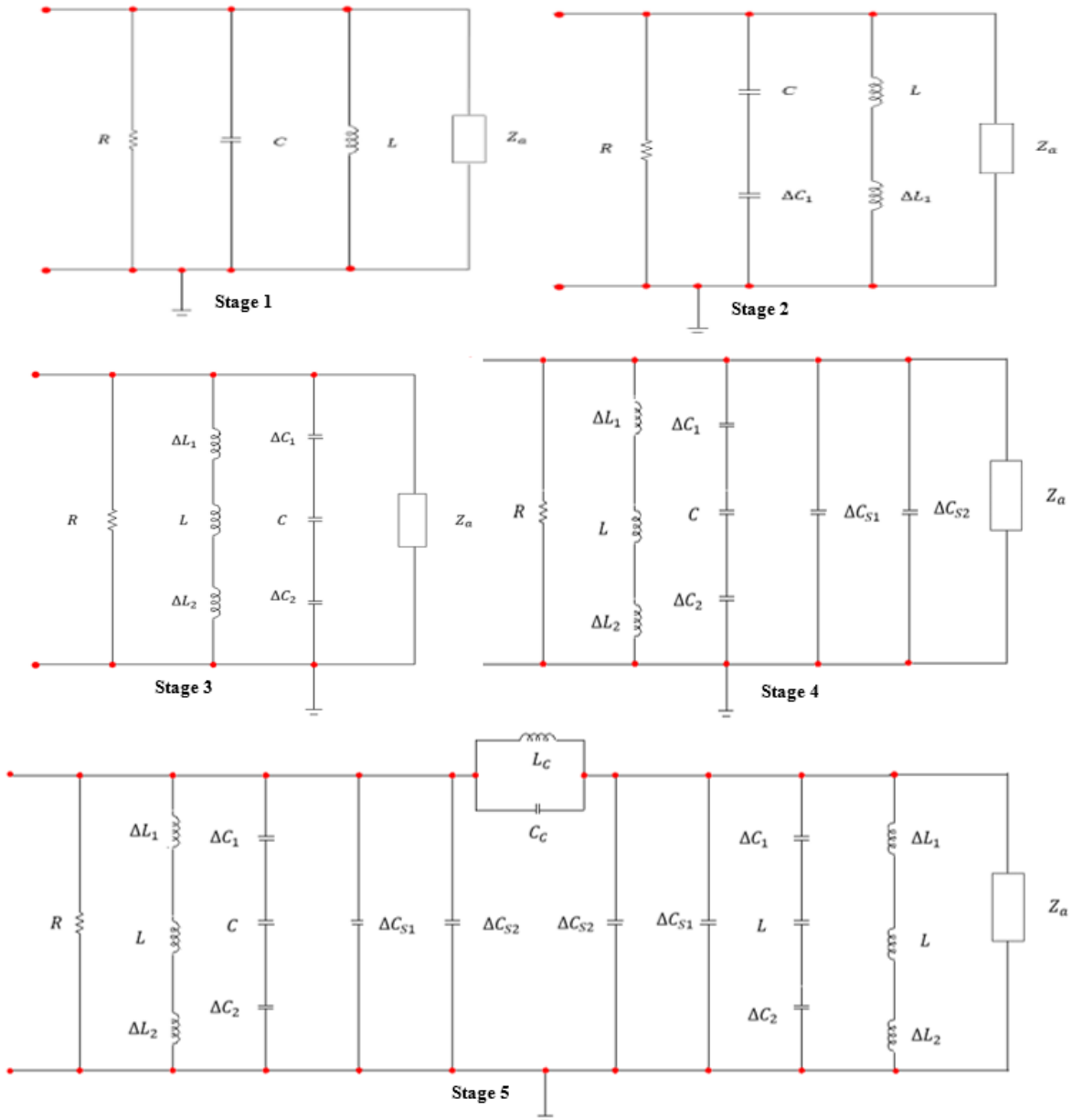


FIGURE 5.9 – Circuit équivalent de l'antenne proposée

5.4 Fabrication et mesures de l'antenne

L'antenne proposée a été fabriquée, et la photographie du prototype est présentée dans la Figure 5.10. Le coefficient de réflexion a été mesuré à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) E8362B. La mesure de coefficient de réflexion est illustrée dans la Figure 5.11. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats de simulation. De légères divergences sont observées, attribuables aux variations pratiques de la permittivité

diélectrique du substrat en jean ainsi qu'à la rugosité introduite lors du processus de fabrication.

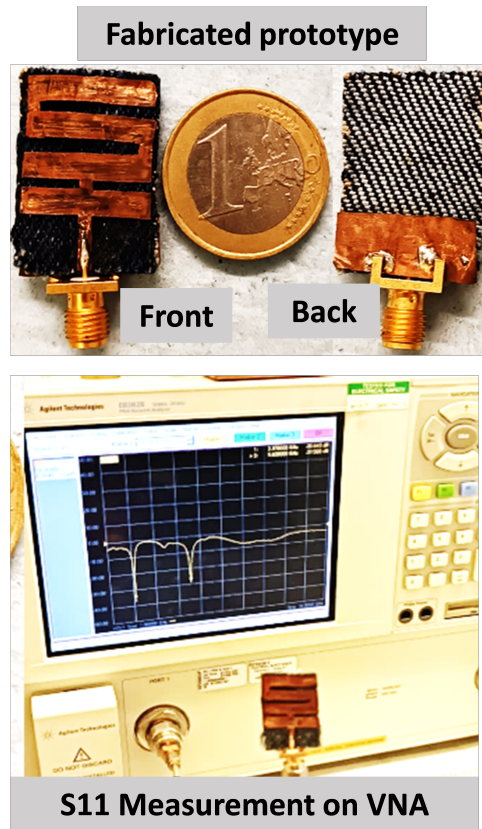


FIGURE 5.10 – Prototype fabriqué et mesure du coefficient de réflexion à l'aide du VNA.

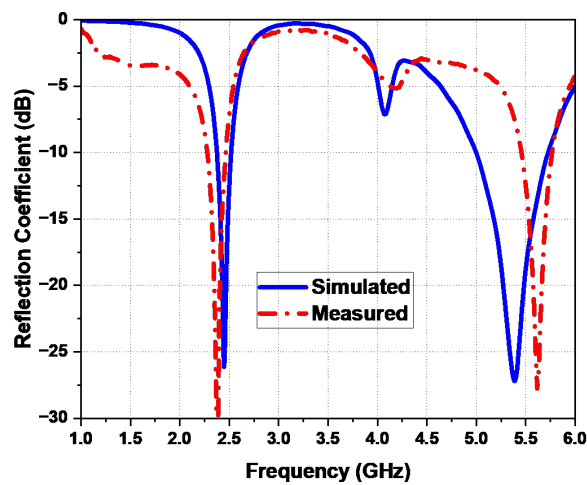


FIGURE 5.11 – Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée

Les diagrammes de rayonnement aux fréquences de résonance, notamment 2,45 GHz et 5,5 GHz, ont été mesurés dans la chambre anéchoïque, comme illustré dans la Figure 5.13. Comme le montre la Figure 5.12, l'antenne proposée présente un diagramme de rayonnement omnidirectionnel aux deux fréquences dans le plan $\phi = 0^\circ$. En revanche, elle affiche un faisceau directionnel aux deux fréquences de résonance dans le plan $\phi = 90^\circ$.

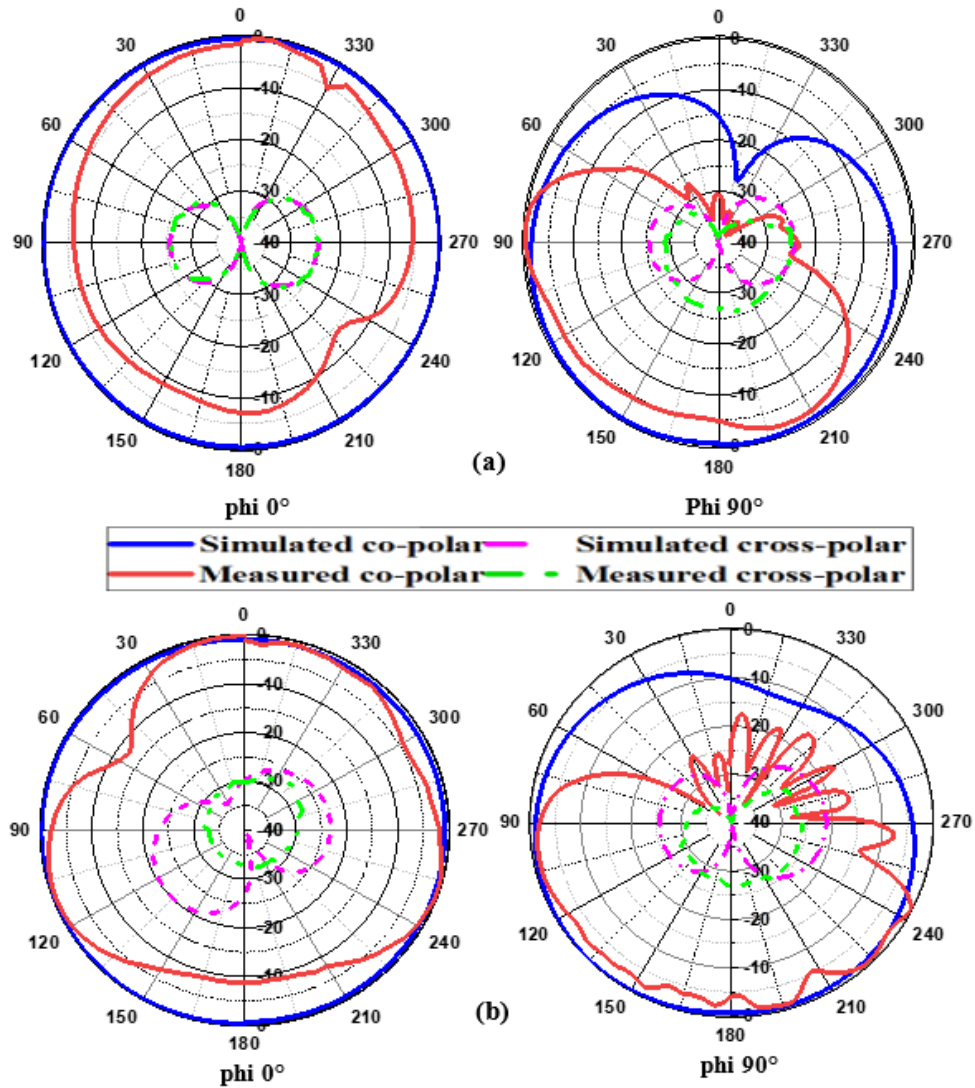


FIGURE 5.12 – Diagrammes de rayonnement mesurés dans les plans $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 90^\circ$. (a) 2.45 GHz (b) 5.5 GHz

