

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Télécommunications

Spécialité : Réseaux & Télécommunications

Présenté par

KERFALI Fatma Zohra

&

HAMIDI Ahlam

Miniaturisation d'une antenne lecteur RFID UHF (860-960MHz) en utilisant les Métamatériaux

Proposé par : Pr. HEBIB Sami & Melle. CHENAOUI Safia

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Nous voudrions adresser tous nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre promoteur Pr. HEBIB Sami et Co-promotrice Melle CHENAOUI Safia pour leurs patiences, leurs disponibilités et leurs judicieux conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Nous les remercions également pour toutes les connaissances qu'ils nous ont apportées.

Nos remerciements vont aussi à tout le cadre enseignant de l'université Saad DAHLAB de Blida pour ne pas avoir épargné le moindre effort pour nous informer et nous documenter sur le plan théorique et pratique et cela durant les cinq années de notre formation.

Nous souhaitons ensuite remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

A l'homme qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études,

Mon cher papa

J'espère qu'il apprécie ce geste comme preuve de reconnaissance de la part de sa fille.

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Mes parents, je vous remercie pour tous le soutien et l'amour depuis mon enfance jusqu'à ce jour-là, et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A ma seule et magnifique sœur, ZINEB,

Je n'oublierai jamais ses soutiens moraux et ses conseils précieux tout au long de mes études et ma vie.

A mes trois frères, FARES, FAICEL et SIF EDDINE.

A mon binôme AHLAM,

Qui m'a aidé beaucoup dans ce travail et je la remercie pour toutes ses efforts.

A mon bras droit ADDOUI MALEK qui a m'encouragé toujours.

A mes amis Meriem et Farah.

A toute la famille KERFALI et DEBAHI.

A mon responsable au travail, l'homme merveilleux REDOUANE

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à l'université.

A tous que j'aime et qui m'aiment.

KERFALI Fatma Zohra.

J'ai l'honneur de dédier ce travail

*A mes parents ma formidable mère et mon courageux père
Qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragé beaucoup durant
mes études et ma vie.*

*A celui que j'aime beaucoup et qui m'a toujours soutenu, mon
cher IKHLEF YACINE.*

A mes chers frères HANAA, AYMEN et KHALED.

*A mon cher binôme et amie FATMA ZOHRA pour sa bonne
compagnie et les meilleurs moments que nous avons passés
ensemble.*

Je dédie ce mémoire aussi

A tous mes amies plus proches

*AMINA, SANAA, FARAH, MERIEM, SARA, KHADIDJA et
NOUR.*

A toute la famille HAMIDI et MEDJAMIA.

A tous les professeurs qui m'ont enseigné

Merci à tous

*A la mémoire de mes grands-parents que DIEU garde leurs âmes
dans son vaste paradis.*

HAMIDI Ahlam.

ملخص:

يعد RFID مرشحًا جيدًا جدًا لأنظمة تحديد الهوية والتتبع بدون تلامس، وبالتالي يجد تطبيقات في عدة مجالات: التوزيع، والإنتاج، والخدمات اللوجستية، والأمن، وجرد المخزون، والمراقبة، إلخ. يتكون نظام RFID بشكل أساسي من قارئ يتصل بوحدة أو أكثر من الرقاقات. الهوائيات هي عناصر أساسية للقراء والرقاقات ويؤثر أداءها بشكل مباشر على الأداء العام لنظام RFID (النطاق، واحتمالية الكشف، والتكلفة، والحجم، وما إلى ذلك). في عمل سابق، تم تصميم وتصنيع وقياس هوائي patch الذي يغطي كامل نطاق RFID (860-960 ميغاهيرتز) ومع ذلك، فإن الحجم الكبير لهذا الهوائي وسمكه البالغ 3 سم يجعل تكامله صعبًا نسبيًا في الأنظمة الحديثة. من أجل معالجة هذه المشكلة، تم استخدام المواد الخارقة في هذا العمل لتقليل سمك هذا الهوائي إلى النصف. تم تصنيع الهوائي المضغوط الناتج والتحقق من صحته تجريبياً.

كلمات المفاتيح: RFID UHF ; قارئ ; هوائي patch ; الرقاقات ; المواد الخارقة.

Résumé : Le RFID constitue un très bon candidat des systèmes d'identification et de suivi sans contact et trouve ainsi applications dans plusieurs domaines : distribution, production, logistique, sécurité, inventaire des stocks, surveillance, etc. Un système RFID est composé principalement d'un lecteur communiquant avec un ou plusieurs tags. Les antennes sont des éléments clés des lecteurs et des tags et leurs performances agissent directement sur les performances globales du système RFID (portée, probabilité de détection, coût, taille, ...). Dans un travail précédent, une antenne patch couvrant la totalité de la bande RFID UHF (860-960 MHz) a été conçue, fabriquée et mesurée. Cependant, la grande taille de cette antenne et principalement son épaisseur de 3cm rend son intégration relativement difficile dans les systèmes modernes. Afin de répondre à cette problématique, les métamatériaux ont été utilisés dans ce travail afin de réduire de moitié l'épaisseur de cette antenne. L'antenne compacte résultante a été fabriquée et validée expérimentalement.

Mots clés : RFID UHF ; lecteur; antenne patch; tags ; métamatériaux.

Abstract: RFID is a very good candidate for contactless identification and tracking systems and thus finds applications in several areas: distribution, production, logistics, security, stock inventory, surveillance, etc. An RFID system is mainly composed of a reader communicating with one or more tags. Antennas are key elements of readers and tags and their performance directly affects the overall performance of the RFID system (range, probability of detection, cost, size, etc.). In a previous work, a patch antenna covering the entire UHF RFID band (860-960MHz) was designed, fabricated and measured. However, the large size of this antenna and mainly its thickness of 3cm makes its integration relatively difficult in modern systems. In order to address this issue, metamaterials have been used in this work to reduce the thickness of this antenna by half. The resulting compact antenna was fabricated and experimentally validated.

Keywords: UHF-RFID; reader; patch antenna; tags; metamaterials.

Liste des acronymes et abréviations

AMC Artificial Magnetic Conductor

BW BandWidth

CST Computer Simulation Technology

dB Decibel

DNG Double NéGatif

DPS Double PoSitif

EBG Electromagnetic Band Gap

ENZ Epsilon Near Zero

FR4 Flame Resistant 4

FSS Frequency Selective Surfaces

GSM Global System for Mobile

HIS High Impedance Surfaces

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IE3D Integral Equation Three Dimensional

ITU-R International Telecommunication Union-Radiocommunication

LHM Left Handed Material

LTE Long Term Evolution

MIMO Multiple Input Multiple Output

MNZ Mu Near Zero

OEM Onde Électromagnétique

PEC Perfect Electric Conductor

RF Radio Frequency

RFID Radio Frequency Identification

SMA SubMiniature version A

SNG Simple NéGatif

SRR Split Ring Resonator

TEM Transverse Electric and Magnetic

UHF Ultra High Frequency

VNA Vector Network Analyzer

WLAN Wireless Local Area Network

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur les antennes et la technologie RFID.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Antennes : définition et historique	3
1.2.1 Définition d'antenne	3
1.2.2 Historique.....	4
1.3 Caractéristiques principales d'une antenne	5
1.3.1 Diagramme de rayonnement	5
1.3.2 Directivité	6
1.3.3 Gain	7
1.3.4 Efficacité (Rendement).....	7
1.3.5 Polarisation	7
1.3.6 Impédance d'entrée.....	8
1.3.7 Coefficient de réflexion et adaptation	9
1.3.8 Bande passante	9
1.4 Antennes imprimées	10
1.4.1 Définition.....	10
1.4.2 Les techniques d'alimentation	11
1.4.3 Techniques de miniaturisation d'une antenne patch	13
1.5 Généralités sur la technologie RFID	16
1.5.1 Définition et principe de fonctionnement	16
1.5.2 Domaine d'application	16
1.5.3 Éléments d'un système RFID.....	17
1.5.4 Quelques exemples d'antennes lecteurs RFID UHF commercialisées	20
1.6 Conclusion	21
Chapitre 2 Métamatériaux.....	22
2.1 Introduction	22
2.2 Définition et historique	22
2.3 Les différents types des métamatériaux.....	23
2.4 Définition de la surface à haute impédance HIS.....	24
2.4.1 Définition d'un EBG.....	25
2.4.2 Définition des AMC	26

2.5	Applications d'AMC pour les antennes	28
2.6	Les travaux de miniaturisation antennes à base de métamatériaux.....	30
2.7	Conclusion	31
Chapitre 3	Simulation et optimisation d'une antenne RFID UHF compacte	32
3.1	Introduction	32
3.2	Présentation de l'antenne patch avec U-slot.....	32
3.3	Objectifs et cahier des charges	35
3.4	Réduction de l'épaisseur de l'antenne patch avec U-slot en utilisant les AMC.....	36
3.4.1	Conception des cellules AMC.....	36
3.4.2	Conception d'antennes patch RFID avec AMC.....	37
3.5	Conclusion	46
Chapitre 4	Réalisation et validation expérimentale.....	47
4.1	introduction	47
4.2	Réalisation.....	47
4.3	Mesure du coefficient de réflexion	50
4.4	Comparaisons des résultats	52
4.5	Conclusion	53
	Conclusion générale	54
	Bibliographie	55
Annexe 1	La méthode utilisée pour la simulation de cellule sur CST	57

Liste des figures

Figure 1.1. Antenne en mode: (a) émission, (b) réception [2].	4
Figure 1.2. Historique des radiocommunications [4].	5
Figure 1.3. Diagramme de rayonnement: (a) vue 3D, (b) vue 2D (repère polaire), (c)vue 2D (repère cartésien) [4].	6
Figure 1.4. (a) Polarisation rectiligne, (b) Polarisation elliptique [3].	8
Figure 1.5. Circuit équivalent d'une antenne [3].	9
Figure 1.6. Bande passante.	10
Figure 1.7. Antenne patch de forme : (a) rectangulaire, (b) circulaire [1].	10
Figure 1.8. Antenne rectangulaire alimenté par ligne microruban [5].	11
Figure 1.9. Antenne microruban alimenté par un câble coaxial [5].	12
Figure 1.10. Alimentation par fente [5].	12
Figure 1.11. Alimentation par couplage [5].	13
Figure 1.12. Allongement du trajet des courants par ajout des fentes [8].	14
Figure 1.13. Antenne repliée : (a) bow-tie, (b) repliement vertical [8].	14
Figure 1.14. Fonctionnement d'un système [10].	16
Figure 1.15. (a) Lecteur RFID, (b) antenne de lecteur RFID [5].	17
Figure 1.16. Tag RFID [5].	18
Figure 1.17. Tag actif RFID [5].	19
Figure 1.18. Tag passif RFID [5].	19
Figure 1.19. RFID UHF avec tag semi-passif [5].	20
Figure 2.1. Le nombre des publications annuelles au sujet de métamatériaux [13].	23
Figure 2.2. Classement des matériaux en fonction de leur permittivité et de leur perméabilité [14].	24
Figure 2.3. Structure de Sievenpiper [15].	25
Figure 2.4. Structures EBG périodiques [16].	26
Figure 2.5. Cellule unitaire AMC.	26
Figure 2.6. La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule.....	27
Figure 2.7. Structure de l'antenne avec AMC en 2D [20].	30
Figure 2.8. Structure de l'antenne avec AMC [19].	31
Figure 3.1. Antenne patch proposée par [5] : a) Vue de dessus -b) Vue de coté - c) Photographie de l'antenne réalisée.	33
Figure 3.2. Coefficient de réflexion représentée par CST.	34
Figure 3.3. Variation du gain en fonction de la fréquence de l'antenne patch avec U-Slot.....	35
Figure 3.4. Modèle d'une cellule AMC.....	36
Figure 3.5. La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule AMC.	37
Figure 3.6. Géométrie de l'antenne avec AMC 2x2 : (a)Vue de réseau AMC, (b) Vue de la face d'antenne, (c) Vue d'arrière d'antenne, (d) Vue de côté.....	38
Figure 3.7. Coefficient de réflexion de l'antenne avec AMC.	39
Figure 3.8. Variation de gain en fonction de fréquence.	39
Figure 3.9. Cellule AMC modèle 2.....	40

Figure 3.10. Géométrie de l'antenne avec AMC 2x2 : (a)vue de réseau AMC, (b) vue de la face d'antenne.....	40
Figure 3. 11. Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence.	41
Figure 3.12. Variation de gain en fonction de la fréquence.	41
Figure 3.13. Cellule AMC modèle 3.....	42
Figure 3.14. Géométrie de l'antenne avec AMC 2x2 : (a)vue de réseau AMC, (b) vue de la face d'antenne.....	42
Figure 3.15. Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence.	43
Figure 3.16. Variation de gain en fonction de la fréquence.	43
Figure 3.17. Comparaison des S_{11} des différents structures avec et sans AMC.	44
Figure 3.18. Comparaison des gains des différents structures avec et sans AMC.	45
Figure 3.19. Coefficient de réflexion pour différentes valeur de h_a	45
Figure 4.1. Typons de l'antenne patch RFID avec AMC à réaliser : (a) partie antenne, (b) partie AMC.....	48
Figure 4.2. Photographie du connecteur SMA : (a) connecteur SMA, (b) connecteur SMA monté sur antenne.	49
Figure 4.3. Photographie de l'antenne patch avec AMC réalisée : (a) Vue de dessus de l'antenne, (b) Vue de dessus de l'AMC avant montage, (c) Vue de dessous (plan de masse), (d) Vue de côté.	50
Figure 4.4. Antenne patch RFID avec AMC sous test.....	51
Figure 4.5. Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne patch RFID UHF avec AMC.	51
Figure 4.6. Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch RFID UHF avec AMC.	52
Figure A1.1. Conditions aux limites de la structure AMC.	57

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Quelques antennes lecteurs RFID UHF commercialisées [11].	21
Tableau 2.1. Les différents motifs AMC et leurs objectifs.	29
Tableau 3.1. Dimensions de l'antenne patch avec U-slot [5].	33
Tableau 3.2. Gains aux fréquences 860, 910 et 960MHz.	34
Tableau 3.3. Cahier des charges.	35
Tableau 3.4. Dimensions de l'antenne patch RFID avec cellule AMC.	38
Tableau 3.5. Dimensions théoriques de l'antenne patch RFID avec cellule AMC.	41
Tableau 3.6. Dimensions théoriques de l'antenne patch RFID avec cellule AMC.	43
Tableau 4.1. Comparaison des antennes avec et sans AMC.	53

Introduction générale

De nos jours, les systèmes d'identification et de suivi sans fils jouent un rôle très important dans la vie humaine et trouvent applications dans de nombreux domaines. Il existe plusieurs techniques d'identification, parmi ces types on peut citer la plus utilisée actuellement qui est la technologie RFID. En plus d'être sans contact, cette technologie offre plusieurs avantages notamment la grande portée de lecture, la forte sécurité des données et la possibilité de lecture simultanée et sans visibilité directe de plusieurs étiquettes à la fois.

Les antennes sont des dispositifs clés de systèmes RFID en faisant partie non seulement du lecteur mais également des étiquettes à identifier. Par conséquent, leurs caractéristiques (radioélectriques et en rayonnement) ainsi que leurs tailles influencent directement sur les performances globales et l'encombrement des systèmes RFID.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est l'utilisation des métamatériaux pour la réduction de taille et plus précisément de l'épaisseur d'une antenne patch avec U-slot destinée pour la lecture RFID en bande UHF. Cette réduction d'épaisseur ne doit pas altérer les performances et spécifications requises pour une telle application.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre commence par la description de quelques généralités sur les antennes (définition, historique et caractéristiques). Ensuite, les antennes imprimées ont été brièvement décrites en donnant quelques techniques utilisées pour leur miniaturisation. Enfin, ce chapitre se termine par une courte présentation des systèmes RFID (principe de fonctionnement, éléments constituants) et en donnant quelques exemples d'antennes commerciales pour lecteurs RFID UHF.

Le deuxième chapitre passe en revue la définition, l'historique et les différents types des métamatériaux. Ensuite, une attention particulière sera adressée à un type de métamatériaux

particulier qui est le conducteur magnétique artificiel (AMC). Enfin, l'utilisation des AMC dans le domaine des antennes et plus particulièrement pour leur miniaturisation est abordée.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la simulation électromagnétique d'antennes imprimées pour lecteur RFID UHF intégrant des AMC. Plusieurs configurations d'AMC ont été proposées et testées sur une antenne patch rectangulaire avec U-slot dans le but de réduire son épaisseur. Les résultats de simulation des différentes solutions ont été exposés, comparés et discutés. Une solution permettant le meilleur compromis a été identifiée et retenue pour réalisation.

Le quatrième et dernier chapitre concerne la réalisation et la mesure de l'antenne compacte intégrant l'AMC retenue à la fin du chapitre précédent. Après la description des étapes de réalisation et montage de l'antenne avec AMC, les coefficients de réflexion mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau ont été affichés et comparés avec ceux obtenus en simulation. Les résultats de mesure sont en bon accord avec la simulation et valident ainsi le bon fonctionnement de l'antenne à faible épaisseur conçue.

Chapitre 1 Généralités sur les antennes et la technologie

RFID

1.1 Introduction

Ce chapitre contient des généralités sur les antennes et la technologie RFID. Il commence par les antennes en donnant leur définition ainsi que leurs caractéristiques principales. Une attention particulière a été attribuée aux antennes imprimées (patch) en détaillant également quelques techniques d'élargissement de leur bande passante. Dans un second temps, la technologie RFID qui est une méthode d'identification sans contact en utilisant les ondes radio a été abordée en donnant son domaine d'utilisation, son principe de fonctionnement ainsi que ses éléments constitutifs. Ce chapitre se termine par quelques exemples d'antennes commerciales pour lecteurs RFID UHF.

1.2 Antennes : définition et historique

1.2.1 Définition d'antenne

La définition standard IEEE des termes pour les antennes (IEEE Std 145-1983) définit l'antenne comme un moyen pour émettre ou recevoir des ondes radio. En d'autres termes, l'antenne est la structure de transition entre l'espace libre et un dispositif de guidage, comme le montre la figure 1.1. Le dispositif de guidage ou ligne de transmission peut prendre la forme d'une ligne coaxiale ou d'un tube creux (guide d'onde), et il est utilisé pour transporter l'énergie électromagnétique de la source émettrice vers l'antenne, ou de l'antenne vers le récepteur. Dans le premier cas, on a une antenne d'émission et dans le deuxième une antenne de réception [1].

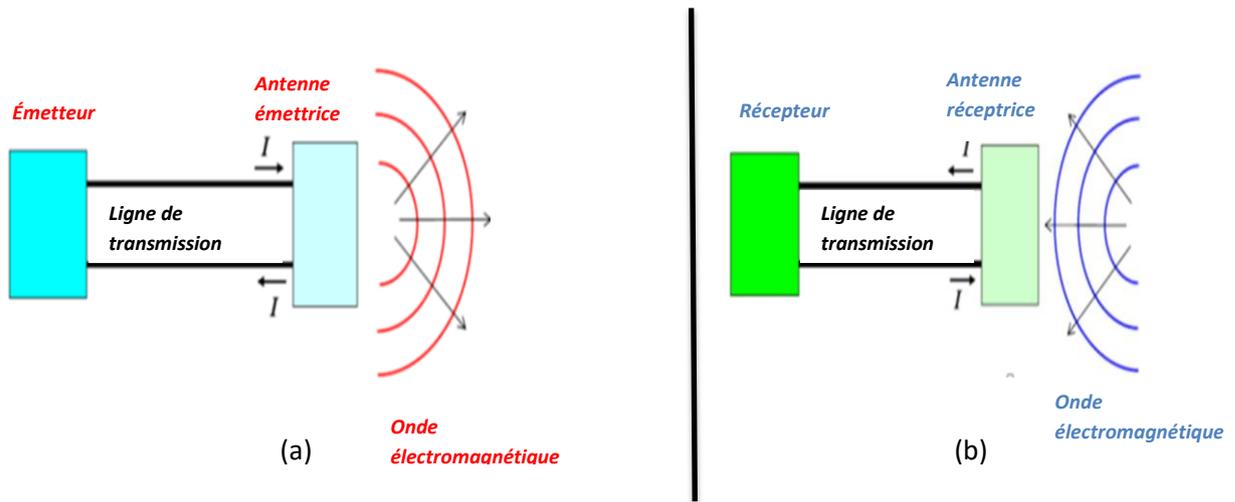


Figure 1.1. Antenne en mode: (a) émission, (b) réception [2].

1.2.2 Historique

Historiquement, il est difficile de dire quand remontent les premières expériences de télédétection. On peut signaler qu'Heinrich Hertz a rapidement démontré l'intérêt des ondes électromagnétiques pour ce type d'application à la fin du XIXe siècle en démontrant que différents objets ont la propriété de réfléchir les ondes. Ses expériences ont été menées dans une gamme de fréquences relativement basses. Mais cela n'affecte pas la généralité du principe. Hulsmeyer a déposé le premier brevet d'inspection des navires en 1904. À partir de ce moment les recherches s'accélérent, notamment dans le domaine militaire, mais aussi dans le domaine des transports. Le radar utilise des fréquences de plus en plus élevées jusqu'à ce qu'il atteigne la bande des micro-ondes. C'est grâce au développement des sources micro-ondes. Au fur et à mesure que la fréquence augmentait, la résolution devenait de plus en plus petite et l'imagerie micro-ondes s'est développée. Les premières images de radar aéroporté ont été produites pendant la seconde guerre mondiale. Il faudra attendre les années 1960, avec le décryptage des images obtenues grâce au radar, pour que la télédétection soit véritablement utilisée pour les applications scientifiques de l'observation de la Terre. Jusque-là, ces systèmes étaient aéroportés. Avec l'amélioration des performances du système et l'évolution de l'utilisation des satellites, il sera possible d'installer des systèmes complets dans l'espace. D'autre part, les techniques radiométriques sont issues des travaux en radioastronomie où les antennes sont pointées vers le ciel. Ce n'est qu'à la fin des années 1950 que les méthodes radiométriques pour les observations au sol ont commencé à être développées.

A l'heure actuelle, des expériences de télédétection sont menées à la fois à bord et sur des satellites. La principale différence est la distance de visualisation. A des distances de l'ordre du kilomètre, la zone couverte est beaucoup plus petite que des observations de centaines voire de milliers de kilomètres. Dans ce dernier cas, en revanche, la résolution est plus faible et l'appareil à emporter doit être plus puissant [3]. La Figure 1.2 résume de façon graphique l'historique des radiocommunications.

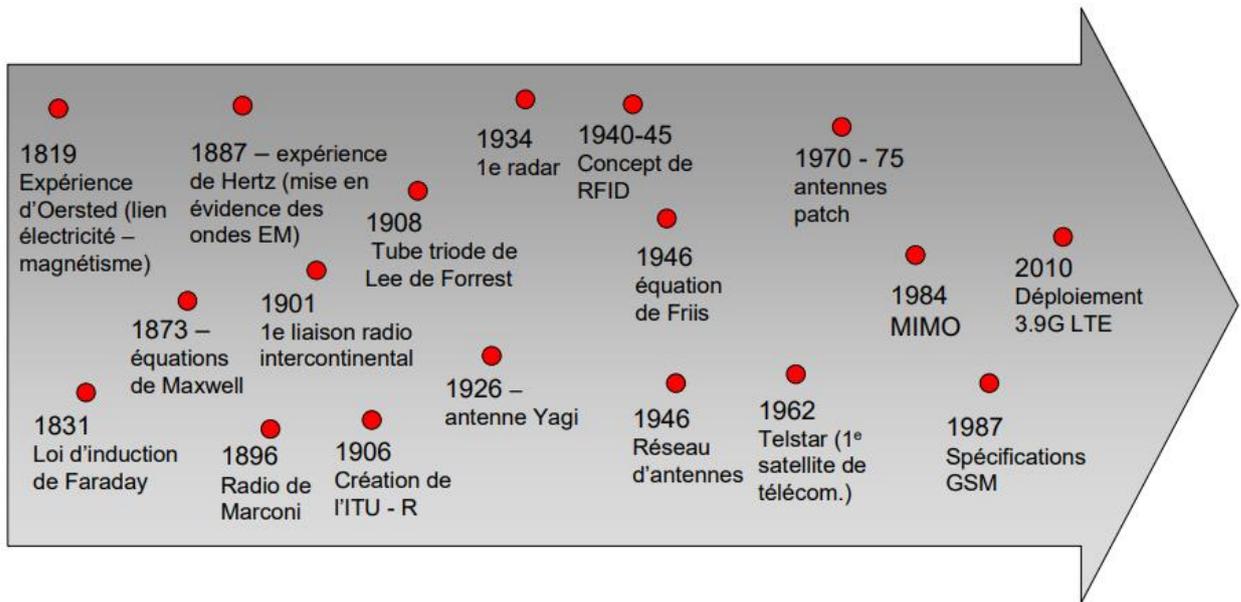


Figure 1.2. Historique des radiocommunications [4].

1.3 Caractéristiques principales d'une antenne

Il doit être intéressant de définir les différentes caractéristiques d'une antenne. Parmi ces caractéristiques, les plus courants sont notamment le diagramme de rayonnement, la directivité, l'efficacité, le gain, la polarisation, l'impédance d'entrée, coefficient de réflexion et la bande passante.

1.3.1 Diagramme de rayonnement

Une représentation graphique de la fonction caractéristique d'une antenne est appelée diagramme de rayonnement. La direction du rayonnement maximal est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne. La représentation de cette fonction donne les propriétés du rayonnement

dans l'espace. Traditionnellement, nous sommes habitués à représenter les diagrammes de rayonnement dans deux plans verticaux : le plan E et le plan H. Le plan E est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique. Le plan H est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique. Certaines représentations tridimensionnelles ont l'avantage de montrer le rayonnement dans toutes les directions de l'espace, et ont l'avantage de montrer le rayonnement dans toutes les directions de l'espace [3]. Quelques exemples de digrammes de rayonnement sont illustrés par la figure 1.3.

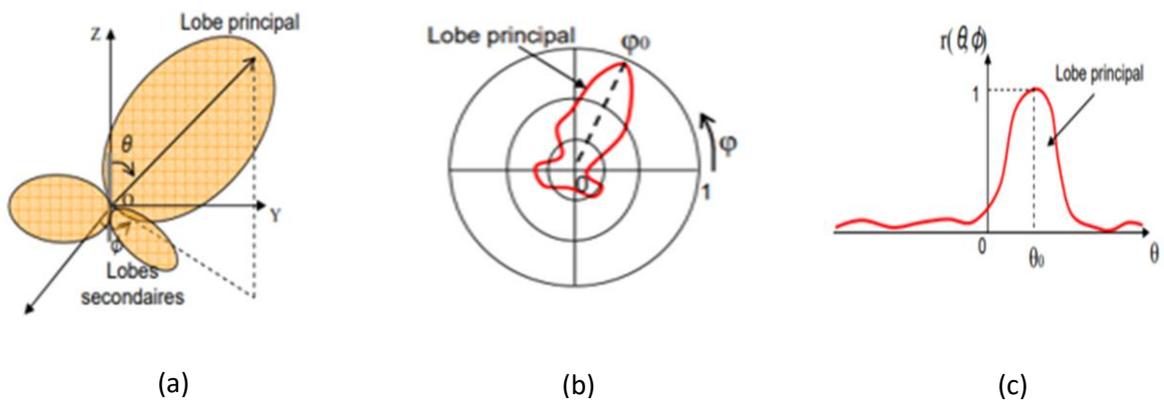


Figure 1. 3. Diagramme de rayonnement: (a) vue 3D, (b) vue 2D (repère polaire), (c)vue 2D (repère cartésien) [4].

1.3.2 Directivité

D'après la version 1983 des définitions standards IEEE des termes pour les antennes, la directivité d'une antenne est définie comme le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction donné de l'antenne à l'intensité de rayonnement moyenne sur toutes les directions (intensité de rayonnement moyenne d'une antenne isotrope). L'intensité de rayonnement moyenne est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π [1].

La directivité (D) est donnée par l'équation suivante :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{ray}} \quad (1.1)$$

Avec :

- U : intensité de rayonnement (W/ unité d'angle solide).

- U_0 : intensité de rayonnement de la source isotrope (W/ unité d'angle solide).
- P_{ray} : puissance rayonnée totale (W).

1.3.3 Gain

Le gain d'une antenne (dans une direction donnée) est défini comme le rapport de l'intensité, dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance acceptée par l'antenne était rayonnée de manière isotrope. L'intensité de rayonnement correspondant à la puissance isotrope est égale à la puissance acceptée (entrée) par l'antenne divisée par 4π [1].

Le gain (G) est donné par l'équation suivante :

$$Gain = 4\pi \frac{U}{P_{entrée}} \quad (1.2)$$

1.3.4 Efficacité (Rendement)

La détermination de l'efficacité (ou rendement) est l'une des étapes fondamentales de la quantification des performances d'une antenne. Ce paramètre représente la quantité de puissance réellement rayonnée par l'antenne par rapport à la puissance d'entrée à la même antenne. Pour une direction donnée, le rapport du gain d'antenne (G) à la directivité (D) donne également le rendement (η_{ray}) pour cette direction [3].

$$\eta_{ray} = \frac{G}{D} \quad (1.3)$$

1.3.5 Polarisation

La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation. Donc si la polarisation de l'antenne de réception n'est pas accordée sur la polarisation de l'antenne d'émission, la puissance reçue ne sera pas maximale. On distingue plusieurs types de polarisation, à savoir : rectiligne, circulaire, elliptique, etc [3]. Quelques exemples sont donnés par la figure (1.4).

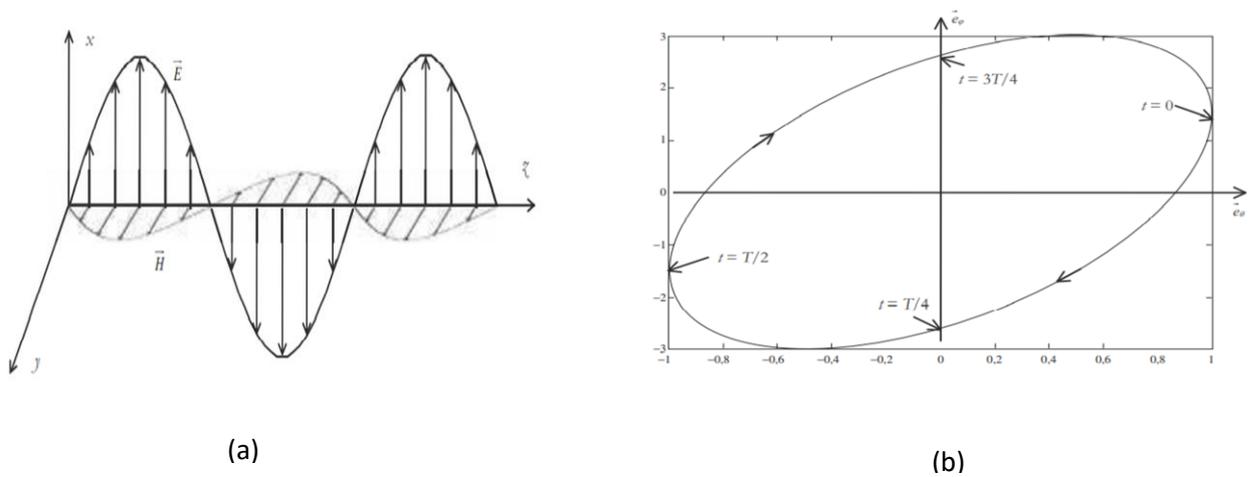


Figure 1.4. (a) Polarisation rectiligne, (b) Polarisation elliptique [3].