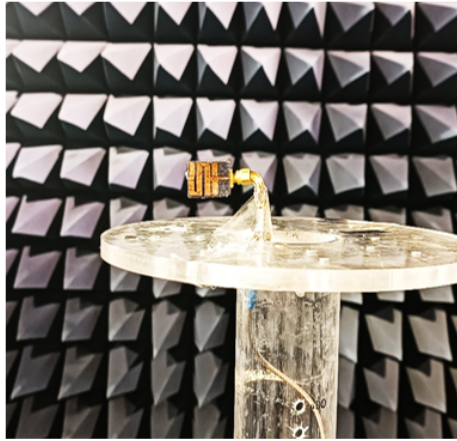


FIGURE 5.13 – Prototype d'antenne fabriqué dans la chambre anéchoïque

Pour évaluer l'impact de la flexion et de la conformité lors du déploiement de l'antenne vestimentaire proposée, nous avons mesuré expérimentalement ses performances sous différentes conditions de courbure. L'antenne a été placée sur un cylindre en polystyrène avec une permittivité diélectrique $\epsilon_r \approx 1$ et des diamètres variés de 10 mm, 70 mm, 80 mm, 100 mm et 140 mm afin d'introduire différents degrés de courbure, comme illustré dans la Figure 5.14(a). Le coefficient de réflexion mesuré s'avère robuste face à une large gamme de variations de flexion et montre un effet minimal sur S_{11} , comme démontré dans la Figure 5.14(b).

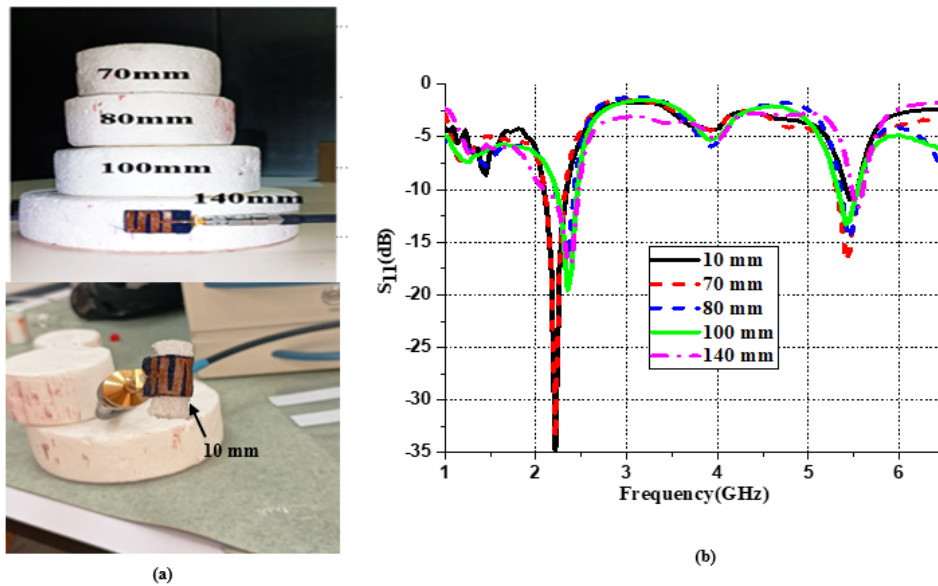


FIGURE 5.14 – Coefficient de réflexion mesuré pour différentes courbures de flexion

5.5 Performances sur le corps humain de l'antenne proposée et effet du matériau réflecteur

Une antenne vestimentaire proche du corps voit une partie de son rayonnement absorbée ou réfléchi. Il est donc essentiel d'évaluer l'effet du corps sur ses performances. Pour cela, une simulation est réalisée sur un modèle humain rectangulaire à quatre couches, avec une puissance d'entrée de 0,5 W, comme illustré à la Figure 5.15. Les propriétés diélectriques sont calculées à l'aide de [95]. Les propriétés diélectriques ainsi que l'épaisseur de chaque tissu aux deux fréquences (2,45 GHz et 5,5 GHz) sont résumées dans le tableau 5.4. De plus, l'effet de l'écart entre le corps et l'antenne, variant jusqu'à 30 mm, est également analysé.

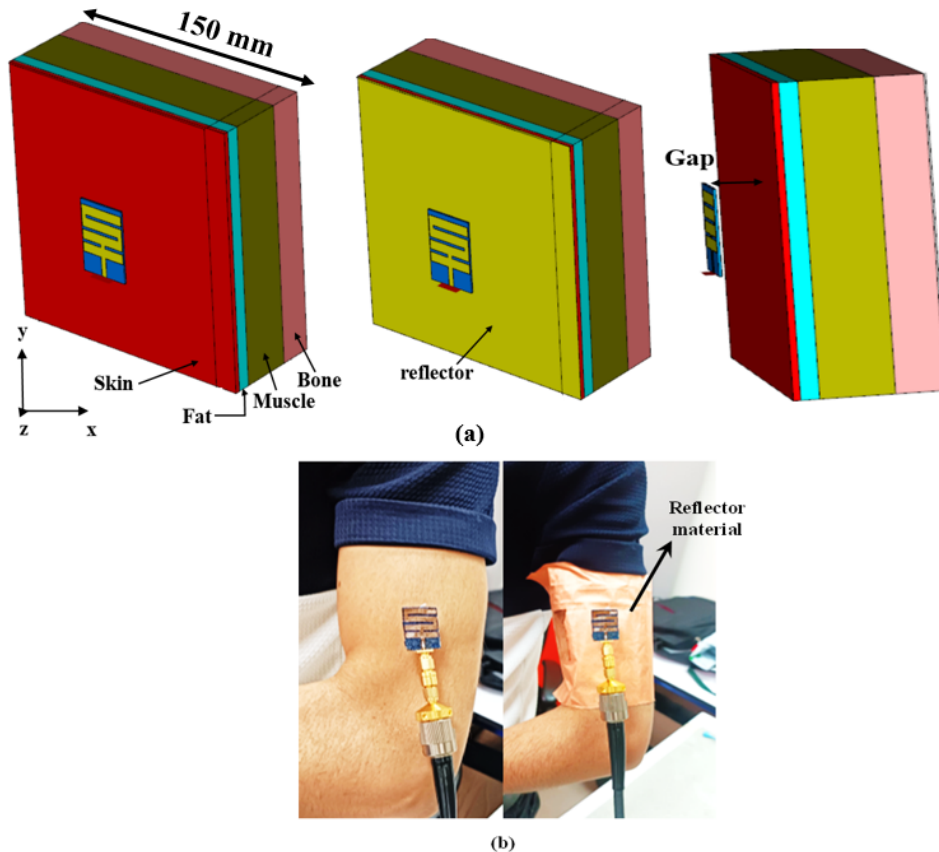


FIGURE 5.15 – (a) Modèle rectangulaire du bras humain à quatre couches. (b) Placement de l'antenne fabriquée sur le bras humain

TABLE 5.4 – Propriétés du modèle rectangulaire du corps humain en fonction des fréquences

Couche	Peau	Graisse	Muscle	Os
Épaisseur (mm)	1.6	8	10	5.4
2.45 GHz				
ε_r	38	5.28	52.72	11.38
σ (S/m)	1.464	0.104	1.73	0.39
Tang δ	0.282	0.145	0.24	0.023
Densité (kg/m ³)	1100	1100	1040	1850
5.5 GHz				
ε_r	35.36	4.98	48.88	9.81
σ (S/m)	3.46	0.274	4.61	1.08
Tang δ	0.32	0.18	0.34	0.361
Densité (kg/m ³)	1077	893	1014	1938

L'épaisseur du matériau réfléchissant utilisé dans cette étude est d'environ 0,035 mm, comme illustré à la Figure 5.15. L'effet du SAR est simulé et tracé dans la Figure 5.16, qui montre que le SAR est considérablement réduit en présence d'un réflecteur.

Après analyse du SAR dans le scénario où l'élément rayonnant est directement monté sur le corps humain, il a été observé que le SAR dépasse 2 W/kg dans les deux bandes de fréquence. Pour atténuer cet effet, nous avons utilisé une technique impliquant un tissu réfléchissant, ce qui a permis de réduire les valeurs du SAR, comme présenté dans le Tableau 5.5. De plus, en augmentant l'écart entre le corps et l'antenne, et en utilisant un matériau réfléchissant sous l'antenne, le gain et l'efficacité de rayonnement ont été améliorés. Le gain et l'efficacité de rayonnement réalisés pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain sont illustrés respectivement dans la Figure 5.17.

Une comparaison des performances de l'antenne proposée avec d'autres travaux similaires est présentée dans le Tableau 5.5. Cette analyse révèle que la configuration d'antenne proposée offre des avantages considérables en termes de compacité, de gain, d'efficacité et de SAR. Par rapport aux autres antennes étudiées, les coefficients de réflexion S_{11} mesurés

et simulés de l'antenne conçue sur les tissus humains, avec et sans réflecteur, sont tracés dans la Figure 5.18.

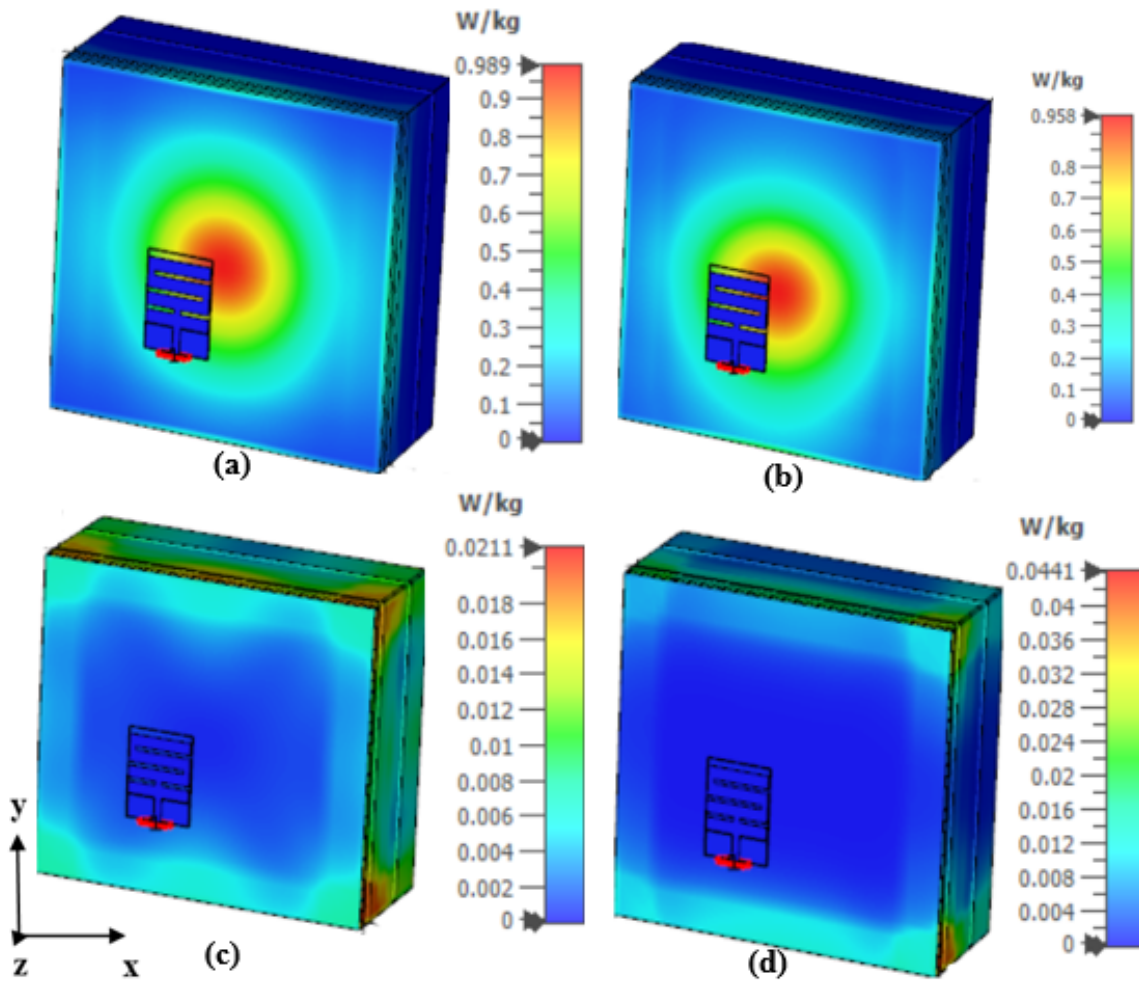


FIGURE 5.16 – Analyse du SAR (a) 2,45 GHz sans réflecteur (b) 5,5 GHz sans réflecteur (c) 2,45 GHz avec réflecteur (d) 5,5 GHz avec réflecteur en utilisant un écart de 30 mm

La figure 5.19. présentent une analyse comparative des diagrammes de rayonnement normalisés simulés et mesurés de l'antenne fabriquée sur le corps humain à deux fréquences, à la fois en l'absence et en présence d'un réflecteur. Les résultats montrent un accord remarquable, confirmant l'adéquation de l'antenne pour les communications sur et hors du corps.

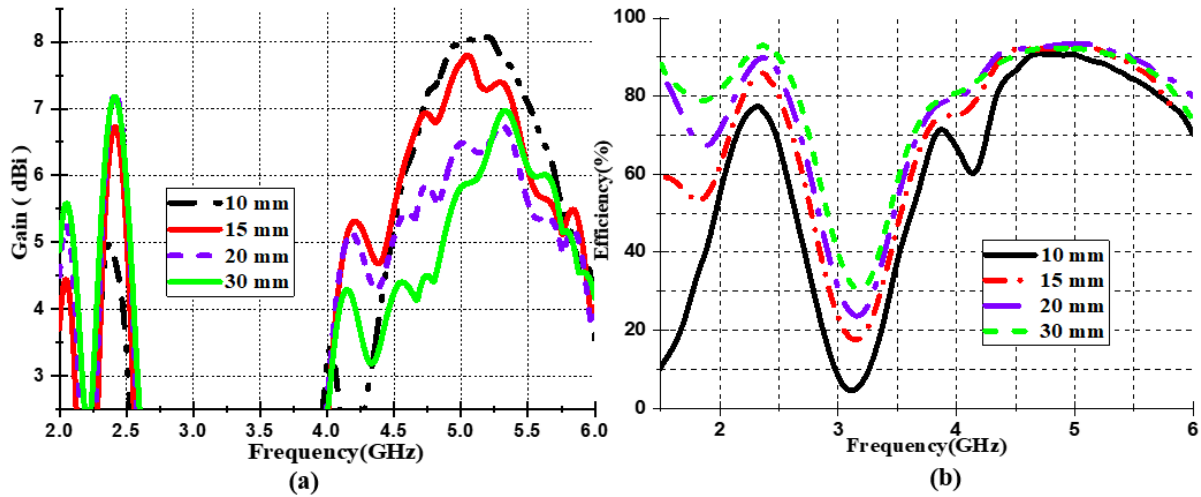


FIGURE 5.17 – (a) Effet sur le gain simulé pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain. (b) Effet sur l'efficacité de rayonnement simulée pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain.

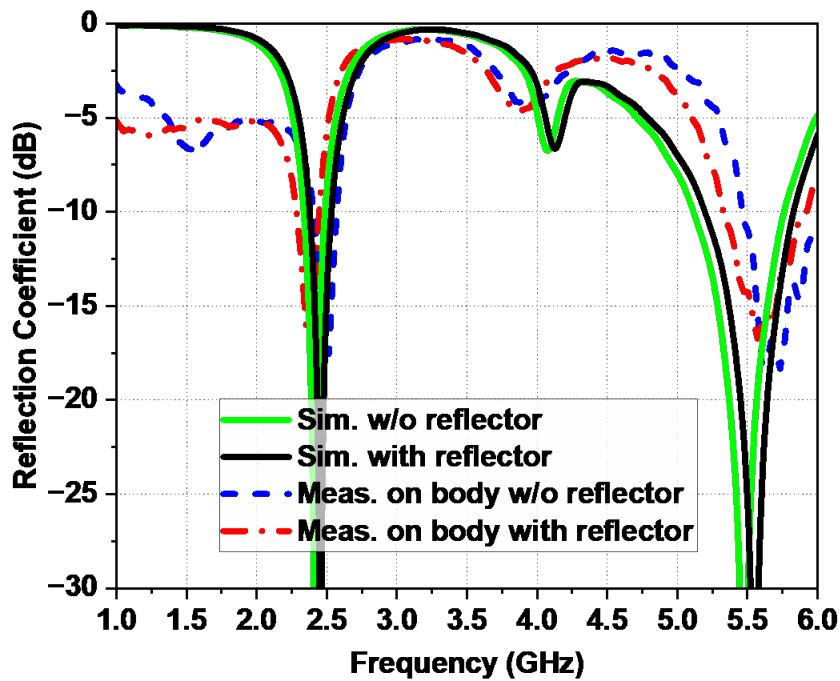


FIGURE 5.18 – Coefficient de réflexion mesuré et simulé sur le corps avec et sans matériau réflecteur

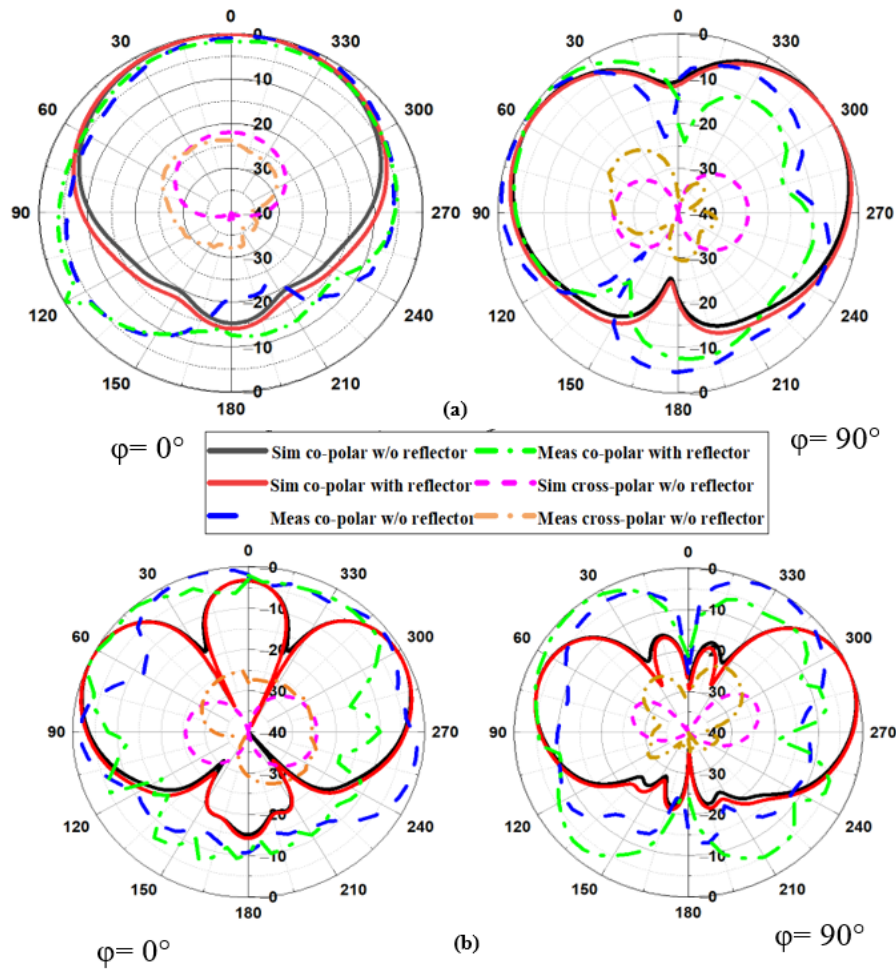


FIGURE 5.19 – Caractéristiques des diagrammes de rayonnement ($\Phi=0^\circ$ et $\Phi=90^\circ$) de l'antenne proposée sur le corps avec et sans réflecteur à (a) 2,45 GHz et (b) 5,5 GHz

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons une antenne vestimentaire conforme à double bande conçue sur un substrat en jean à faible coût. L'antenne proposée fonctionne efficacement dans les bandes WBAN et WLAN à 2,45 et 5,5 GHz, respectivement. Notamment, la taille de l'antenne est réduite de 78 % par rapport aux conceptions conventionnelles. Grâce à des tests de flexion approfondis, les mesures simulées et sur le corps montrent que l'antenne maintient des performances robustes dans diverses conditions. L'alignement entre les résultats mesurés et simulés souligne la fiabilité de notre conception.