1.3.6 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne (Z_e) est l'impédance vue à son entrée. Elle est représentée par:

$$Z_e = R_A + jX_A \quad (1.4)$$

Où :

- La résistance d'entrée R_A : représente un terme de dissipation. Il est lié, d'une part à la puissance rayonnée et d'autre part, à la puissance perdue par effet Joule.
- La réactance X_A : est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

L'impédance de l'antenne est affectée par les objets environnants, en particulier par des objets métalliques ou d'autres antennes à proximité [3].

Une antenne alimentée par un générateur est montrée par la figure 1.5.

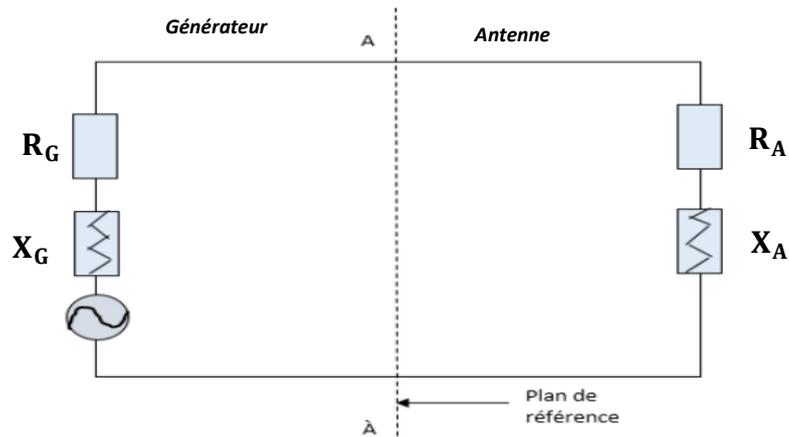


Figure 1.5. Circuit équivalent d'une antenne [3].

1.3.7 Coefficient de réflexion et adaptation

Lorsque l'impédance d'entrée (Z_e) de l'antenne est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c), l'antenne est dite parfaitement adaptée (Aucune réflexion), sinon cela indique qu'il y a un coefficient de réflexion Γ (ou S_{11}). Ce dernier est défini comme suit :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (1.5)$$

Où Z_e et Z_c représentent respectivement l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique de la ligne [5].

On admet généralement qu'une bonne adaptation est réalisée pour un coefficient de réflexion inférieur à -10dB.

1.3.8 Bande passante

La largeur de bande d'une antenne, appelée aussi bande passante (BW), représente la bande de fréquence dans lequel une performance (radioélectrique ou de rayonnement) respecte une certaine spécification (selon application). Dans la pratique, la bande passante la plus courante est celle définie par rapport à l'adaptation de l'antenne et plus précisément au coefficient de réflexion présent à son entrée [5]. La figure 1.6 illustre un exemple d'une bande passante.

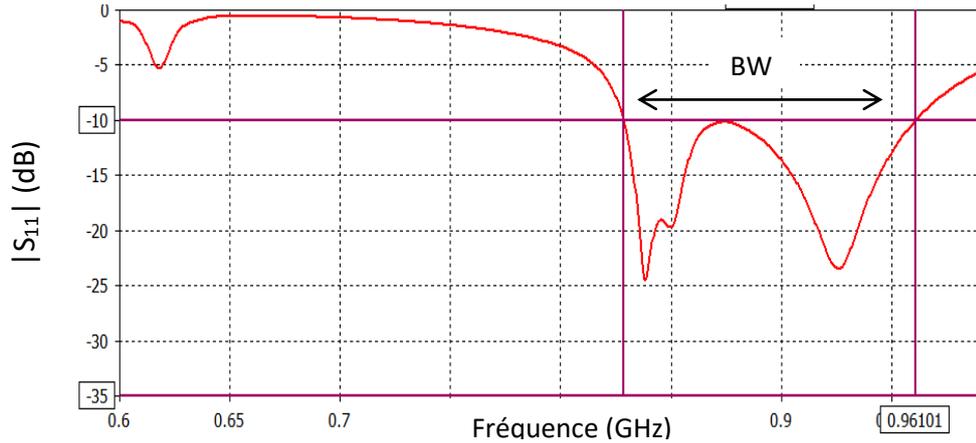


Figure 1.6. Bande passante.

1.4 Antennes imprimées

1.4.1 Définition

L'antenne planaire ou patch (en anglais) est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique caractérisé par une permittivité (ϵ_r) et une épaisseur (h), possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique. Les courants sont amenés du générateur à l'antenne par une ligne micro ruban [3]. Un exemple d'une antenne patch est montré par la figure 1.7.

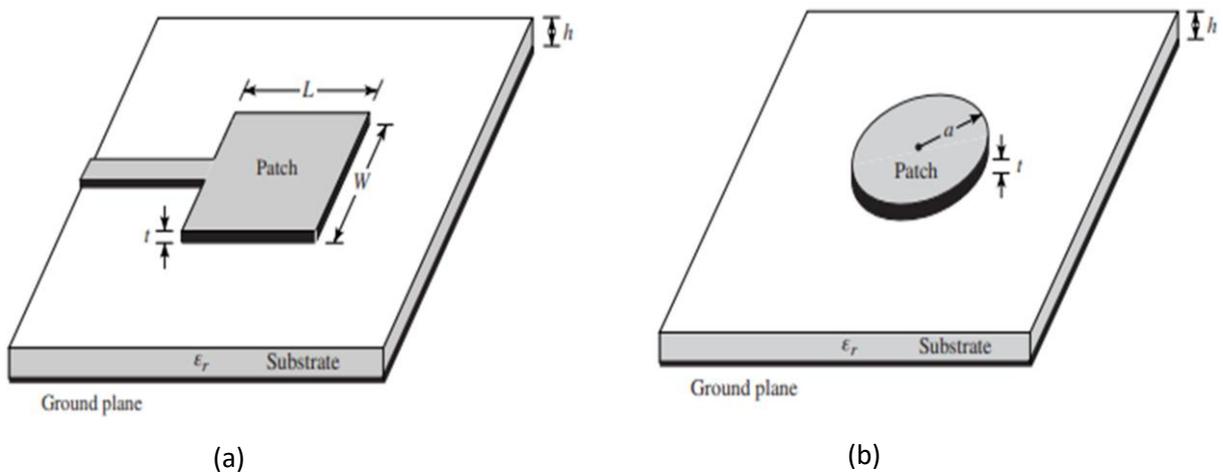


Figure 1.7. Antenne patch de forme : (a) rectangulaire, (b) circulaire [1].

1.4.2 Les techniques d'alimentation

Il existe plusieurs techniques d'alimentation des antennes, qui peuvent être soit par contact direct, soit par couplage ; les plus courantes sont : l'alimentation par ligne micro ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture [6].

a Ligne microruban

Ce type d'alimentation (montré par la figure 1.8) est certainement le moins coûteux et le plus simple. En effet, l'élément rayonnant et les lignes qui l'alimentent sont réalisés sur un même substrat diélectrique par un procédé photolithographique, les points de connexion étant situés sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalés par rapport à cet axe, si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [7].

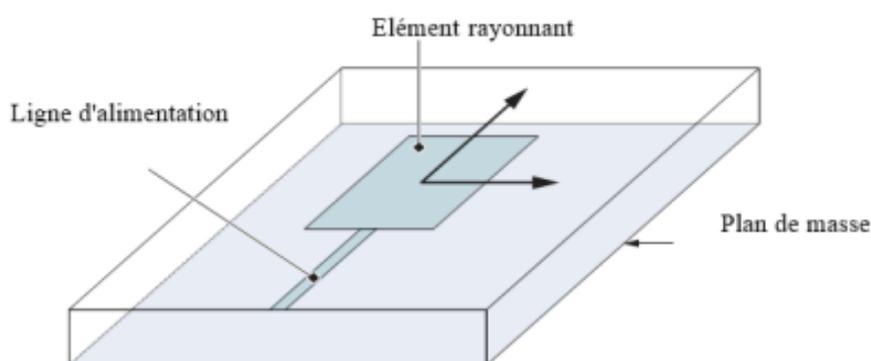


Figure 1.8. Antenne rectangulaire alimentée par ligne microruban [5].

b Câble coaxial

Cette technologie est largement utilisée pour alimenter les antennes microruban. L'élément rayonnant est connecté au noyau central du connecteur coaxial, qui traverse le plan de masse et le substrat diélectrique. La base du connecteur (conducteur extérieur) est soudée directement au plan de masse (voir la figure 1.9) [7].

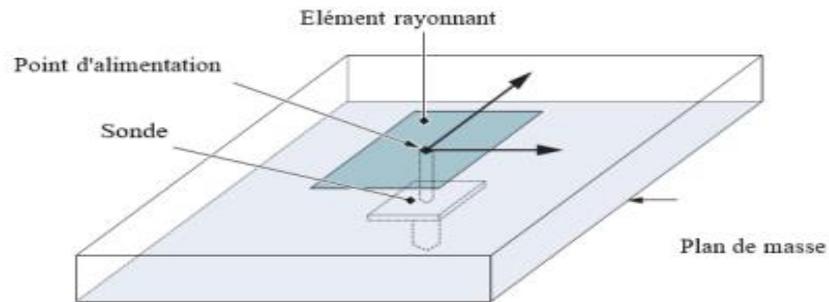


Figure 1.9. Antenne microruban alimenté par un câble coaxial [5].

c Fente

Une ligne est disposée au dos du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous l'élément rayonnant afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne (figure 1.10) [5].

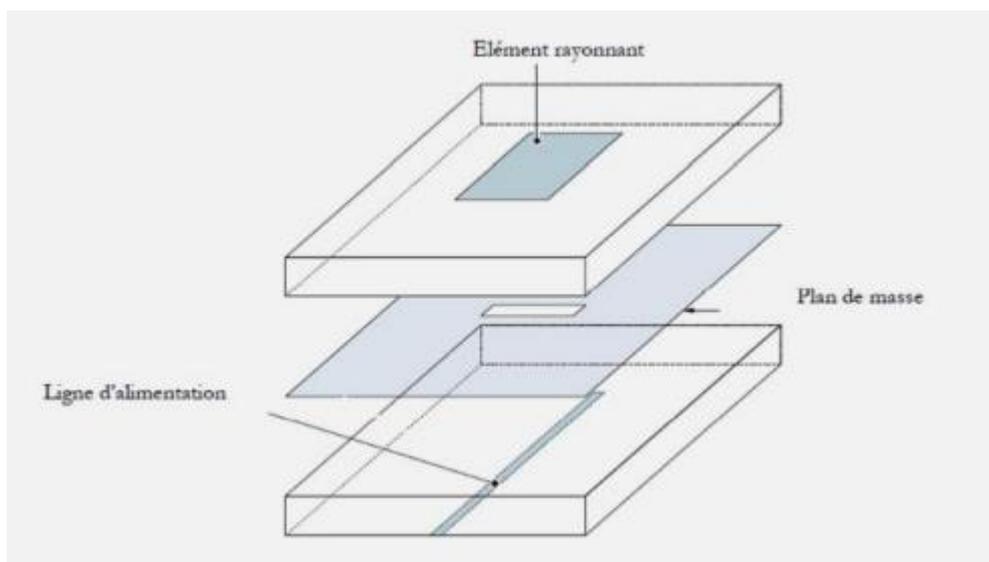


Figure 1.10. Alimentation par fente [5].

d Couplage

Une alimentation couplée moins courante utilise le couplage direct d'une ligne microruban entre un élément rayonnant et un plan de masse entre deux couches de diélectrique, une couche au-dessus de l'autre (figure 1.11) [5].

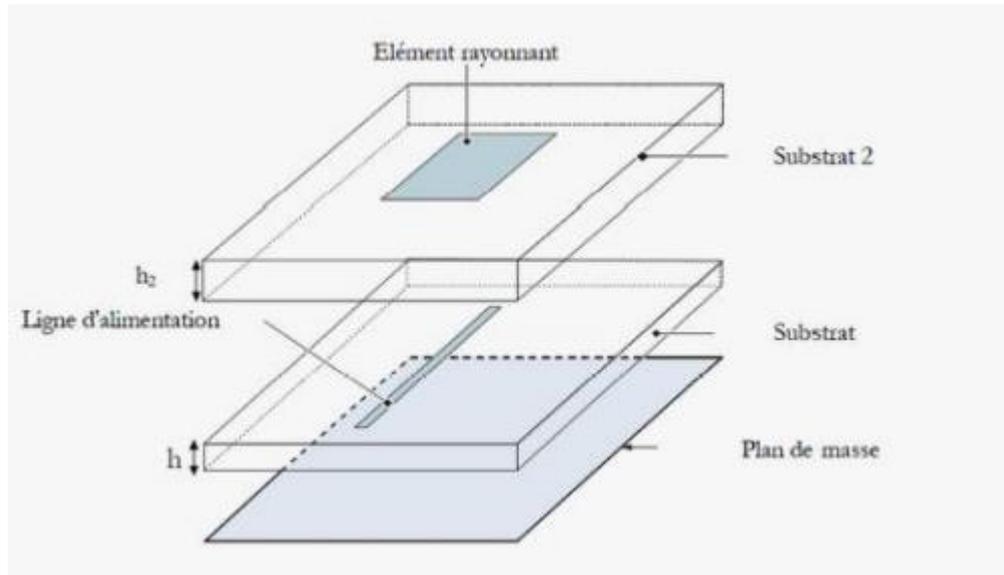


Figure 1.11. Alimentation par couplage [5].

1.4.3 Techniques de miniaturisation d'une antenne patch

Pour réduire les dimensions globales d'une antenne tout en conservant ses caractéristiques nous pouvons utiliser quelques méthodes de miniaturisation. Parmi ces techniques on peut citer les suivantes :

a **Modification de la géométrie**

Cette technique de miniaturisation est la plus répandue actuellement et concerne un panel de formes antennaires. Nous énumérons les différentes structures d'antennes miniatures reposant sur la modification de la géométrie [8].

- **Ajout des fentes**

L'une des techniques mises en œuvre pour allonger le chemin électrique des courants est l'introduction des fentes dans la structure rayonnante. Le principe utilisé est non seulement de forcer les courants à contourner les fentes inscrites et donc allonger leur trajet, mais aussi d'induire des effets capacitifs et inductifs modifiant l'impédance d'entrée de l'antenne. La Figure 1.12 correspond à la structure étudiée par Nguyen. En changeant les caractéristiques de la fente, la fréquence de résonance est modifiée. On retrouve les mêmes résultats concernant la largeur de la fente. Il existe aussi des fentes repliées en U, en H, en papillon [9]...

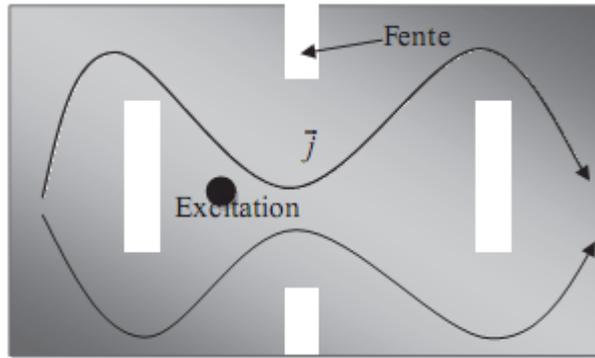


Figure 1.12. Allongement du trajet des courants par ajout des fentes [8].

- Repliement

Par cette technique, on modifie la forme de l'élément rayonnant ou bien on le replie sur lui-même. Cette opération conduit naturellement à un élément qui occupe physiquement moins d'espace qu'une structure non repliée [9]. La figure 1.13 explique la technique de repliement.