Cette antenne se distingue comme une solution adaptable pour diverses applications électroniques vestimentaires grand public. Sa durabilité et son adaptabilité à différents substrats textiles la rendent particulièrement adaptée à l'amélioration de la gestion des effectifs et à la localisation, notamment par l'utilisation de drones pour suivre les travailleurs sur des bases pétrolières.

Dans l'ensemble, la conception proposée de l'antenne promet des avancées significatives dans le domaine des technologies vestimentaires.

TABLE 5.5 – Performance de l'antenne pour différentes distances de l'antenne par rapport au corps humain dans la plage de 1 mm à 30 mm

Fréquence(GHz)	Gap (mm)	Fr(GHz)	S ₁₁	Gain avec et sans réflecteur	SAR avec et sans réflecteur	Efficacité avec et sans réflecteur
2.45 GHz	1	1.86/5.39	-21/-38.2	-1.2	/	/
	10	2.4/4.08/5.23	-9.6/-12.55/19.88	2.26/6.26	10.2	31/77
	15	2.4/4.06/5.2	-11.2/-10.27/-24	4.42/6.68	5.17	52.9/85
	20	2.4/5.32	-14.6/-16.76	5.45/6.6	2.7/1.29	66.4/90
	30	2.4/5.45	-30/-49	5.89/7.17	0.021/0.989	79.08/92.6
5.5 GHz	1	4.25	-4.2	-1	/	/
	10	2.4/4.1/5.2	4/19.9/-15.7	4.43/7.5	0.0011/0.0014	72/85
	15	2.4/4.0/5.15	-7/-11.5/-25.2	6.22/7.17	0.017/0.018	83.3/89
	20	2.38/4/5.3	-12/-8/-15	6.83/6.58	0.019/0.023	88.1/90.33
	30	2.38/5.47	-32.15/-45.75	6.86/6.80	0.044/0.958	91.6/90

TABLE 5.6 – Comparaison des performances de l'antenne proposée avec la littérature existante.

Réf.	Taille de l'antenne (L × W × h) (λ_0)	Fréquence (GHz)	Techniques de réduction du SAR	Gain (dB)	Efficacité (%)	SAR (W/Kg)
[34]	0.28×0.28×0.004	2.45	Réflecteur	7.3	80	0.09
[96]	0.24×0.48×0.016	2.4 / 5.8	EBG	4.5/5.6	/	0.0668/0.0485
[81]	0.28×0.36×0.019	2.45	HIS	7.47	71.8	0.0257
[97]	0.78×0.78×0.11	5.8	AMC	7.47	60	4.8 (1g de tissu)
[98]	0.38×0.24×0.005	2.45 / 5.2	/	2.5 / 4.6	20 / 60	0.17 / 0.46
[99]	0.33×0.36×0.005	2.45 / 5.8	/	3.74 / 5.13	91.4 / 92.3	0.57 / 0.13
[100]	0.42×0.32×0.014	2.45 / 5.8 / 8	/	0.36/4.82/6.75	65.8/83.8/76.4	0.34/1.45/1.75
[101]	0.38×0.38×0.13	1.8 / 2.45 / 5.8	/	3.7/5.3/9.6	62.5/67.9/70.1	0.07/0.05/0.02
[102]	0.43×0.48×0.0018	2.45	GND complet	5.1	80	/
Ce travail	0.22×0.15×0.005	2.45 / 5.5	Réflecteur	7.1/6.86	91.6/90	0.021/0.044

Chapitre 6

Développement d'une antenne textile augmentée, à faible coût, compacte et flexible

6.1 Introduction

Ce travail présente une antenne textile compacte, flexible et à faible coût, réalisée sur un substrat en denim facilement disponible. Inspirée du logo des Forces Spéciales algériennes, l'antenne adopte une forme distinctive et offre des performances robustes en bande unique, adaptées aux applications WLAN. Le prototype fabriqué montre une excellente concordance entre les résultats simulés et mesurés. Les simulations révèlent un gain maximal de 4,3 dB à 5,5 GHz et une efficacité de pointe de 85 % en espace libre, avec une bande passante d'impédance à -10 dB d'environ 10 % (de 5,3 GHz à 5,85 GHz). La nature conforme de l'antenne, ainsi que sa stabilité en conditions de flexion et à proximité du corps humain, en font une candidate idéale pour les applications portables. Cette conception économique constitue une solution prometteuse pour l'intégration dans divers dispositifs électroniques grand public, avec des applications potentielles dans la gestion optimisée des effectifs et le contrôle d'accès sécurisé.

Ce travail présenté dans ce chapitre est principalement basé sur la publication suivante :

Bouaza, A., Touhami, R, & Tedjini, S, (2025). Development of Augmented Low-Cost, Compact, and Flexible Textile Antenna. *URSI Radio Science Letters*, 7, 15.

6.2 Conception de d'antenne et résultats simulés

La Figure 6.1 illustre l'évolution de la conception et présente la configuration finale de l'antenne. Celle-ci est réalisée sur un substrat en denim courant ($\varepsilon_r = 1,7$, $\tan \delta = 0,025$, épaisseur = 0,7 mm). Le patch rayonnant ainsi que le plan de masse sont fabriqués à l'aide d'une couche de cuivre d'une épaisseur de 0,035 mm. L'antenne est alimentée par une ligne coaxiale standard de 50 Ω . Les dimensions globales de l'antenne proposée sont de 30 mm $\times$ 26 mm $\times$ 0,7 mm.

Le processus de conception débute avec un élément rayonnant de forme circulaire, suivi par un élément rectangulaire positionné directement en dessous, et un second élément circulaire, de plus petite taille, placé sous le rectangle (Étape 1, Figure 6.1). Cette configuration initiale, intégrant une alimentation coaxiale en haut du cercle supérieur et un plan de masse partiel de l'autre côté du substrat, présente une fréquence de résonance unique autour de 5,7 GHz, avec un taux de réflexion de -6 dB. Lors de la deuxième étape, la géométrie du patch est modifiée pour adopter une forme évoquant un parachute. Deux fentes triangulaires opposées, de tailles égales, sont ajoutées à la surface du patch, conduisant à un design inspiré du logo des Forces Spéciales algériennes. Cette modification géométrique entraîne un déplacement de la fréquence de résonance vers environ 5,9 GHz, avec une amélioration notable du taux de réflexion, atteignant -17,5 dB. L'optimisation finale (Étape 3, Figure 6.1) consiste à introduire plusieurs fentes quadrilatérales, symbolisant les espaces entre les cordes du parachute, ce qui aboutit à la configuration définitive de l'antenne. Cette dernière modification permet d'atteindre une fréquence de résonance unique à 5,5 GHz avec un excellent accord d'impédance, caractérisé par un taux de réflexion de -45 dB. Les coefficients de réflexion obtenus pour chaque itération de la conception sont représentés dans la Figure 6.2, tandis que les paramètres finaux de l'antenne sont résumés dans le Tableau 6.1

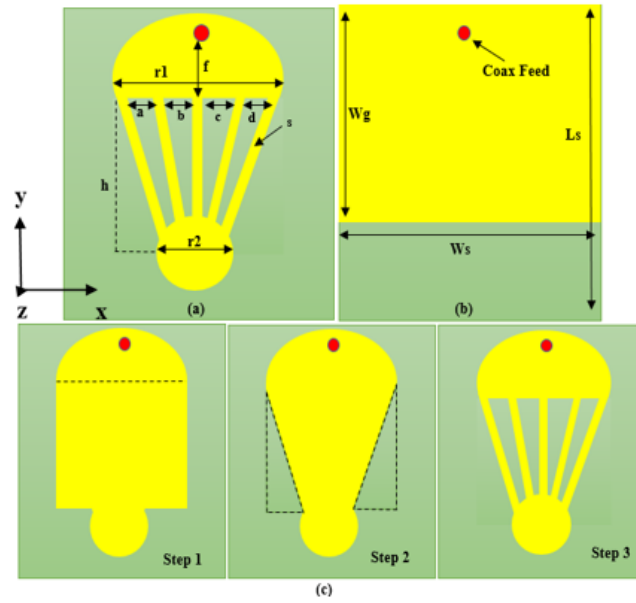


FIGURE 6.1 – Illustration de l'antenne conçue : (a) Vue de dessus, (b) Vue de dessous, (c) Évolution étape par étape de la structure de l'antenne

TABLE 6.1 – Dimensions de l'antenne conçue en millimètres (mm)

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
L_s	30	a	03
W_s	26	b	3,3
W_g	20	c	3,3
r_1	16	d	03
r_2	06	s	01
h	16	f	6,5

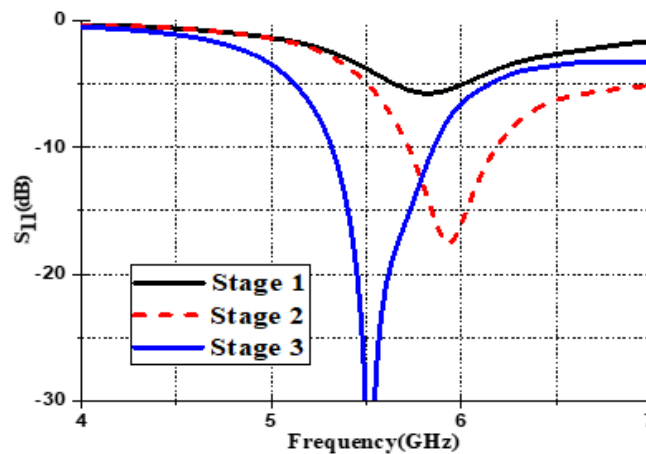


FIGURE 6.2 – Résultats simulés du coefficient de réflexion S_{11} aux différentes étapes d'évolution de l'antenne

Une étude paramétrique de la géométrie de l'antenne est essentielle pour comprendre son influence sur les performances. La position du point d'alimentation coaxial a un impact significatif sur l'adaptation d'impédance de l'antenne proposée. La Figure 6.3 illustre l'effet de la variation de la position du point d'alimentation. Les résultats montrent que la meilleure adaptation d'impédance est obtenue lorsque l'alimentation est située en haut du cercle le plus grand, plutôt que sur les côtés droit ou gauche.