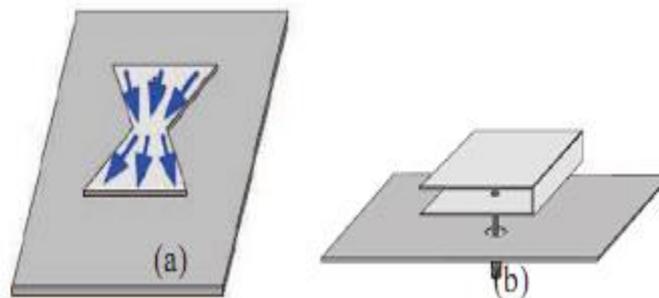


Figure 1.13. Antenne repliée : (a) bow-tie, (b) repliement vertical [8].

b Miniaturisation à l'aide des matériaux

Les antennes imprimées sont des antennes largement utilisées du fait de leur facilité de conception, d'intégration et de leur faible coût. Cependant, compte tenu du contexte de miniaturisation et de leurs tailles initiales relativement grandes, ces antennes font souvent l'objet de réduction de taille électrique par l'utilisation des matériaux [8]. Nous allons détailler quelques types de matériaux employés jusqu'à présent afin de miniaturiser les antennes.

- **Matériaux diélectriques**

De nombreux travaux ont montré la possibilité de miniaturiser les antennes imprimées par l'utilisation d'un substrat diélectrique à forte permittivité qui va concentrer les lignes de champ sous l'élément rayonnant. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait qu'un champ électrique appliqué dans un milieu à forte permittivité influence l'organisation des charges électriques, notamment leur déplacement et la réorientation des dipôles électriques. Il est en effet bien connu que les matériaux à fort contraste permettent de réduire la taille physique d'une antenne en raison d'une longueur d'onde plus courte dans le matériau [8].

- **Matériaux magnétiques**

On ne rencontre quasiment pas de matériaux magnétiques à l'état naturel dans la littérature car leurs valeurs de perméabilité relative restent faibles et leurs pertes magnétiques significatives. Le seul avantage repose sur les épaisseurs importantes qui favorisent grandement l'efficacité de l'interaction onde-matière [8].

- **Matériaux magnéto-diélectriques**

Il existe deux types de matériaux magnéto diélectriques:

Les magnéto-diélectriques dits naturels et ceux réalisés artificiellement que l'on nomme métamatériaux. L'utilisation de matériaux magnéto-diélectriques dont la permittivité et la perméabilité sont toutes deux supérieures à 1, permet de miniaturiser une antenne sans dégrader ses performances en termes de bande passante [8].

Afin de résoudre les problèmes de disponibilité des matériaux magnétiques naturels, les matériaux magnétiques artificiels sont apparus comme étant une solution prometteuse. Une première technique vise à concevoir des matériaux magnétiques artificiels à base de structures périodiques métalliques électriquement petites intégrées dans des substrats diélectriques [9].

1.5 Généralités sur la technologie RFID

1.5.1 Définition et principe de fonctionnement

La RFID (en anglais Radio Frequency Identification) est une technologie utilisant les ondes radio pour l'identification de biens ou de personnes.

De manière générale, un système RFID se compose d'un émetteur et d'un récepteur. L'émetteur fournit l'énergie radiofréquence (RF) et les informations au récepteur. Le récepteur reçoit l'énergie et les commandes émises par l'émetteur, puis transmet ses informations (c'est-à-dire son identifiant). Dans le monde RFID, les émetteurs sont appelés stations de base ou plus communément lecteurs, tandis que les récepteurs sont souvent appelés étiquettes, tags ou transpondeurs RFID [5].

La Figure 1.14 donne une représentation schématique du principe de fonctionnement décrit faisant aussi apparaître les deux liens radio: émetteur vers récepteur dit liaison montante, et récepteur vers émetteur dit liaison descendante.

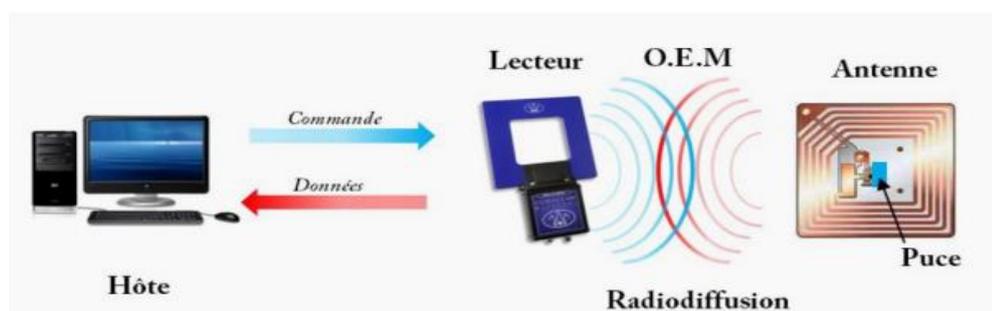


Figure 1.14. Fonctionnement d'un système [10].

1.5.2 Domaine d'application

La qualité, l'authentification et la sécurité des articles achetés, des transactions financières et du transport physique sont les intérêts d'une industrie de plusieurs milliards d'euros. La technologie RFID est actuellement le moyen le plus utilisé pour résoudre cette partie de l'équation, que ce soit sous la forme de contrôle d'accès, de sécurité bancaire ou d'authentification. La technologie RFID peut associer une grande quantité d'informations personnelles à chaque objet de manière unique. Les preuves d'origine et de parcours ainsi que la qualité et l'authenticité peuvent désormais faire partie intégrante de la fiche technique de l'objet. La technologie RFID peut être déployée dans de

nombreux domaines, à savoir: la logistique, la traçabilité, les paiements, les implants et systèmes intelligents [5].

1.5.3 Éléments d'un système RFID

a Lecteur

Un lecteur RFID est un appareil utilisé pour interroger les étiquettes RFID. Le lecteur fait office d'émetteur et de récepteur. Le lecteur possède une antenne (émetteur) qui émet des ondes radio, et le tag répond en renvoyant ses données. Le lecteur utilise son antenne attachée (récepteur) pour collecter les données reçues de l'étiquette. Il transfère ensuite ces données à un ordinateur pour le traitement. La communication du système RFID est basée sur le principe de la relation maître-esclave, le lecteur RFID agit en tant que maître et l'étiquette agit en tant qu'esclave. Les lecteurs RFID ne communiquent qu'avec des étiquettes dans leur plage de lecture. Les lecteurs peuvent se présenter sous de nombreuses formes et tailles, fonctionner à de nombreuses fréquences différentes et fournir un large éventail de fonctionnalités [5]. La figure 1.15 représente un lecteur RFID.



(a)



(b)

Figure 1.15. (a) Lecteur RFID, (b) antenne de lecteur RFID [5].

b Système de traitement des données

Les données saisies par le lecteur sont transmises et traitées par un système informatique comprenant un logiciel, tel qu'un système de contrôle d'inventaire, un système de contrôle d'accès ou un système de contrôle de production [5].

c Tag

Les étiquettes correspondent à des étiquettes électroniques, également appelées transpondeurs. Le transpondeur comprend une antenne associée à une puce électronique apte à répondre aux requêtes émises depuis l'émetteur-récepteur. Les étiquettes peuvent être de deux types: les étiquettes RFID avec puces et les étiquettes RFID sans puces. Les étiquettes RFID sans puce, communément appelées Chipless RFID Tag, représentent une solution à très faible coût. La figure 1.16 montre un tag RFID [5].

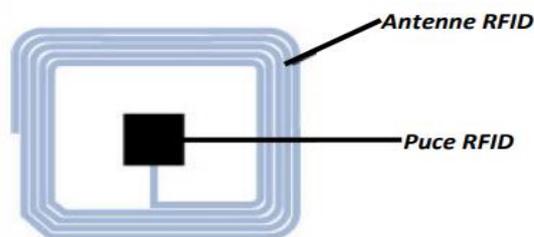


Figure 1.16. Tag RFID [5].

Les étiquettes RFID avec puces sont divisées en trois catégories : actives, semi-passives et passives.

- Tag actif

Les tags actifs (figure 1.17) sont les plus coûteux car ils sont plus complexes à générer et s'assurer, outre des fonctions de transmission, des fonctions soit de captage ou bien de traitement de l'information captée, soit les deux. Par conséquent, ils ont nécessité une alimentation embarquée, et sont donc caractérisés par la durée de vie. Si le prix est un facteur discriminatif, il faut savoir que ces étiquettes s'avèrent particulièrement bien adaptées à certaines fonctions, dont notamment la création de systèmes d'authentification, de sécurisation, d'antivol, etc.... En général, ils sont parfaits pour déclencher une alerte. Aussi, ils peuvent transmettre à plusieurs centaines de mètres [5].

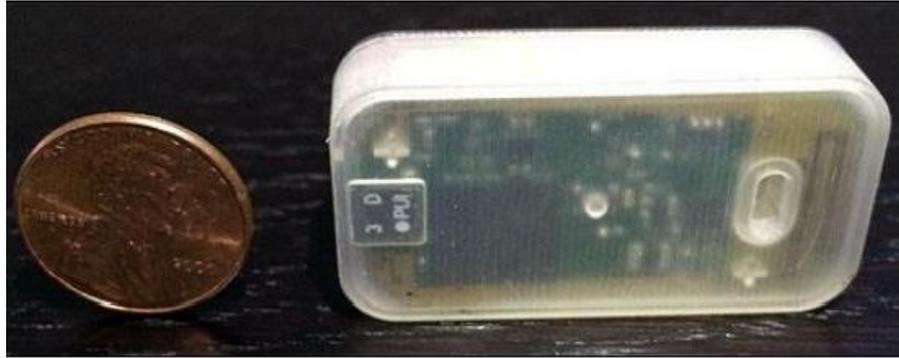


Figure 1.17. Tag actif RFID [5].

- Tag passif

Ces étiquettes, qui n'ont pas de source d'alimentation externe, dépendent des effets électromagnétiques de la réception des signaux du lecteur. C'est ce courant qui leur permet d'alimenter leurs microcircuits. Ils sont peu coûteux à produire et sont généralement réservés à la production de masse. Ils sont plus que nous trouvons dans la logistique et l'expédition. Ils utilisent différentes bandes de fréquences radio, selon leur capacité à transmettre sur des distances plus ou moins grandes et à travers différentes substances (air, eau, métal). La distance de lecture est inférieure à un mètre. Les basses et hautes fréquences sont normalisées à l'échelle mondiale. Ces puces sont collées sur les produits et sont utilisées pour suivre l'inventaire. Selon les cas, ils sont jetables ou réutilisables [5]. La figure 1.18 donne un exemple d'un tag passif.

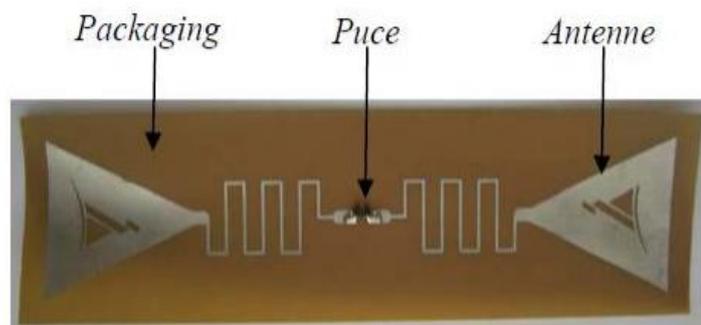


Figure 1.18. Tag passif RFID [5].

- **Tag semi-passif**

Ces tags (figure 1.19), sont un compromis entre les tags passifs et actifs. En effet, comme les tags actifs, elles disposent d'une batterie externe pour alimenter le récepteur radio et le circuit de contrôle intégré. Cependant, ils n'ont pas d'émetteur radio et utilisent donc la modulation rétro-réflexive pour transmettre les informations au lecteur de la même manière que les tags passifs [5].



Figure 1.19. RFID UHF avec tag semi-passif [5].

1.5.4 Quelques exemples d'antennes lecteurs RFID UHF commercialisées

Dans le commerce, on peut trouver plusieurs solutions d'antennes pour les lecteurs RFID. Le tableau 1.1 présente quelques prototypes d'antennes pour lecteur RFID.

Types d'antennes	Fréquences de fonctionnement	Dimensions	Aperçus des antennes
Impinj Mini-Guardrail ILT (LP) Indoor RFID Antenna (Global)	Global (865-954 MHz)	69.85 x 133.35 x 19.05 mm	
Times-7 A1001 Proximity (CP) Indoor RFID Antenna (Global)	Global (864-928 MHz)	82 x 82 x 9.5 mm	
Vulcan RFID™ L11 UHF RFID Antenna	Dual Band (813-1000 MHz)	137 x 137 x 13 mm	

Tableau 1.1. Quelques antennes lecteurs RFID UHF commercialisées [11].

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux antennes et à la technologie RFID. Dans un premier lieu, nous avons défini les antennes tout en donnant quelques-unes de leurs caractéristiques fondamentales (diagramme de rayonnement, directivité, gain, efficacité, polarisation, impédance d'entrée, coefficient de réflexion et bande passante). Dans un second temps, nous avons abordé les antennes imprimées ainsi que les techniques utilisées pour leur miniaturisation. Enfin, nous avons donné un bref aperçu sur la technologie RFID en donnant son principe de fonctionnement, ses éléments constitutants et quelques exemples d'antennes pour lecteur RFID UHF.

Chapitre 2 Métamatériaux

2.1 Introduction

Durant les dernières années, une nouvelle expression est apparue dans l'univers de la théorie de l'électromagnétisme, ce sont les métamatériaux. Dans ce chapitre, on s'intéressera d'abord à l'historique et à la définition de métamatériaux, à leurs différents types et propriétés. Ensuite, une attention particulière sera réservée au type conducteur magnétique artificiel (AMC) en montrant quelques motifs existants. Enfin, les applications des métamatériaux et leurs utilisations dans le domaine des antennes seront détaillées.

2.2 Définition et historique

Les « métamatériaux électromagnétiques » ou simplement métamatériaux, le préfixe « méta » signifie que ces matériaux sont fabriqués par l'homme car ils n'existent pas à l'état naturel. Ils sont définis comme des structures électromagnétiques artificielles homogènes avec des propriétés effectives qui ne sont pas présentes de façon spontanée [12].

Les métamatériaux n'ont cessé d'attiser l'intérêt des chercheurs, car ils permettent d'envisager de nouvelles applications et optimisations dans le domaine des antennes, notamment au niveau de la miniaturisation des circuits. A partir de l'an 2000 jusqu'à aujourd'hui le nombre de papier et conférences qui traitent ce sujet a augmenté de façon exponentielle (voir figure 2.1) [13].

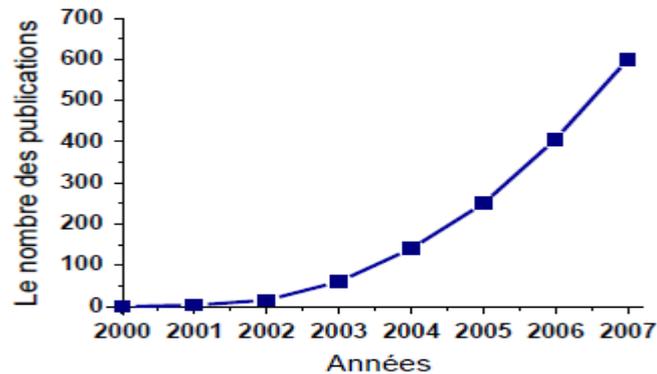


Figure 2.1. Le nombre des publications annuelles au sujet de métamatériaux [13].

Voici un résumé de l'histoire des métamatériaux et des principaux chercheurs impliqués [12] :

- **1968** : Veselago introduit la théorie de matériaux doublement négatifs au niveau de la perméabilité et de la permittivité.
- **1999** : - Pendry montre qu'il est possible d'obtenir des perméabilités négatives ($\mu < 0$).
- D. Sievenpiper introduit la structure « champignon » de Sievenpiper.
- **2000** : Smith montre théoriquement la faisabilité d'un métamatériau.
- **2001** : Validation expérimentale de la réfraction négative par Smith.
- **2002** : Concept de lentille parfaite de Pendry.
- **2005** : Approche ligne de transmission par Caloz et Itoh.
- **2006** : Application métamatériaux : antenne, coupleur, ...

2.3 Les différents types des métamatériaux

L'application de matériaux artificiels, appelés métamatériaux, ce terme a plusieurs définitions comme : Left-Handed Material (LHM), High Impédance Surface (HIS), Epsilon-Near-Zéro (ENZ), Mu-Near-Zéro (MNZ).

Les paramètres techniques de base des métamatériaux sont la permittivité relative ϵ_r et la perméabilité relative μ_r . Sur la base de ces deux paramètres, nous pouvons classer les métamatériaux en trois groupes généraux : Double Positif (DPS), dans lequel μ_r et ϵ_r sont tous deux positifs, Simple Négatif (SNG), qui a soit μ_r négatif soit seulement ϵ_r mais pas les deux en même temps et enfin, Double Négatif (DNG), où μ_r et ϵ_r sont tous deux négatifs (voir figure 2.2) [14]. Les métamatériaux

peuvent être réalisés sous la forme de différentes structures appelées surface à haute impédance (HIS), surfaces sélectives en fréquence (FSS), résonateurs à anneau fendu (SRR), etc.

On va concentrer sur le type des surfaces à haute impédance HIS introduites par Sievenpiper. Ces surfaces peuvent être utilisées afin d'améliorer les performances d'une antenne (gain ; diagramme, bande passante).

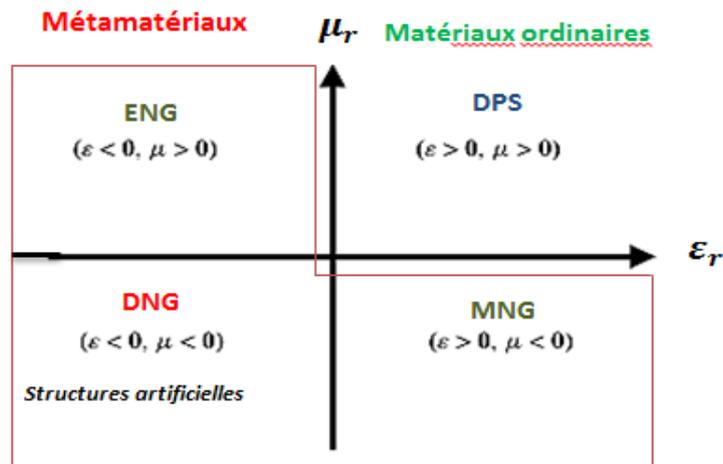


Figure 2.2. Classement des matériaux en fonction de leur permittivité et de leur perméabilité [14].

2.4 Définition de la surface à haute impédance HIS

Les surfaces à haute impédance sont généralement des structures périodiques fixées ou imprimées sur un plan de masse. Elles possèdent des propriétés très intéressantes d'un point de vue électromagnétique, car elles n'autorisent la propagation des ondes électromagnétiques le long de leur surface que pour certaines bandes de fréquences [12].

Une structure récente issue des travaux de recherche de D. Sievenpiper peut également être utilisée pour réduire les ondes de surface. La figure 2.3 présente la géométrie de la structure. Dans la littérature, cette structure se rencontre souvent sous le nom de « surface champignon ». Celle-ci est constituée d'un réseau 2D de patches carrés ou hexagonaux métalliques, reliés au plan de masse par l'intermédiaire d'un «via» [15].

Une telle structure est composée de quatre parties:

- des patches métalliques périodiques
- un barreau diélectrique ou substrat de permittivité relative
- un plan de masse
- vias métalliques verticaux

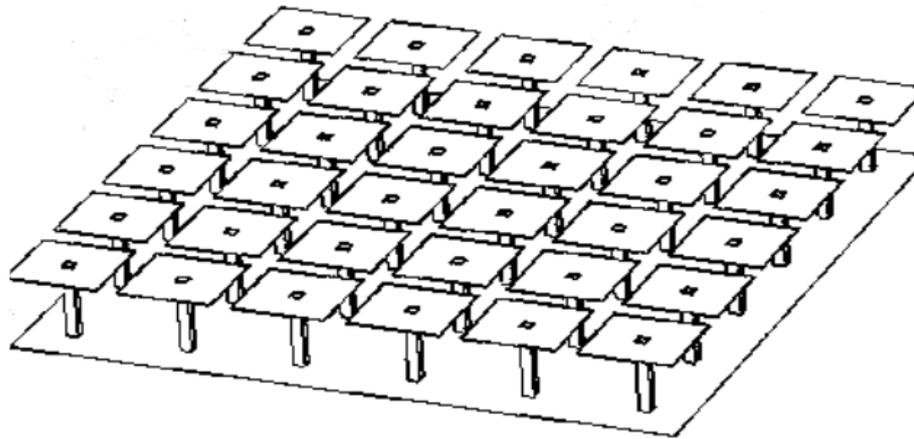


Figure 2.3. Structure de Sievenpiper [15].

Lorsqu'on parle de la classification des surfaces HIS il existe les matériaux à bande interdite EBG qui a alors la capacité de jouer un rôle de filtre fréquentiel et le deuxième type est les conducteurs magnétiques artificiels AMC proposés par Sievenpiper en 1999 [12].

2.4.1 Définition d'un EBG

De manière générale, les structures de bande interdite électromagnétique (EBG) sont définies comme des objets artificiels périodiques (ou parfois non périodiques) qui empêchent ou assistent la propagation des ondes électromagnétiques dans une bande de fréquence spécifiée pour tous les angles d'incidence et tous les états de polarisation [16].

Ces structures EBG ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs grâce à leurs propriétés intéressantes en termes de miniaturisation et de suppression des ondes de surfaces.

Elles sont généralement réalisées par arrangement périodique de matériaux diélectriques et de conducteurs métalliques comme le montre la Figure 2.4.

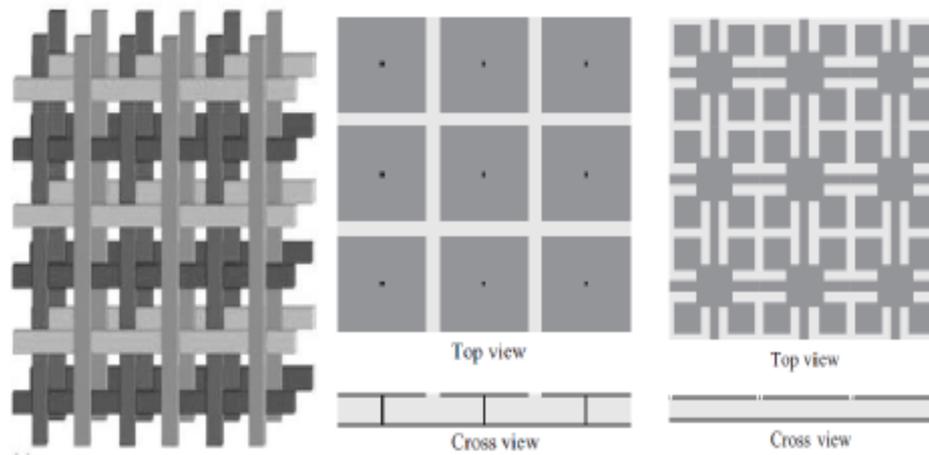


Figure 2.4. Structures EBG périodiques [16].

2.4.2 Définition des AMC

L'une des applications des EBG est les Conducteurs Magnétiques Artificiels (AMC) qui ont été introduites par D. Sievenpiper en 1999. Ce sont des structures à motifs métalliques périodiques imprimés sur un substrat diélectrique et connectées au plan de masse avec une surface de conducteur magnétique pour une bande de fréquence spécifiée [16], Il n'y a pas de via entre le patch et le plan de masse, ce qui permet de réduire le coût et de faciliter la réalisation. Dans la littérature, on trouve de nombreuses géométries selon le fonctionnement souhaité de l'AMC (mono-bande ou bi-bande).

La géométrie de la cellule unitaire est présentée dans la figure 2.5.

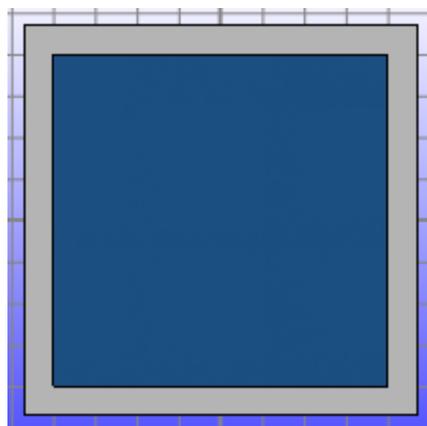


Figure 2.5. Cellule unitaire AMC.

a Propriétés d'AMC

Les surfaces AMC ont deux propriétés importantes et intéressantes ne se produisant pas dans la nature et elles ont conduit à une large gamme d'applications de circuit micro-ondes.

Premièrement, les surfaces AMC ont une bande de fréquence interdite sur laquelle la surface des ondes et des courants ne peuvent pas se propager, ce qui les rend utiles comme des plans de masse. Par exemple, les plans de masse d'antenne qui utilisent des surfaces AMC ont des bons diagrammes de rayonnement sans ondulations indésirables basés sur la suppression de la propagation d'ondes de surface dans la bande de fréquences de bande interdite [15].

Deuxièmement, une surface EBG réfléchit les ondes incidentes avec une phase 0° dans certaines bandes de fréquence ; ainsi, ils sont équivalents à un conducteur magnétique parfait (PMC) ou à un AMC pour une onde plane incidente.

La figure 2.6 montre la phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence lorsque le réflecteur AMC est illuminé par une onde que l'on suppose plane et d'incidence normale.

La fréquence f_0 correspondant à la phase du coefficient de réflexion nulle, est appelée fréquence de résonance. La bande interdite de l'AMC est définie lorsque la phase du coefficient de réflexion au niveau de la surface varie entre $+90^\circ$ et -90° [16].

En dehors de cette bande de fréquences le réflecteur se comporte comme un réflecteur PEC.

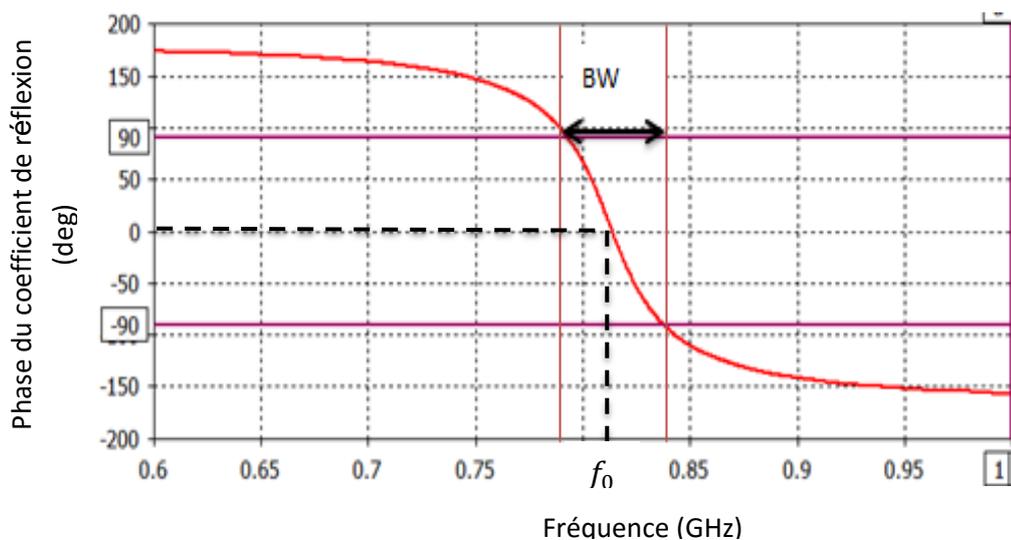


Figure 2.6. La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule AMC.

2.5 Applications d'AMC pour les antennes

Les AMC possèdent des propriétés électromagnétiques uniques qui ont poussé les chercheurs à utiliser ces matériaux dans diverses applications. Parmi ces applications, nous allons citer quelques domaines comme: l'optique, les micro-ondes et les antennes. Dans notre projet on intéresse d'antennes afin d'améliorer leurs caractéristiques en terme de bande passante, de gain et la miniaturisation de leurs taille. Le tableau 2.1 résume les différents motifs AMC et leurs objectifs.

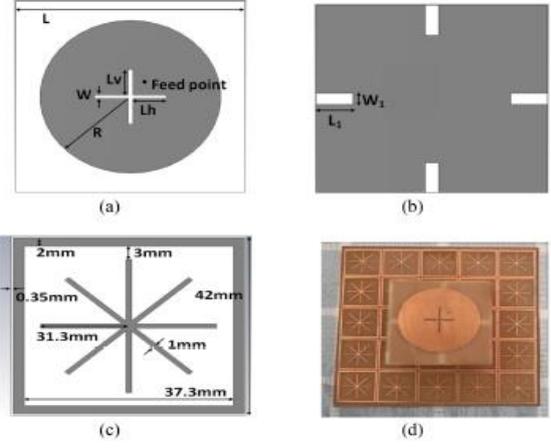
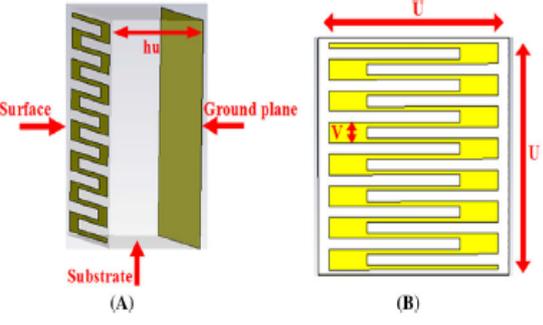
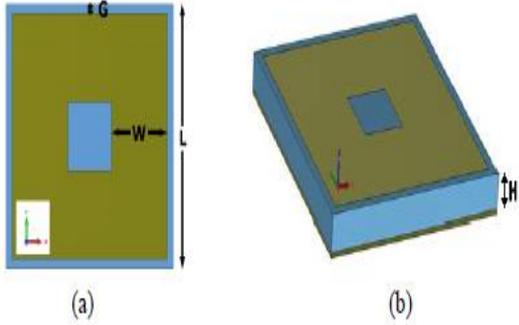
Motifs AMC	Objectifs
	<p>[17] « Miniaturisation de l'antenne »</p> <p>une antenne patch circulaire avec une polarisation circulaire bi-bande dans les bandes UHF-RFID et WLAN pour réduire la taille totale de l'antenne de 210mm× 210mm à 168mm×168mm avec une amélioration du gain.</p>
	<p>[18] « Augmenter le gain »</p> <p>Une antenne à guide d'ondes coplanaire est présentée pour la RFID applications, L'AMC proposé avec un système électrique qui améliore le gain d'antenne de 2 à 6.7dBi.</p>
	<p>[19] « Elargir la bande passante »</p> <p>Antenne planaire large bande à profil bas basée sur l'utilisation d'une surface à haute impédance (HIS) atteint une bande passante relative de 55,6%, un gain élevé de 10,25dBi et une efficacité de rayonnement de 97%.</p>

Tableau 2.1. Les différents motifs AMC et leurs objectifs.

2.6 Les travaux de miniaturisation antennes à base de métamatériaux

Les antennes imprimées sont des antennes largement utilisées du fait de leur facilité de conception, d'intégration et de leur faible coût. Cependant, compte tenu du contexte de miniaturisation et de leurs tailles initiales relativement grandes, ces antennes font souvent l'objet de réduction de taille électrique par l'utilisation de matériaux [8].

Le premier travail qu'on va citer c'est celui de [20] qui consiste en la conception d'antennes fonctionnant dans la bande L et qui s'étale de 1 à 2 GHz. L'objectif de cette étude est de réduire la taille de l'antenne en utilisant les métamatériaux et d'élargir la bande passante pour pouvoir couvrir toute la bande L avec une antenne imprimée monopole.