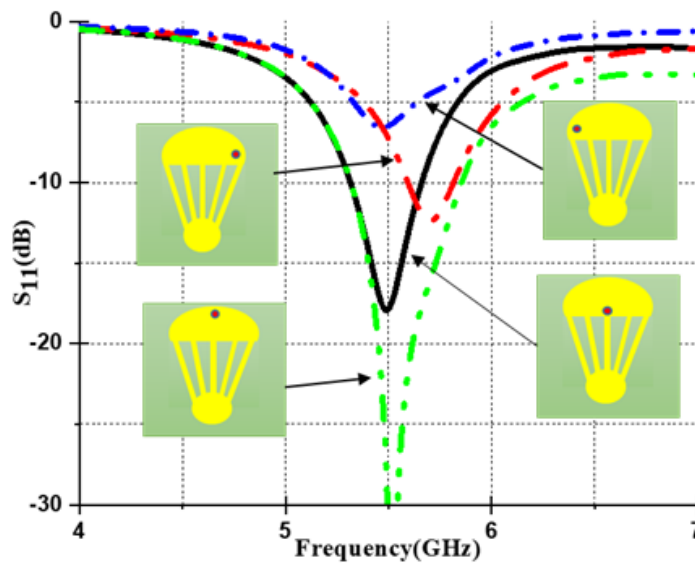


FIGURE 6.3 – Effet sur le coefficient de réflexion en fonction de la variation de la position de l'alimentation coaxiale

6.3 Fabrication de l'antenne et résultats de mesure

L'antenne proposée a été fabriquée sur un substrat en denim couramment disponible, et une photographie du prototype est présentée dans la Figure 6.4. Le coefficient de réflexion a été mesuré à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) E8362B. Le paramètre S_{11} mesuré est illustré dans la Figure 6.5. Les résultats expérimentaux présentent une excellente concordance avec les résultats de simulation.

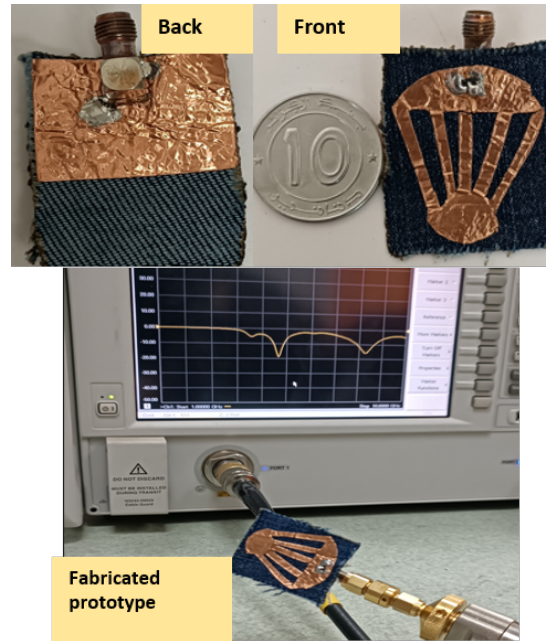


FIGURE 6.4 – Prototype fabriqué et mesure du coefficient de réflexion à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA)

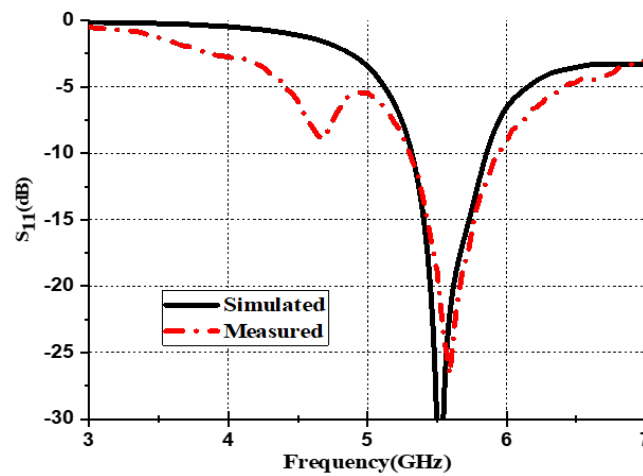


FIGURE 6.5 – Comparaison entre le coefficient de réflexion mesuré et simulé de l'antenne proposée

Afin d'évaluer l'impact de la flexion et de la conformabilité sur les performances de l'antenne textile proposée, des mesures pratiques ont été réalisées dans différentes conditions de courbure. L'antenne a été fixée sur un cylindre en polystyrène (constante diélectrique $\epsilon_r \approx 1$) de diamètres 70 mm, 80 mm, 100 mm et 140 mm afin de simuler diverses courbures, comme le montre la Figure 6.6 (a). Le coefficient de réflexion mesuré (S_{11}) est resté stable malgré les variations de courbure, avec une déviation minimale, comme illustré dans la Figure 6.6 (b).

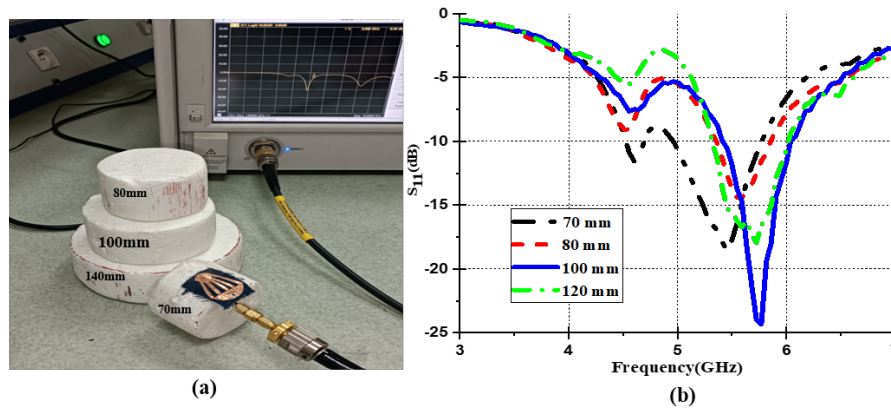


FIGURE 6.6 – (a) Prototype fabriqué déformé selon différentes courbures, (b) Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sous différentes courbures

6.4 Interaction de l'antenne avec le corps humain

Lorsqu'une antenne vestimentaire est placée près du corps (voir Figure 6.7), une partie de son rayonnement est absorbée ou réfléchi. Il est donc important d'analyser l'impact de cette proximité sur ses performances. Une simulation a ainsi été réalisée sur un modèle rectangulaire du corps humain à quatre couches (le même modèle que celui utilisé dans le quatrième chapitre), avec une puissance d'entrée de 0,5 W. Le schéma de l'analyse apparaît à la Figure 6.8.

Les résultats présentés à la figure 6.9 démontrent que l'antenne proposée maintient ses performances, quel que soit l'emplacement sur le corps. De plus, elle couvre efficacement la bande de fréquence requise pour les mesures sur ces différentes parties du corps.

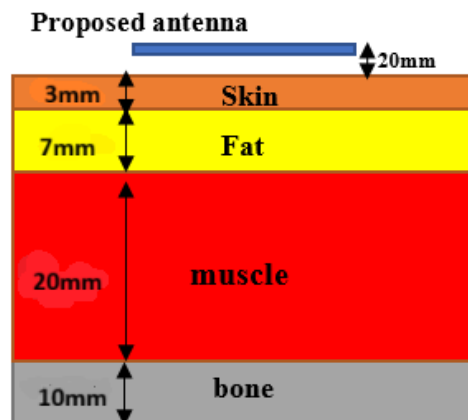


FIGURE 6.7 – Modèle rectangulaire à quatre couches représentant la zone du bras humain



FIGURE 6.8 – Placement de l'antenne fabriquée sur le bras humain..

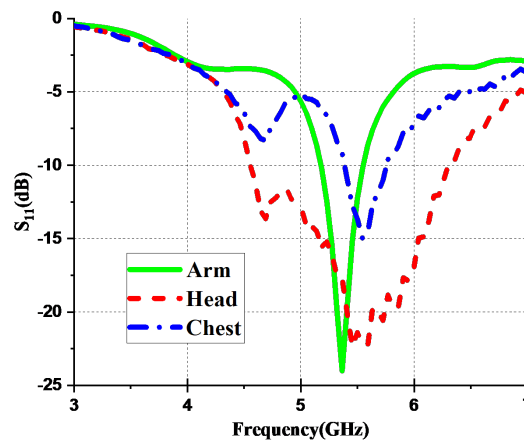


FIGURE 6.9 – Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne proposée sous différents organes du corps humain

La Figure 6.10 illustre les valeurs du SAR de l'antenne à 5.5GHz. Comme le montre cette figure, le SAR reste dans les limites de sécurité pour des applications proches du corps humain. À 5,5 GHz, avec une puissance d'entrée de 0,5 W, le SAR moyen sur 10 grammes est de 1,13 W/kg, ce qui est inférieur à la limite de 2 W/kg.

La Figure 6.12 présente les diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne proposée, en espace libre ainsi qu'en condition d'intégration sur le corps. En espace libre, l'antenne atteint un gain de crête de 4,3 dBi et une efficacité de rayonnement de 85% à la fréquence cible.

Comme illustré dans la Figure 6.12, le diagramme de rayonnement dans le plan E ($\phi = 0^\circ$) présente un comportement omnidirectionnel, tandis que le diagramme dans le plan H ($\phi = 90^\circ$) est bidirectionnel. Lorsque l'antenne est placée à proximité du corps

humain, elle montre un diagramme de rayonnement directionnel à la fois dans le plan E ($\phi = 0^\circ$) et le plan H ($\phi = 90^\circ$), ce qui est attribué à l'effet réfléchissant des tissus du corps humain. De plus, comme présenté dans la Figure 6.11, l'antenne proposée atteint un gain simulé de 6,02 dB.

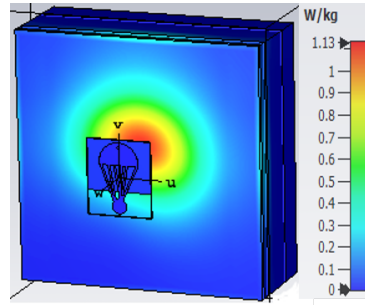


FIGURE 6.10 – Analyse du DAS à 5,5 GHz.

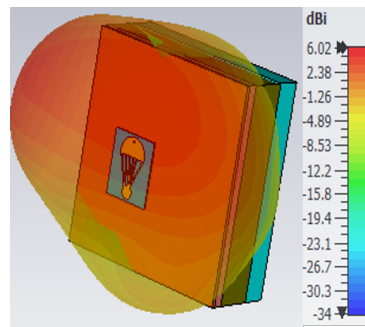


FIGURE 6.11 – Diagramme de rayonnement numérique 3D sur le corps à 5,5 GHz.

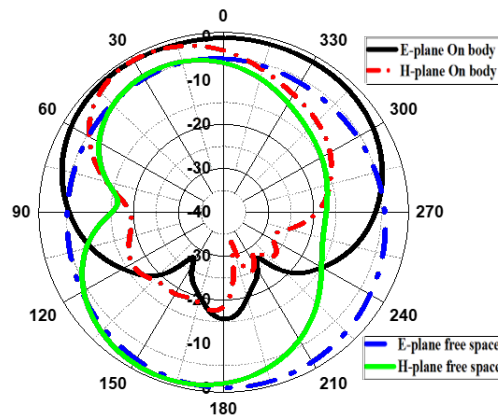


FIGURE 6.12 – Diagramme de rayonnement 2D simulé à 5,5 GHz de l'antenne proposée en espace libre et sur le corps, dans les plans E ($\phi = 0^\circ$) et H ($\phi = 90^\circ$)

6.5 Conclusion

Ce travail présente la conception, la fabrication et la caractérisation d'une antenne textile portable, flexible, de petite taille et à faible coût, réalisée sur un substrat en jean. Conçue pour des applications WLAN (5.3–5.85 GHz), l'antenne adopte une forme géométrique unique inspirée du logo des Forces Spéciales Algériennes. Une alimentation par ligne coaxiale est utilisée pour atteindre la bande de fréquence souhaitée. Une excellente concordance entre les coefficients de réflexion simulés et mesurés valide l'approche de conception, aussi bien en espace libre qu'en proximité du corps humain. L'antenne présente des diagrammes de rayonnement omnidirectionnels dans le plan E et bidirectionnels dans le plan H. Le gain atteint 4.3 dBi à 5.5 GHz. Une efficacité de rayonnement élevée est maintenue sur toute la bande de fonctionnement, dépassant 85%. L'antenne montre une stabilité mécanique remarquable sous différentes courbures allant de 70 mm à 140 mm. Par ailleurs, l'antenne fonctionne efficacement lorsqu'elle est placée à proximité du corps humain, notamment sur le bras, la jambe et la poitrine. Les simulations numériques confirment un diagramme de rayonnement directionnel. Enfin, une analyse SAR complète sur un modèle biologique confirme la conformité aux réglementations FCC et ICNIRP pour les applications portées sur le corps. Cette antenne compacte constitue une solution prometteuse pour des applications de gestion de personnel, de contrôle d'accès sécurisé et de systèmes d'identification, grâce à sa combinaison unique de flexibilité, de performance large bande et de conformité aux normes de sécurité.

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre de cette thèse, une approche innovante a été proposée pour l'intégration d'antennes textiles au sein de vêtements professionnels. L'objectif principal était de développer une série de solutions rayonnantes compactes, légères et fonctionnelles, capables de répondre simultanément aux exigences techniques des systèmes de communication modernes (ISM, WBAN, WLAN) ainsi qu'aux contraintes ergonomiques et esthétiques associées au port d'uniformes en conditions réelles.

Les travaux menés ont permis de concevoir, de modéliser, de fabriquer et de caractériser expérimentalement quatre prototypes d'antennes textiles multi-bandes, prenant la forme de logos institutionnels emblématiques. Chacune de ces antennes est pensée pour répondre à des cas d'usage spécifiques, tels que la communication sans fil sécurisée pour les militaires en opération ou le suivi du personnel dans des environnements industriels complexes. La démarche adoptée s'est appuyée sur une combinaison rigoureuse de simulation électromagnétique, de techniques de miniaturisation et d'intégration textile, tout en garantissant la conformité des performances en conditions réelles d'utilisation (port sur le corps, flexion, environnement perturbé).

Les résultats expérimentaux obtenus et présentés dans cette thèse confirment la pertinence de l'approche préconisée. Les antennes développées affichent des gains élevés, un rendement stable, une bonne adaptation d'impédance et une large bande passante, tout en préservant leur intégrité structurelle face aux déformations mécaniques induites par le port. Elles ouvrent ainsi de nouvelles perspectives pour les communications sans fil dans le domaine des vêtements intelligents, alliant haute performance, discrétion et intégration harmonieuse.

Ce travail constitue une contribution significative à l'évolution des antennes textiles à usage professionnel, en particulier pour les domaines militaire et industriel. Il jette les bases d'une nouvelle génération de dispositifs portables communicants, à la croisée des enjeux technologiques. Plusieurs thèmes de recherche peuvent être envisagés pour prolonger cette étude : l'exploration de nouveaux matériaux textiles conducteurs, l'optimisation du

couplage antenne/corps humain via des modélisations avancées, ou encore l'intégration de fonctions complémentaires (capteurs, systèmes d'alimentation énergétique).

Enfin, cette thèse illustre la convergence prometteuse entre ingénierie textile, radio-fréquences et design fonctionnel, et pose les fondations d'un futur sur lequel l'habit devient vecteur de connectivité, de sécurité et d'intelligence embarquée.

Perspectives

Cette thèse ouvre la voie à plusieurs voies de recherche et d'innovation dans le domaine des antennes textiles pour des applications professionnelles et militaires. Parmi les pistes de développement futures, plusieurs directions sont particulièrement prometteuses :

- **Exploration de nouveaux matériaux textiles conducteurs** : La recherche sur de nouveaux matériaux conducteurs, plus flexibles, résistants et performants, représente une voie d'amélioration importante pour l'intégration des antennes dans les vêtements professionnels. L'utilisation de matériaux composites ou de textiles intelligents, tels que les fibres optiques ou les nanotubes de carbone, pourrait offrir de nouvelles perspectives en termes de miniaturisation, de performance et de confort.
- **Optimisation du couplage antenne/corps humain** : Le couplage antenne/corps humain reste un défi majeur pour le bon fonctionnement des antennes portables. Une modélisation plus précise et plus avancée de l'interaction entre l'antenne et le corps humain permettra d'optimiser la conception des antennes et d'améliorer leur rendement en condition réelle, en prenant en compte des paramètres physiologiques et morphologiques variés des utilisateurs.
- **Intégration de systèmes d'alimentation énergétique autonomes** : L'un des défis clés pour les antennes textiles dans des applications telles que les vêtements intelligents est l'alimentation énergétique. L'intégration de systèmes de récupération d'énergie (par exemple, par induction ou via des panneaux solaires souples) dans les vêtements pourrait permettre d'alimenter de manière autonome les dispositifs embarqués, sans recourir à des batteries externes, et garantir ainsi une meilleure autonomie.
- **Développement de systèmes multifonctionnels** : La possibilité d'intégrer plusieurs fonctions au sein d'une même antenne textile pourrait ouvrir la voie à des applications novatrices. Par exemple, l'intégration de capteurs de température, de pression ou de localisation dans le même dispositif pourrait permettre la création de vêtements

interactifs, permettant à la fois des communications sans fil et un suivi en temps réel des données biométriques ou environnementales.

Enfin, ces perspectives de recherche offrent un potentiel significatif pour l'évolution des antennes textiles et leur intégration dans des dispositifs de communication portables. Elles permettent d'envisager des solutions toujours plus innovantes et fonctionnelles, ouvrant la voie à une nouvelle ère de vêtements intelligents et communicants qui allient performance technologique et adaptation aux besoins de l'utilisateur.

Bibliographie

- [1] Y. JIANG, *Wearable Antennas and Wireless Sensing Systems for e-Textile Applications*. Ph.D dissertation, The University of Manchester (United Kingdom), 2021.
- [2] C. WANG, K. XIA, H. WANG, X. LIANG, Z. YIN et Y. ZHANG, « Advanced carbon for flexible and wearable electronics, » *Advanced materials*, t. 31, n° 9, p. 1 801 072, 2019.
- [3] S. LEE et al., « Stretchable Electronics : Ag Nanowire Reinforced Highly Stretchable Conductive Fibers for Wearable Electronics (Adv. Funct. Mater. 21/2015)., » *Advanced Functional Materials*, t. 25, n° 21, 2015.
- [4] H. JABBAR, Y. S. SONG et T. T. JEONG, « RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices, » *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, t. 56, n° 1, p. 247-253, 2010.
- [5] Q. AWAIS, Y. JIN, H. T. CHATTHA, M. JAMIL, H. QIANG et B. A. KHAWAJA, « A compact rectenna system with high conversion efficiency for wireless energy harvesting, » *IEEE access*, t. 6, p. 35 857-35 866, 2018.
- [6] V. KUHN, C. LAHUEC, F. SEGUIN et C. PERSON, « A multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84%, » *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, t. 63, n° 5, p. 1768-1778, 2015.
- [7] S. S. B. HONG, R. B. IBRAHIM, M. H. M. KHIR, M. A. B. ZAKARIYA et H. DAUD, « WI-FI energy harvester for low power RFID application, » *Progress In Electromagnetics Research C*, t. 40, p. 69-81, 2013.
- [8] S AHMED, M. HUSAIN, Z ZAKARIA, M. ZIN et A ALHEGAZI, « Rectenna designs for RF energy harvesting system : a review, » *Int. J. Commun. Antenna Propag.(I. Re. CAP)*, t. 6, n° 2, 2016.
- [9] W. C. BROWN, « The history of power transmission by radio waves, » *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, t. 32, n° 9, p. 1230-1242, 1984.