L'antenne conçue est constituée d'un monopole sur un substrat de permittivité relative $\epsilon_r=1$ (le vide) déposé sur des HIS sans vias métalliques (de 4x4 cellules carrées (80mm x 80mm) espacées de 5mm), placées sur un substrat (d'une épaisseur de 20mm). Le tout est empilé sur plan de masse carré de côté 400mm comme le montre la figure 2.7.

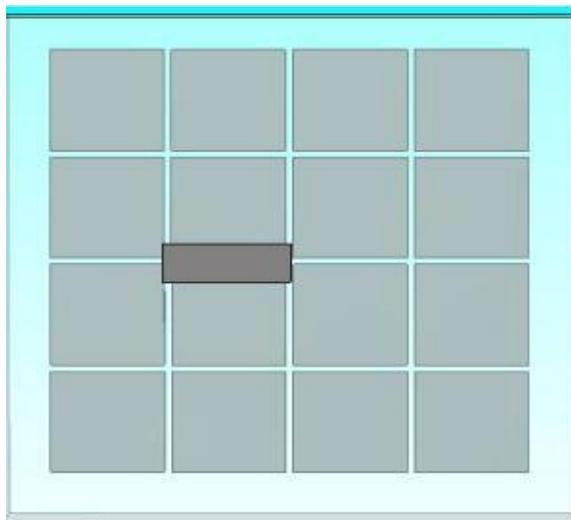


Figure 2.7. Structure de l'antenne avec AMC en 2D [20].

L'étude a montré que l'utilisation de AMC a permis d'élargir la bande de fréquence de fonctionnement avec une amélioration de 4.84%. De plus, cet AMC a permis de réduire 50% de sa dimension avec une augmentation remarquable des performances comme une augmentation de

0.65dB de gain. Toutefois, l'inconvénient de cette structure reste sa bande passante relativement étroite.

Ensuite, dans les travaux de [19] ont consisté en la miniaturiser une antenne patch circulaire avec une polarisation circulaire bi-bande dans les bandes UHF-RFID et WLAN pour réduire la taille totale de l'antenne de 210mm×210mm à 168mm×168mm avec une amélioration du gain.

Dans la structure finale, une antenne monopôle alimentée par microruban à large bande est intégrée avec AMC du réseau de cellules 3x4 est monté sous l'élément rayonnant, comme illustré à la figure 2.8.

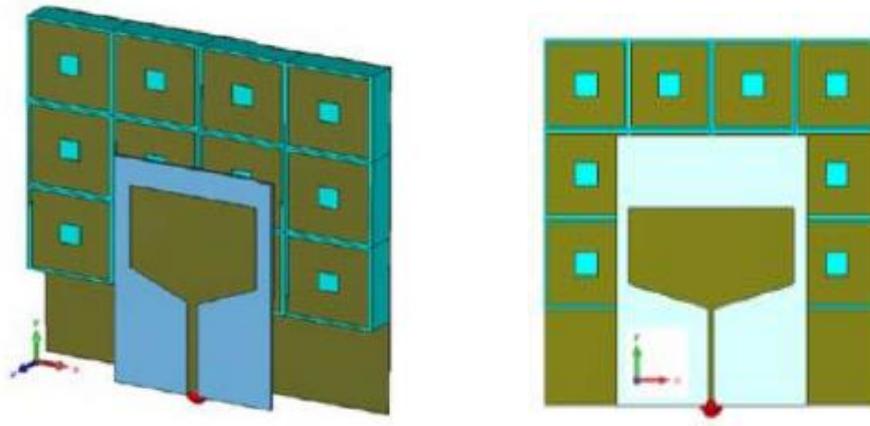


Figure 2.8. Structure de l'antenne avec AMC [19].

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes classes des métamatériaux, les surfaces à haute impédance HIS, les métamatériaux à bande interdite EBG et les conducteurs magnétiques artificiels AMC. Ces structures artificielles ont apporté des développements dans le domaine de l'électromagnétisme et plus particulièrement celui des télécommunications. Pour les antennes, ces matériaux artificiels peuvent être utilisés pour plusieurs objectifs, à savoir : la miniaturisation, l'amélioration du gain ou de la bande passante. Dans le chapitre suivant, les métamatériaux seront utilisés pour la miniaturisation de l'épaisseur d'une antenne patch pour lecteur RFID.

Chapitre 3 Simulation et optimisation d'une antenne

RFID UHF compacte

3.1 Introduction

Ce chapitre présente la conception et la simulation électromagnétique d'antennes patch pour lecteur RFID UHF. Après la présentation d'une antenne patch avec une fente de forme U développée dans un projet de fin d'études antérieur, le cahier des charges de ce travail a été détaillé. Il s'agit d'avoir une antenne à fort gain et fonctionnant dans la totalité de la bande RFID UHF (860-960MHz) avec une petite épaisseur. Plusieurs réseaux de cellules AMC ont été ensuite proposés et ajoutées à l'antenne dans le but de réduire son épaisseur totale. Après la comparaison des résultats obtenus avec ces différents réseaux de cellules, une cellule AMC intéressante permettant un bon compromis entre performance et épaisseur de l'antenne a été identifiée.

3.2 Présentation de l'antenne patch avec U-slot

Cette antenne de type patch rectangulaire a été réalisée dans le cadre d'un projet de fin d'étude soutenu en 2018 dont l'objectif était de concevoir une antenne pour lecteur RFID UHF [5]. L'antenne résultante, montrée par la figure 3.1, est une antenne imprimée ($20 \times 20 \times 3 \text{cm}^3$) opérant dans la totalité de la bande RFID UHF (860-960MHz). Le patch rectangulaire ainsi que son plan de masse sont imprimés chacun sur un substrat de type FR4 ($h=1.6\text{mm}$ et $\epsilon_r=4.4$) et sont séparés par une couche d'air d'épaisseur $h_a=26.8\text{mm}$. Le point d'alimentation de type sonde coaxiale se situe au milieu du patch rectangulaire. L'outil de conception et de simulation électromagnétique utilisé était ZELAND IE3D.

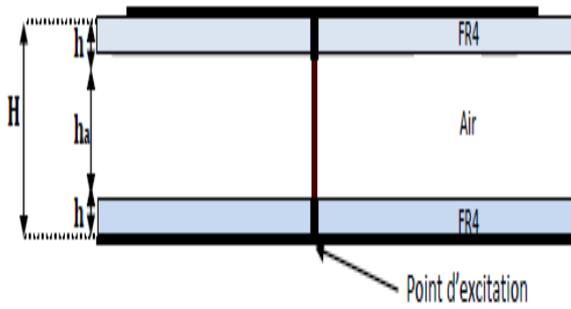
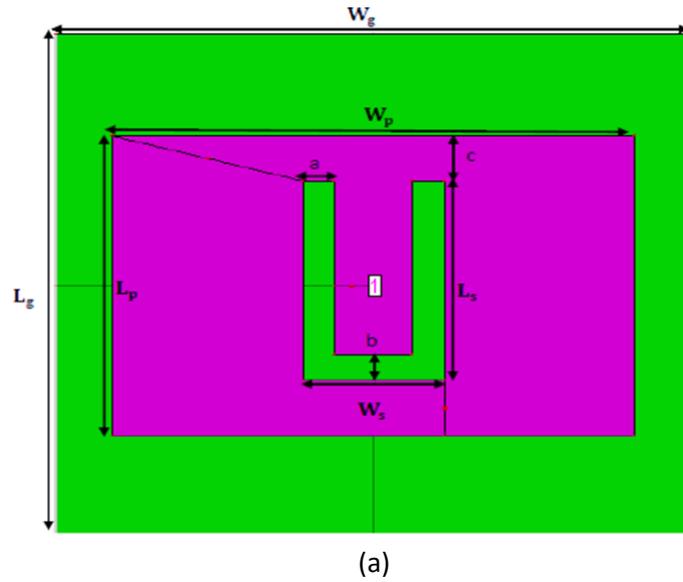


Figure 3.1. Antenne patch proposée par [5] : a) Vue de dessus -b) Vue de coté - c) Photographie de l'antenne réalisée.

Les dimensions de cette antenne sont résumées dans le tableau 3.1.

Paramètres	L_g	W_g	L_p	W_p	L_s	W_s	a	b	c	h	h_a	H
Valeurs (mm)	200	200	120.5	164.7	80	45	10	10	17.9	1.6	26.8	30

Tableau 3.1. Dimensions de l'antenne patch avec U-slot [5].

Dans ce travail, l'antenne patch proposée dans [5] a été introduite et re-simulée en utilisant le logiciel CST. Ce dernier est beaucoup plus adapté à la simulation de structures relativement complexes notamment avec l'intégration de réseaux AMC.

Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne patch avec fente de forme U est illustré par la figure 3.2.

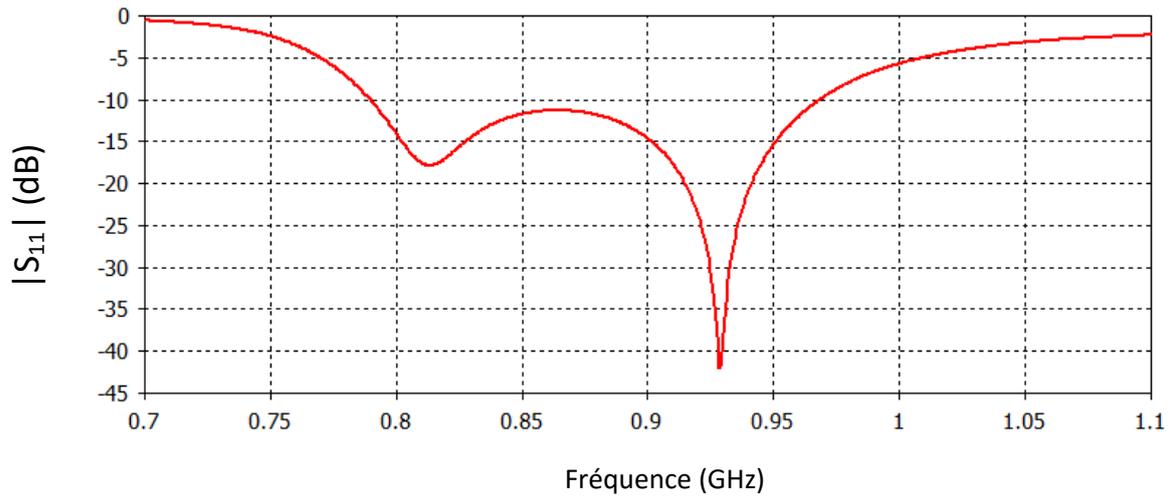


Figure 3.2. Coefficient de réflexion représentée par CST.

Les résultats obtenus montrent que l'antenne proposée fonctionne dans la bande 802 à 996 MHz (20.52%) couvrant ainsi la totalité de la bande RFID UHF (860 à 960 MHz).

Les gains aux fréquences 860, 910 et 960MHz sont récapitulés dans le tableau 3.2.

Fréquences (MHz)	860	910	960
Gain (dBi)	7.86	7.76	6.68

Tableau 3.2. Gains aux fréquences 860, 910 et 960MHz.

La figure 3.3 indique la variation du gain en fonction de la fréquence.

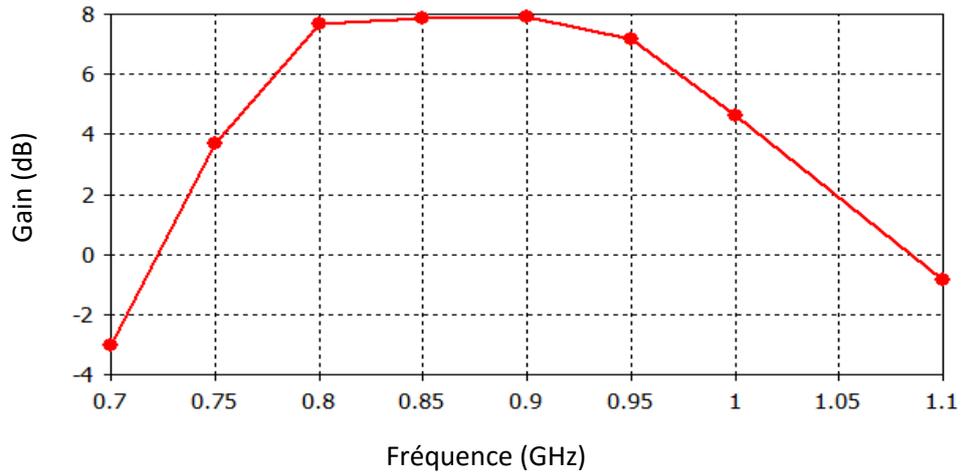


Figure 3.3. Variation du gain en fonction de la fréquence de l'antenne patch avec U-Slot.

En conclusion de cette partie, les résultats obtenus avec CST sont très proches à ceux obtenus par IE3D dans [5] et valident le bon fonctionnement de l'antenne.

3.3 Objectifs et cahier des charges

L'objectif de ce travail est de réduire la forte épaisseur (30mm) de l'antenne patch avec U-slot présentée précédemment. L'antenne compacte conçue doit cependant satisfaire le cahier des charges donné par le tableau 3.3. Il est à noter que ce cahier des charges est identique à celui utilisé dans [5].

Performance	Spécification
Bande passante	(860-960Mhz)
Gain	>5dBi
Taille	Le plus compacte possible
Adaptation	$ S_{11} < -10\text{dB}$
Diagramme de rayonnement	Unidirectionnel

Tableau 3.3. Cahier des charges.

Le substrat utilisé pour cette conception est le FR-4 ($\epsilon_r=4.3$, $h=1.6\text{mm}$).

3.4 Réduction de l'épaisseur de l'antenne patch avec U-slot en utilisant les AMC

3.4.1 Conception des cellules AMC

Nous proposons d'étudier la cellule AMC, montrée par la figure 3.4, fonctionnant dans la bande RFID (860-960MHz). Les dimensions de cette cellule sont : $w_{amc}=70\text{mm}$, $a_1=2.25\text{mm}$ et $d_2=21\text{mm}$. On utilise comme substrat le FR-4 de permittivité $\epsilon_r=4.3$ avec une épaisseur de 4.8mm. Cette épaisseur peut être obtenue pratiquement en empilant trois substrats FR-4 de 1.6 mm d'épaisseur.

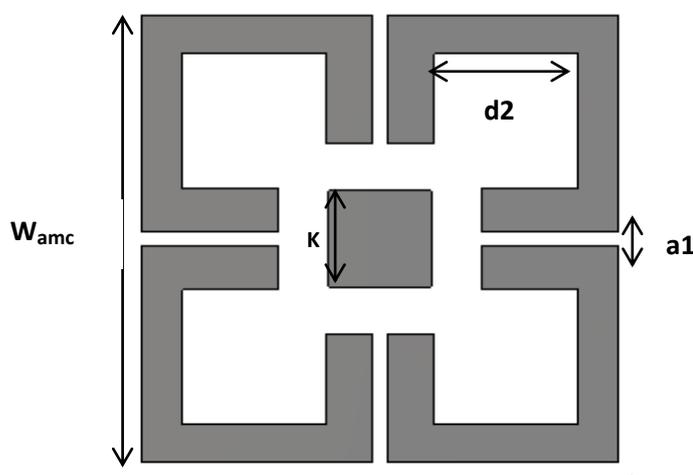


Figure 3.4. Modèle d'une cellule AMC.