- [10] C.-H. LIN, C.-W. CHIU et J.-Y. GONG, « A wearable rectenna to harvest low-power RF energy for wireless healthcare applications, » in *2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, IEEE, 2018, p. 1-5.
- [11] C. SHI, Z. TANG, H. ZHANG et Y. LIU, « Development of an FBG-based wearable sensor for simultaneous respiration and heartbeat measurement, » *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, t. 72, p. 1-9, 2022.
- [12] R. KUMARI, P. N. PATEL et R. YADAV, « An ENG-inspired microwave sensor and functional technique for label-free detection of aspergillus Niger, » *IEEE Sensors Journal*, t. 18, n° 10, p. 3932-3939, 2018.
- [13] R. LI et al., « Estimation of blood alcohol concentration from smartphone gait data using neural networks, » *IEEE Access*, t. 9, p. 61 237-61 255, 2021.
- [14] A. ARMGHAN, T. M. ALANAZI, A. ALTAF et T. HAQ, « Characterization of dielectric substrates using dual band microwave sensor, » *IEEE Access*, t. 9, p. 62 779-62 787, 2021.
- [15] T. HAQ et S. KOZIEL, « Inverse modeling and optimization of CSRR-based microwave sensors for industrial applications, » *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 70, n° 11, p. 4796-4804, 2022.
- [16] V. FELIU-BATLLE, D. FELIU-TALEGON et C. F. CASTILLO-BERRIO, « Improved object detection using a robotic sensing antenna with vibration damping control, » *Sensors*, t. 17, n° 4, p. 852, 2017.
- [17] M. A. U. HAQ, A. ARMGHAN, K. ALIQAB et M. ALSHARARI, « A review of contemporary microwave antenna sensors : Designs, fabrication techniques, and potential application, » *IEEE Access*, t. 11, p. 40 064-40 074, 2023.
- [18] C. GOUMOPOULOS, « A high precision, wireless temperature measurement system for pervasive computing applications, » *Sensors*, t. 18, n° 10, p. 3445, 2018.
- [19] D. B. RODRIGUES et al., « Design and optimization of an ultra wideband and compact microwave antenna for radiometric monitoring of brain temperature, » *IEEE transactions on biomedical engineering*, t. 61, n° 7, p. 2154-2160, 2014.
- [20] J. W. SANDERS, J. YAO et H. HUANG, « Microstrip patch antenna temperature sensor, » *IEEE sensors journal*, t. 15, n° 9, p. 5312-5319, 2015.

- [21] V. CIOFFI et S. COSTANZO, « Wearable approach for contactless blood-glucose monitoring by textile antenna sensor, » in *New Knowledge in Information Systems and Technologies : Volume 3*, Springer, 2019, p. 287-291.
- [22] M. T. ISLAM, M. H. ULLAH, M. J. SINGH et M. R. I. FARUQUE, « A new meta-surface superstrate structure for antenna performance enhancement, » *Materials*, t. 6, n° 8, p. 3226-3240, 2013.
- [23] M. T. ISLAM, F. B. ASHRAF, T. ALAM, N. MISRAN et K. B. MAT, « A compact ultrawideband antenna based on hexagonal split-ring resonator for pH sensor application, » *Sensors*, t. 18, n° 9, p. 2959, 2018.
- [24] J. ZHANG, B. HUANG, G. ZHANG et G. Y. TIAN, « Wireless passive ultra high frequency RFID antenna sensor for surface crack monitoring and quantitative analysis, » *Sensors*, t. 18, n° 7, p. 2130, 2018.
- [25] I MOHAMMAD, V GOWDA, H ZHAI et H HUANG, « Detecting crack orientation using patch antenna sensors, » *Measurement Science and Technology*, t. 23, n° 1, p. 015 102, 2011.
- [26] M. EL GHARBI, R. FERNÁNDEZ-GARCÍA, S. AHYOUD et I. GIL, « A review of flexible wearable antenna sensors : design, fabrication methods, and applications, » *Materials*, t. 13, n° 17, p. 3781, 2020.
- [27] M.-A. MATTELIN, J. MISSINNE, B. DE COENSEL et G. VAN STEENBERGE, « Imprinted polymer-based guided mode resonance grating strain sensors, » *Sensors*, t. 20, n° 11, p. 3221, 2020.
- [28] S.-D. JANG et J. KIM, « Passive wireless structural health monitoring sensor made with a flexible planar dipole antenna, » *Smart materials and structures*, t. 21, n° 2, p. 027 001, 2012.
- [29] P. LOPATO et M. HERBKO, « A circular microstrip antenna sensor for direction sensitive strain evaluation, » *Sensors*, t. 18, n° 1, p. 310, 2018.
- [30] G. MONTI, L. CORCHIA et L. TARRICONE, « Textile logo antennas, » in *Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)*, IEEE, 2014, p. 1-5.

- [31] G. MONTI, L. CORCHIA, E. DE BENEDETTO et L. TARRICONE, « Wearable logo-antenna for GPS–GSM-based tracking systems, » *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, t. 10, n° 12, p. 1332-1338, 2016.
- [32] J. TAK et J. CHOI, « An all-textile Louis Vuitton logo antenna, » *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, t. 14, p. 1211-1214, 2015.
- [33] D. KAUSHAL et T. SHANMUGANANTHAM, « Design of a compact and novel microstrip patch antenna for multiband satellite applications, » *Materials Today : Proceedings*, t. 5, n° 10, p. 21 175-21 182, 2018.
- [34] S. KIANI, P. REZAEI et M. FAKHR, « A CPW-fed wearable antenna at ISM band for biomedical and WBAN applications, » *Wireless Networks*, t. 27, p. 735-745, 2021.
- [35] L. KANNAPPAN, S. K. PALANISWAMY, M. KANAGASABAI et S. KUMAR, « A Car Logo Design-Inspired CPW-Fed Semitransparent Antenna for Vehicular Applications, » *International Journal of Antennas and Propagation*, t. 2023, n° 1, p. 7 101 049, 2023.
- [36] M. H. MAHFUZ et al., « Wearable textile patch antenna : Challenges and future directions, » *IEEE Access*, t. 10, p. 38 406-38 427, 2022.
- [37] S. N. MAHMOOD, A. J. ISHAK, A. ISMAIL, A. C. SOH, Z. ZAKARIA et S. ALANI, « ON-OFF body ultra-wideband (UWB) antenna for wireless body area networks (WBAN) : a review, » *IEEE Access*, t. 8, p. 150 844-150 863, 2020.
- [38] A. PELLEGRINI et al., « Antennas and propagation for body-centric wireless communications at millimeter-wave frequencies : A review [wireless corner], » *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, t. 55, n° 4, p. 262-287, 2013.
- [39] S. NOOR, N. RAMLI et al., « A review of the wearable textile-based antenna using different textile materials for wireless applications, » *Open Journal of Science and Technology*, t. 3, n° 3, p. 237-244, 2020.
- [40] H. LI, J. DU, X.-X. YANG et S. GAO, « Low-profile all-textile multiband microstrip circular patch antenna for WBAN applications, » *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, t. 21, n° 4, p. 779-783, 2022.

- [41] D. B. SMITH, D. MINIUTTI, T. A. LAMAHEWA et L. W. HANLEN, « Propagation models for body-area networks : A survey and new outlook, » *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, t. 55, n° 5, p. 97-117, 2013.
- [42] S. YAN, P. J. SOH et G. A. VANDENBOSCH, « Wearable ultrawideband technology—A review of ultrawideband antennas, propagation channels, and applications in wireless body area networks, » *Ieee Access*, t. 6, p. 42 177-42 185, 2018.
- [43] K. N. PARACHA, S. K. A. RAHIM, P. J. SOH et M. KHALILY, « Wearable antennas : A review of materials, structures, and innovative features for autonomous communication and sensing, » *IEEE Access*, t. 7, p. 56 694-56 712, 2019.
- [44] M. SEYEDI, B. KIBRET, D. T. LAI et M. FAULKNER, « A survey on intrabody communications for body area network applications, » *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*, t. 60, n° 8, p. 2067-2079, 2013.
- [45] X. LIN, Y. CHEN, Z. GONG, B.-C. SEET, L. HUANG et Y. LU, « Ultrawideband textile antenna for wearable microwave medical imaging applications, » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 68, n° 6, p. 4238-4249, 2020.
- [46] M. EL GHARBI, M. MARTINEZ-ESTRADA, R. FERNÁNDEZ-GARCÍA, S. AHYOUD et I. GIL, « A novel ultra-wide band wearable antenna under different bending conditions for electronic-textile applications, » *The journal of the Textile Institute*, t. 112, n° 3, p. 437-443, 2021.
- [47] W. EL MAY, « Développement d'antennes textiles pour des applications IoT, » thèse de doct., Université Côte d'Azur ; Université de Tunis El Manar, 2021.
- [48] S. DHUPKARIYA, V. K. SINGH et A. SHUKLA, « A review of textile materials for wearable antenna, » *J. Microw. Eng. Technol*, t. 1, n° 3, p. 1-8, 2015.
- [49] R. PEI, *High Efficiency Antenna Designs for Wearable Applications*. Ph.D dissertation, The University of Liverpool (United Kingdom), 2021.
- [50] B. SANZ-IZQUIERDO et J. C. BATCHELOR, « A dual band belt antenna, » in *2008 International Workshop on Antenna Technology : Small Antennas and Novel Metamaterials*, IEEE, 2008, p. 374-377.
- [51] D GASPAR et A. MOREIRA, « Belt antenna for wearable applications, » in *2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, 2009, p. 1-4.