Afin d'étudier cette cellule, la phase du coefficient de réflexion est tracée de -180° à 180° en passant par 0° comme le montre la figure 3.5. Plus de détails sur la méthode utilisée pour la simulation de cette cellule sur CST sont donnés dans l'annexe 1. La bande passante (BW) utile d'un AMC est généralement défini pour une phase du coefficient de réflexion comprise entre -90° à $+90^\circ$. D'après cette figure, la bande passante correspond à la bande RFID UHF (860-960 MHz)

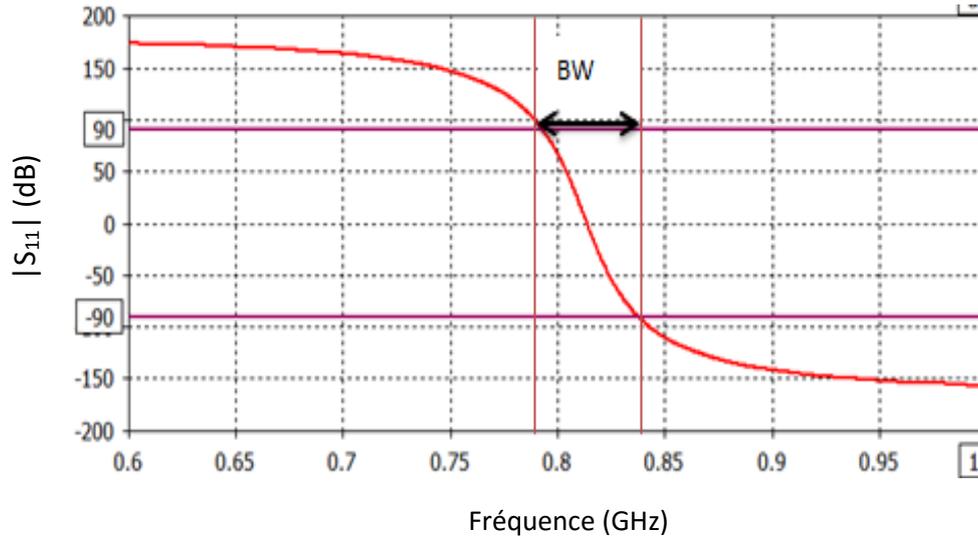


Figure 3.5. La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule AMC.

3.4.2 Conception d'antennes patch RFID avec AMC

Après plusieurs simulations électromagnétiques, nous avons choisi les trois cellules qui seront présentées par la suite.

a Première cellule

La première cellule considérée est celle illustrée par la figure 3.4. Un AMC formé d'un réseau de 2x2 cellules a été placé entre l'antenne patch rectangulaire avec U-slot et le plan de masse comme le montre la figure 3.6. Le gap ou l'espacement entre cellules est calculé en utilisant la formule suivante.

$$gap = L_p - [(w_{amc} \times 2) + k] \quad (3.1)$$

Avec :

- k : L'espace entre le bord du substrat et la cellule AMC.
- L_p : La largeur du substrat.
- w_{amc} : La longueur de la cellule AMC.

Les dimensions finales de l'antenne intégrant le réseau de 2X2 cellules sont données dans le tableau 3.4. Le coefficient de réflexion (S_{11}) et gain de cette structure sont présentés respectivement par les figures 3.7 et 3.8.

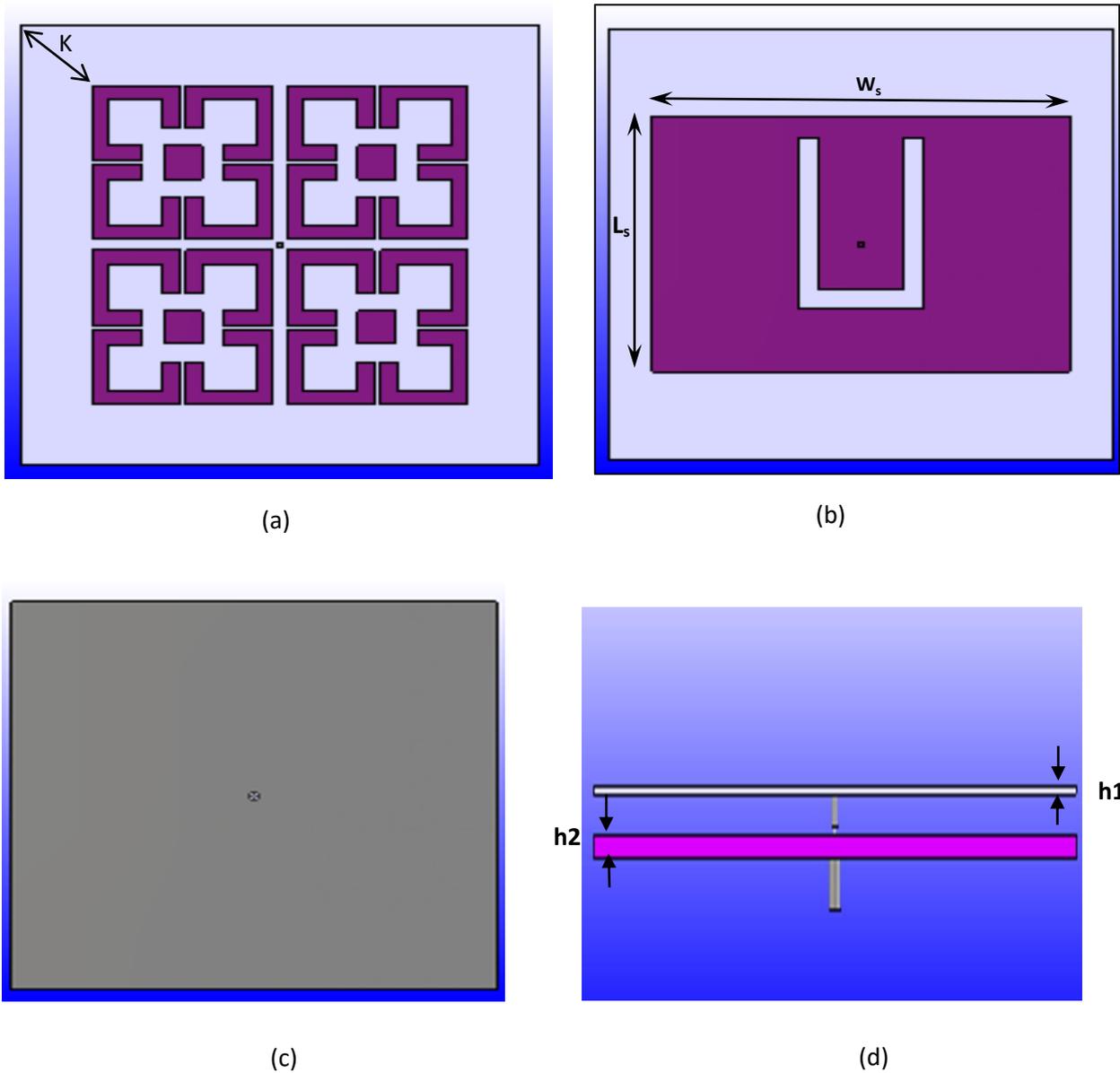


Figure 3.6. Géométrie de l'antenne avec AMC 2x2 : (a) Vue de réseau AMC, (b) Vue de la face d'antenne, (c) Vue d'arrière d'antenne, (d) Vue de côté.

Paramètres	L_g	W_g	L_p	W_p	L_s	W_s	a	b	c	h_1	h_2	h_a	gap
Valeurs (mm)	200	200	118	166	79	50	9	9.5	17.9	1.6	4.8	8	2.5

Tableau 3.4. Dimensions de l'antenne patch RFID avec cellule AMC.

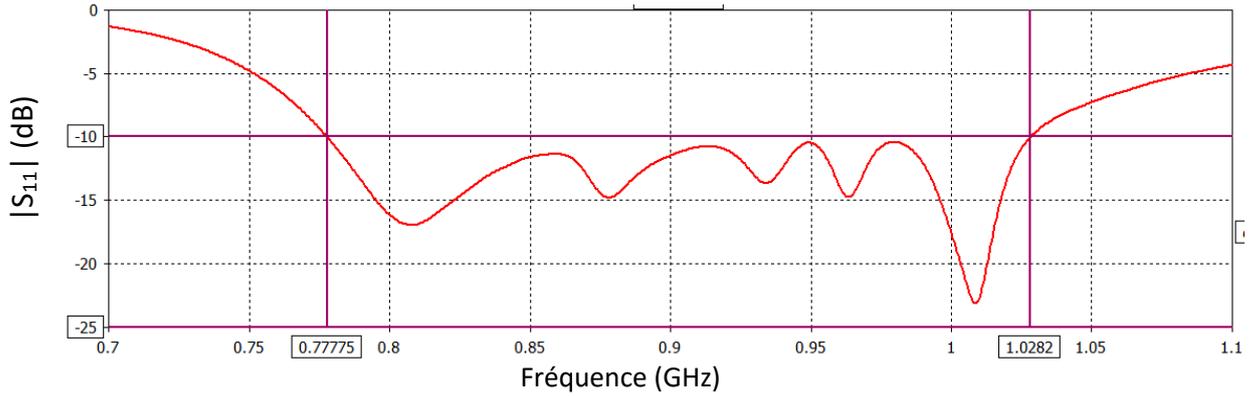


Figure 3.7. Coefficient de réflexion de l'antenne avec AMC.

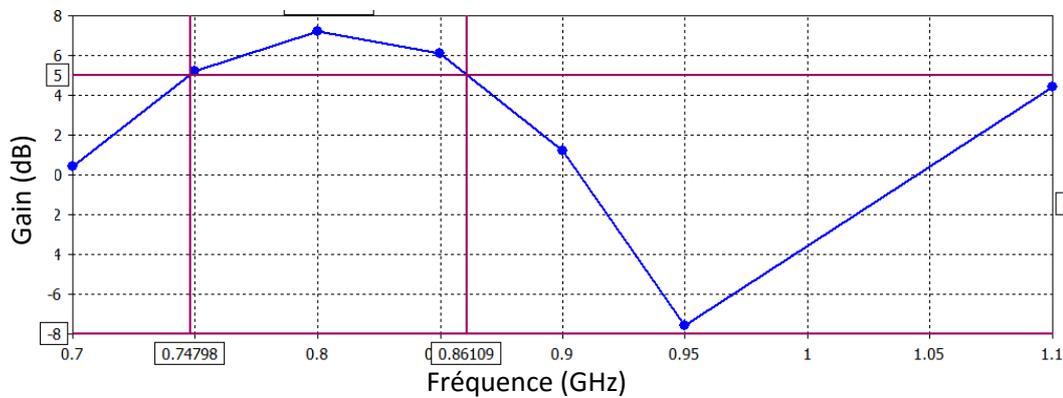


Figure 3.8. Variation de gain en fonction de fréquence.

D'après la figure 3.7, on remarque que le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB dans la bande [777-1028]MHz permettant ainsi la couverture de la totalité de la bande RFID UHF (860-960MHz). D'après la figure 3.8, on constate que le gain est supérieur à 5dB (valeur requise dans le cahier des charges) uniquement dans la bande [747-861]MHz. Par conséquent, les spécifications en termes de gain ne sont pas respectées dans la bande RFID UHF.

En conclusion, l'AMC formé à partir de cette première cellule nous a permis de réduire la couche d'air de 18.8mm impliquant une épaisseur totale de l'antenne de 14.4mm au lieu de 30mm pour le cas sans AMC. Une réduction significative de l'épaisseur totale de 48% est enregistrée. Toutefois, il est à rappeler que le gain de cette structure reste insuffisant (inférieur à 5dB) dans la bande RFID UHF.

***b* Deuxième cellule**

La deuxième cellule considérée est celle illustrée par la figure 3.9. Cette cellule, de dimensions $w_{amc}=87\text{mm}$ et $L_{amc}=41.5\text{mm}$, est imprimée sur un substrat de type FR-4 de permittivité $\epsilon_r=4.3$ avec une épaisseur de 3.2mm. Un AMC formé d'un réseau de 2x2 cellules a été placé entre l'antenne patch rectangulaire avec U-slot et le plan de masse comme le montre la figure 3.10.

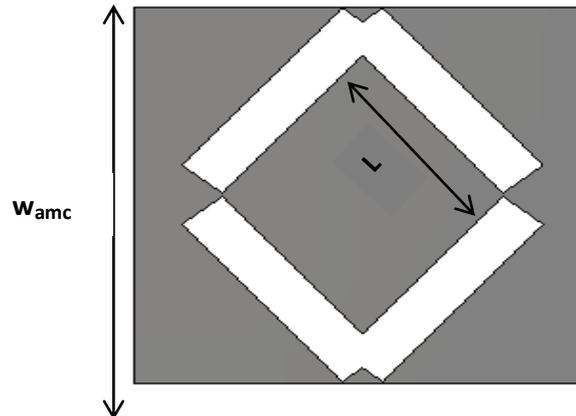


Figure 3.9. Cellule AMC modèle 2.

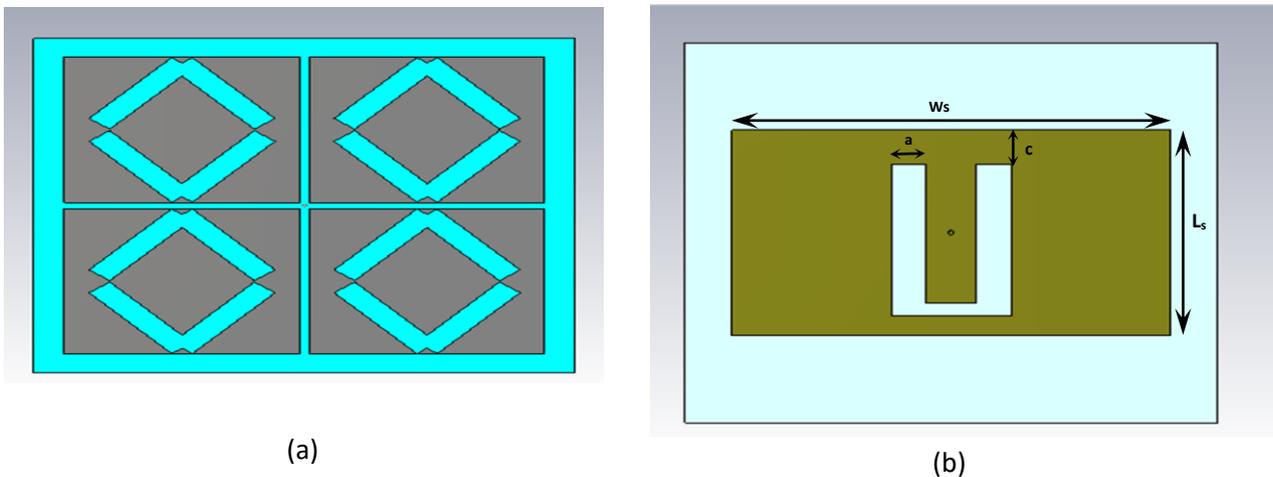


Figure 3.10. Géométrie de l'antenne avec AMC 2x2 : (a)vue de réseau AMC, (b) vue de la face d'antenne.

Les dimensions finales de l'antenne intégrant le réseau de 2x2 cellules sont données dans le tableau 3.5. Le coefficient de réflexion (S_{11}) et gain de cette structure sont présentés respectivement par les figures 3.11 et 3.12.

Paramètres	L_g	W_g	L_p	W_p	L_s	W_s	a	b	c	h_1	h_2	h_a	gap
Valeurs (mm)	200	200	108	164.7	80	45	13	7	17.9	3.2	3.2	8	8.75

Tableau 3.5. Dimensions théoriques de l'antenne patch RFID avec cellule AMC.

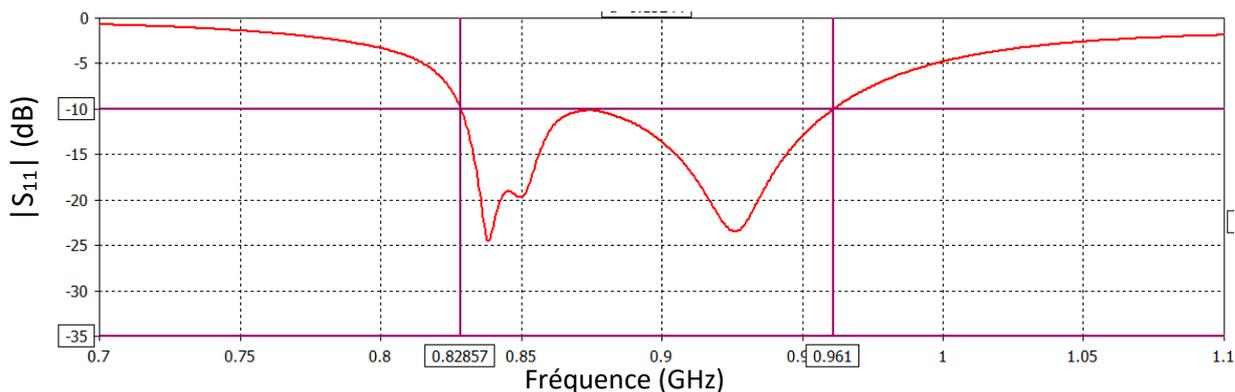


Figure 3.11. Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence.