- [52] R. PEI et al., « Wearable belt antenna for body communication networks, » *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, t. 19, n° 12, p. 2043-2047, 2020.
- [53] R. PEI et al., « Wearable EBG-backed belt antenna for smart on-body applications, » *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, t. 16, n° 11, p. 7177-7189, 2020.
- [54] H. XIAOMU, S. YAN et G. A. VANDENBOSCH, « Wearable button antenna for dual-band WLAN applications with combined on and off-body radiation patterns, » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 65, n° 3, p. 1384-1387, 2017.
- [55] S. YAN et G. A. VANDENBOSCH, « Design of wideband button antenna based on characteristic mode theory, » *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, t. 12, n° 6, p. 1383-1391, 2018.
- [56] B. SANZ-IZQUIERDO, J. MILLER, J. C. BATCHELOR et M. SOBY, « Dual-band wearable metallic button antennas and transmission in body area networks, » *IET microwaves, antennas & propagation*, t. 4, n° 2, p. 182-190, 2010.
- [57] Q. LIU, T. LE, S. HE et M. M. TENTZERIS, « Button-shaped radio-frequency identification tag combining three-dimensional and inkjet printing technologies, » *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, t. 10, n° 7, p. 737-741, 2016.
- [58] X. Y. ZHANG, H. WONG, T. MO et Y. F. CAO, « Dual-band dual-mode button antenna for on-body and off-body communications, » *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, t. 11, n° 4, p. 933-941, 2017.
- [59] P. SAMBANDAM, M. KANAGASABAI, R. NATARAJAN, M. G. N. ALSATH et S. PALANISWAMY, « Miniaturized button-like WBAN antenna for off-body communication, » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 68, n° 7, p. 5228-5235, 2020.
- [60] G. LI, Y. HUANG, G. GAO, X. WEI, Z. TIAN et L.-A. BIAN, « A handbag zipper antenna for the applications of body-centric wireless communications and Internet of Things, » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 65, n° 10, p. 5137-5146, 2017.
- [61] G. LI, G. GAO, J. BAO, B. YI, C. SONG et L.-a. BIAN, « A watch strap antenna for the applications of wearable systems, » *IEEE Access*, t. 5, p. 10 332-10 338, 2017.

- [62] T. BLECHA, R. LINHART et J. REBOUN, « Screen printed antennas on textile substrate, » in *Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC)*, IEEE, 2014, p. 1-4.
- [63] I. KAZANI et al., « Washable screen printed textile antennas, » *Advances in Science and Technology*, t. 80, p. 118-122, 2013.
- [64] E. F. SUNDARSINGH, S. VELAN, M. KANAGASABAI, A. K. SARMA, C. RAVITEJA et M. G. N. ALSATH, « Polygon-shaped slotted dual-band antenna for wearable applications, » *IEEE antennas and wireless propagation letters*, t. 13, p. 611-614, 2014.
- [65] A. Y. ASHYAP et al., « Inverted E-shaped wearable textile antenna for medical applications, » *IEEE access*, t. 6, p. 35 214-35 222, 2018.
- [66] A. Y. ASHYAP et al., « Compact and low-profile textile EBG-based antenna for wearable medical applications, » *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, t. 16, p. 2550-2553, 2017.
- [67] H. I. AZEEZ, H.-C. YANG et W.-S. CHEN, « Wearable triband E-shaped dipole antenna with low SAR for IoT applications, » *Electronics*, t. 8, n° 6, p. 665, 2019.
- [68] S. ZHU et R. LANGLEY, « Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate, » *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, t. 57, n° 4, p. 926-935, 2009.
- [69] K. KAMARDIN, M. K. A. RAHIM, P. S. HALL, N. A. SAMSURI, T. A. LATEF et M. H. ULLAH, « Textile artificial magnetic conductor jacket for transmission enhancement between antennas under bending and wetness measurements, » *Applied Physics A*, t. 122, p. 1-6, 2016.
- [70] S. ZHANG et al., « Embroidered wearable antennas using conductive threads with different stitch spacings, » in *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, IEEE, 2012, p. 1-4.
- [71] T. TRUONG, J.-S. KIM et J. KIM, « Design and optimization of embroidered antennas on textile using silver conductive thread for wearable applications, » *Fibers and Polymers*, t. 22, n° 10, p. 2900-2909, 2021.
- [72] L. NGO QUANG BAO, « Investigations of embroidery antennas on polymer substrate, » thèse de doct., Ph.D dissertation, University of Nottingham, 2016.

- [73] A. TSOLIS, W. G. WHITTOW, A. A. ALEXANDRIDIS et J. C. VARDAXOGLU, « Embroidery and related manufacturing techniques for wearable antennas : challenges and opportunities, » *Electronics*, t. 3, n° 2, p. 314-338, 2014.
- [74] B. ALMOHAMMED, A. ISMAIL et A. SALI, « Electro-textile wearable antennas in wireless body area networks : Materials, antenna design, manufacturing techniques, and human body consideration—A review, » *Textile Research Journal*, t. 91, n° 5-6, p. 646-663, 2021.
- [75] A. ANBALAGAN, E. F. SUNDARSINGH et V. S. RAMALINGAM, « Design and experimental evaluation of a novel on-body textile antenna for unicast applications, » *Microwave and Optical Technology Letters*, t. 62, n° 2, p. 789-799, 2020.
- [76] A. ANBALAGAN, E. F. SUNDARSINGH, V. S. RAMALINGAM, A. SAMDARIA, D. B. GURION et K. BALAMURUGAN, « Realization and analysis of a novel low-profile embroidered textile antenna for real-time pulse monitoring, » *IETE Journal of Research*, t. 68, n° 6, p. 4142-4149, 2022.
- [77] A. CHAURAYA et al., « Addressing the challenges of fabricating microwave antennas using conductive threads, » in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, IEEE, 2012, p. 1365-1367.
- [78] J. DICCBSE, M. K. ABD RAHIM, N. A. SAMSURI, H. A. M. SALIM et M. F. ALI, « Embroidered fully textile wearable antenna for medical monitoring applications, » *Progress In Electromagnetics Research*, t. 117, p. 321-337, 2011.
- [79] R. SALVADO, C. LOSS, R. GONÇALVES et P. PINHO, « Textile materials for the design of wearable antennas : A survey, » *Sensors*, t. 12, n° 11, p. 15 841-15 857, 2012.
- [80] J. BAKER-JARVIS, M. D. JANEZIC et D. C. DEGROOT, « High-frequency dielectric measurements, » *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, t. 13, n° 2, p. 24-31, 2010.
- [81] A. Y. ASHYAP et al., « Fully fabric high impedance surface-enabled antenna for wearable medical applications, » *IEEE Access*, t. 9, p. 6948-6960, 2021.

- [82] H. YANG, X. LIU, Y. FAN et L. XIONG, « Dual-band textile antenna with dual circular polarizations using polarization rotation AMC for off-body communications, » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 70, n° 6, p. 4189-4199, 2022.
- [83] A. SOMASUNDARAM, S. K. THENGALPALAYAM RAJAMANICKAM et Z. C. ALEX, « Development of wideband CPW-fed microstrip patch antenna on textile substrate, » *Microwave and Optical Technology Letters*, t. 65, n° 8, p. 2352-2358, 2023.
- [84] R. N. SIMONS, *Coplanar waveguide circuits, components, and systems*. LibreDigital, 2004, t. 165.
- [85] N. T. ATANASOV, G. L. ATANASOVA, A. K. STEFANOV et I. I. NEDIALKOV, « A wearable, low-profile, fractal monopole antenna integrated with a reflector for enhancing antenna performance and SAR reduction, » in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, IEEE, 2019, p. 67-69.
- [86] B. MANDAL et S. PARUI, « Wearable tri-band SIW based antenna on leather substrate, » *Electronics Letters*, t. 51, n° 20, p. 1563-1564, 2015.
- [87] F. KHAJEH-KHALILI, F. HAGHSHEENAS et A. SHAHRIARI, « Wearable dual-band antenna with harmonic suppression for application in medical communication systems, » *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, t. 126, p. 153-159, 2020.
- [88] V. JAIN et B. S. DHALIWAL, « Investigations on the design of compact flexible wearable fractal patch antenna for body area networks applications, » *Wireless Personal Communications*, t. 126, n° 2, p. 1443-1458, 2022.
- [89] R. K. BAUDH, M. KUMAR, N. GUPTA et S. SAHU, « Wearable textile antenna for WLAN/Wi-Max and wireless telemedicine applications, » *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, t. 47, n° 2, p. 401-409, 2023.
- [90] L. ZHOU, S. FANG et X. JIA, « Dual-band and dual-polarised circular patch textile antenna for on-/off-body WBAN applications, » *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, t. 14, n° 7, p. 643-648, 2020.

- [91] A. ALEMARYEEN et S. NOGHANIAN, « On-body low-profile textile antenna with artificial magnetic conductor, » *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 67, n° 6, p. 3649-3656, 2019.
- [92] D. M. POZAR, *Microwave engineering : theory and techniques*. John wiley & sons, 2021.
- [93] S. YAN, V. VOLSKIY et G. A. VANDENBOSCH, « Compact dual-band textile PIFA for 433-MHz/2.4-GHz ISM bands, » *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, t. 16, p. 2436-2439, 2017.
- [94] A. ROY, S. BHUNIA, D. C. SARKAR, P. P. SARKAR et S. K. CHOWDHURY, « Compact multi frequency strip loaded microstrip patch antenna with spur-lines, » *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, t. 9, n° 5, p. 1111-1121, 2017.
- [95] D. ANDREUCCETTI, R. FOSSI et C. PETRUCCI, « Calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz–100 GHz, » *An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range*, t. 10, n° 9, 1997.
- [96] G. GAO, B. HU, S. WANG et C. YANG, « Wearable planar inverted-F antenna with stable characteristic and low specific absorption rate, » *Microwave and Optical Technology Letters*, t. 60, n° 4, p. 876-882, 2018.
- [97] P. SAHA, D. MITRA et S. K. PARUI, « Control of Gain and SAR for Wearable Antenna Using AMC Structure., » *Radioengineering*, t. 30, n° 1, 2021.
- [98] U. MUSA et al., « Design and analysis of a compact dual-band wearable antenna for WBAN applications, » *IEEE Access*, t. 11, p. 30 996-31 009, 2023.
- [99] W. M. ABDULKAWI, A. MASOOD, N NIZAM-UDDIN et M. ALNAKHLI, « A simulation study of triband low SAR wearable antenna, » *Micromachines*, t. 14, n° 4, p. 819, 2023.
- [100] M. A. KHAN et al., « A comprehensive analysis of low-profile dual band flexible omnidirectional wearable antenna for WBAN applications, » *IEEE Access*, 2024.
- [101] D. SHARMA, R. N. TIWARI, S. KUMAR, S. SHARMA et L. MATEKOVITS, « A compact wearable textile antenna for NB-IoT and ISM band patient tracking applications, » *Sensors*, t. 24, n° 15, p. 5077, 2024.

- [102] R. K. BAUDH, M. KUMAR, S. SAHU, M. S. PARIHAR et D. KUMAR, « A low-profile, wideband, circularly polarized, slotted, U-shaped textile antenna for W-BAN applications, » *ETRI Journal*, 2024.