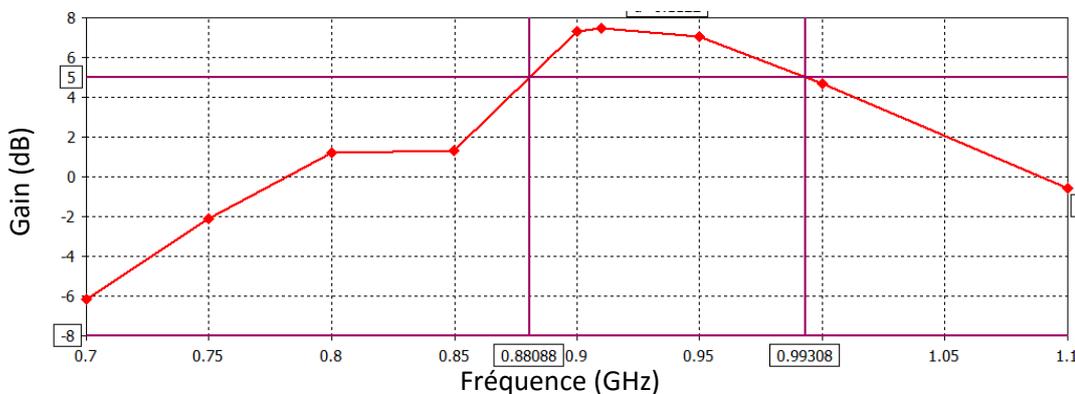


Figure 3.12. Variation de gain en fonction de la fréquence.

D'après la figure 3.11, on remarque que le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB dans la bande [828-961]MHz permettant ainsi la couverture de toute la bande RFID UHF (860-960MHz). D'après la figure 3.12, on constate que le gain est supérieur à 5dB (valeur requise dans le cahier des charges) uniquement dans la bande [830-993]MHz. Par conséquent, les spécifications en termes de gain ne sont pas respectées dans toute la bande RFID UHF.

En conclusion, l'AMC formé à partir de cette deuxième cellule nous a permis de réduire la couche d'air de 18.8mm impliquant une épaisseur totale de l'antenne de 13.4mm au lieu de 30mm

pour le cas sans AMC. Une réduction significative de l'épaisseur totale de 44.6% est enregistrée. Toutefois, il est à rappeler que le gain de cette structure reste insuffisant (inférieur à 5dB) dans la bande RFID UHF. Pour cela nous avons essayé un autre modèle qui est le modèle 3.

c Troisième cellule

La troisième cellule considérée est celle illustrée par la figure 3.13. De dimensions $w_{amc}=90\text{mm}$ et $L_{amc}=95\text{mm}$, est imprimée sur un substrat de type FR-4 de permittivité $\epsilon_r=4.3$ avec une épaisseur de 4.8mm. Un AMC formé d'un réseau de 2x2 cellules a été placé entre l'antenne patch rectangulaire avec U-slot et le plan de masse comme le montre la figure 3.14.

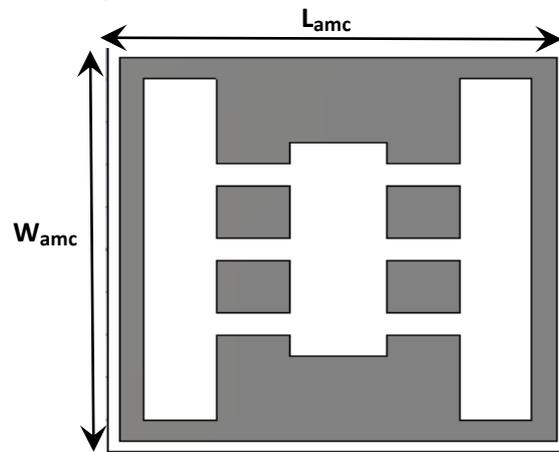


Figure 3.13. Cellule AMC modèle 3.

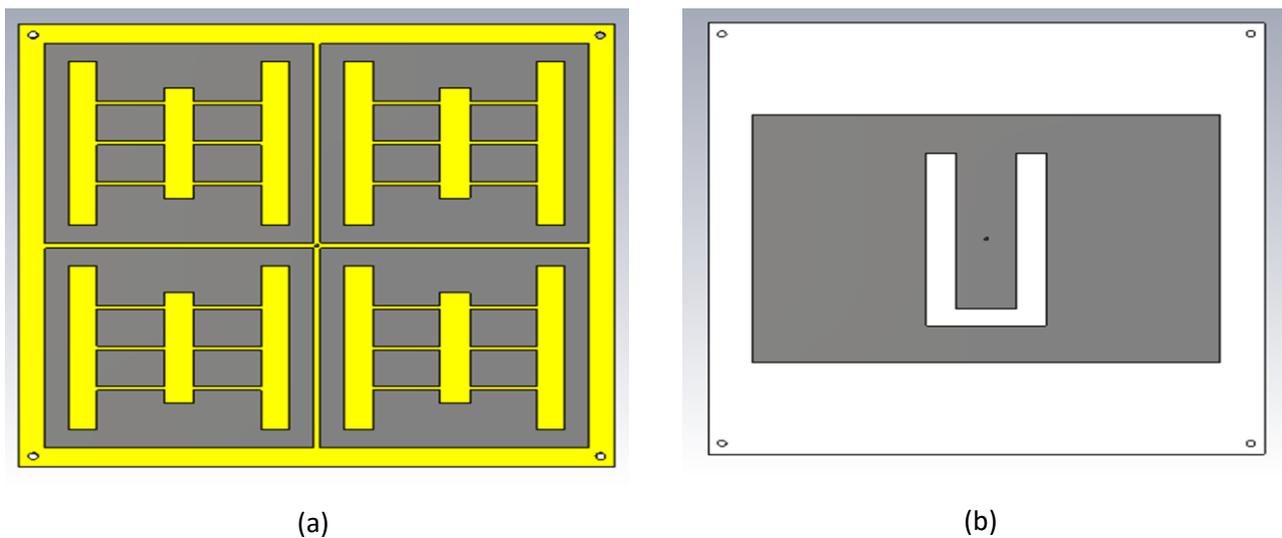


Figure 3.14. Géométrie de l'antenne avec AMC 2x2 : (a)vue de réseau AMC, (b) vue de la face d'antenne.

Les dimensions finales de l'antenne intégrant le réseau de 2X2 cellules sont données dans le tableau 3.6. Le coefficient de réflexion (S_{11}) et gain de cette structure sont présentés respectivement par les figures 3.15 et 3.16.

Paramètres	L_g	W_g	L_p	W_p	L_s	W_s	a	b	c	h_1	h_2	h_a	gap
Valeurs (mm)	200	200	115	164.7	80	43	10.6	7.94	17.9	1.6	4.8	10	2.5

Tableau 3.6. Dimensions théoriques de l'antenne patch RFID avec cellule AMC.

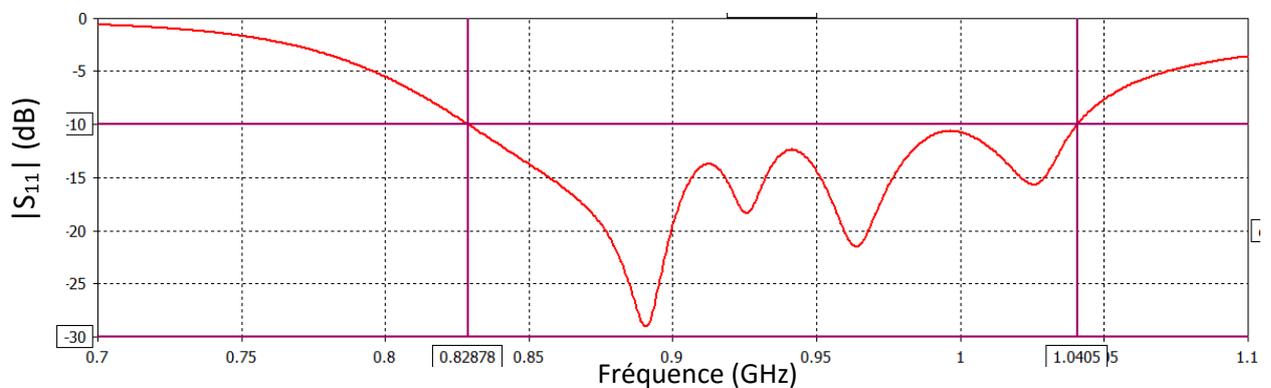


Figure 3.15. Coefficient de réflexion S_{11} en fonction de fréquence.

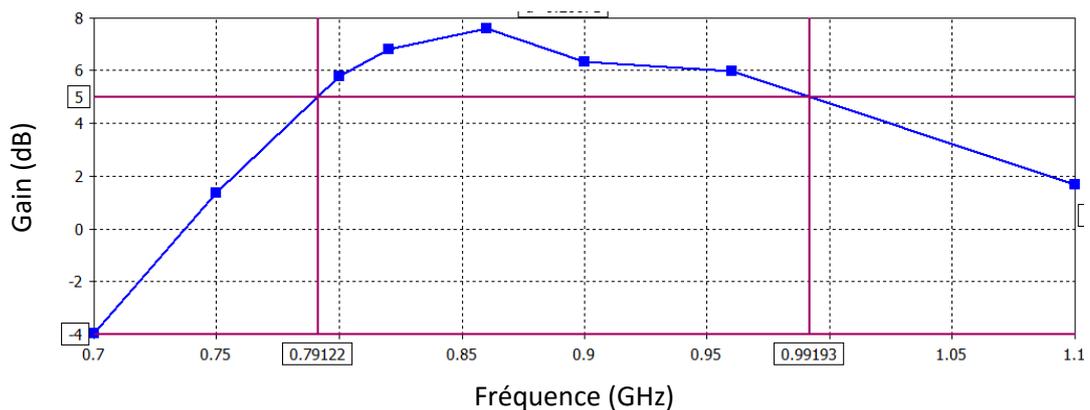


Figure 3.16. Variation de gain en fonction de la fréquence.

D'après la figure 3.15, on remarque que le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB dans la bande [828-1040]MHz permettant ainsi la couverture de toute la bande RFID UHF (860-960MHz). D'après la figure 3.16, on constate que le gain est supérieur à 5dB (valeur requise dans le cahier des

charges) dans la bande [791-991] qui couvre toute la bande RFID UHF (860-960)MHz. Par conséquent, les spécifications en termes de gain sont respectées dans toute la bande RFID UHF.

En conclusion, l'AMC formé à partir de cette troisième cellule nous a permis de réduire la couche d'air de 16.8 mm impliquant une épaisseur totale de l'antenne de 16.4mm au lieu de 30mm pour le cas sans AMC. Une réduction significative de l'épaisseur totale de 54% est enregistrée. En plus de cette réduction importante, l'antenne utilisant l'AMC formé par cette 3ème cellule respect le cahier des charges en termes d'adaptation et de gain.

d Comparaison entre différentes cellules

La figure 3.17 montre une comparaison des coefficients de réflexion de l'antenne patch U-slot intégrant les différents AMC présentés précédemment. Dans cette figure, le coefficient de réflexion de l'antenne sans AMC a été également tracé.

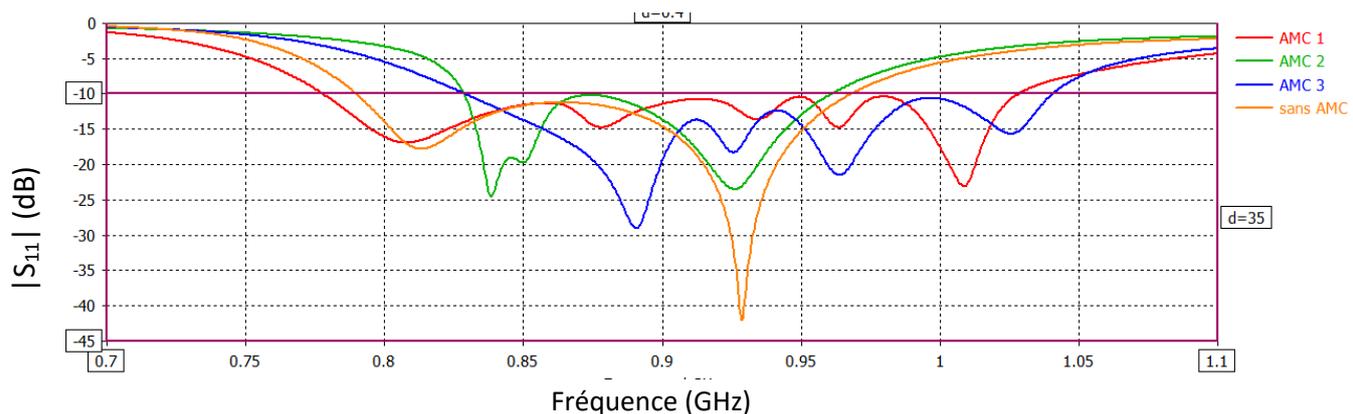


Figure 3.17. Comparaison des S_{11} des différents structures avec et sans AMC.

L'analyse de la figure 3.17 indique que toutes les structures (avec et sans AMC) sont bien adaptées ($S_{11} < -10$ dB) dans la totalité de la bande RFID UHF (860-960 MHz). Cependant, l'antenne intégrant l'AMC formé par la première cellule (noté AMC1) est celle qui possède la plus grande bande passante (777-1028MHz).

La figure 3.18 montre une comparaison des gains de l'antenne patch U-slot intégrant les différents AMC présentés précédemment. Dans cette figure, le gain de l'antenne sans AMC a été également tracé.

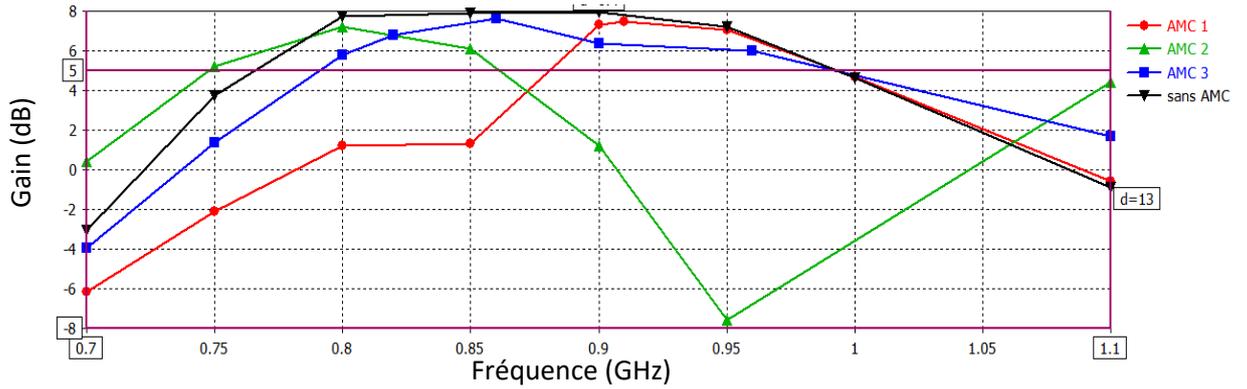


Figure 3.18. Comparaison des gains des différents structures avec et sans AMC.

D'après les résultats de la figure 3.18, on constate que les antennes intégrant les AMC formés par la première et la deuxième cellule (AMC1 et AMC 2) ne remplissent pas les contraintes en termes de gain imposées dans le cahier des charges dans la bande RFID UHF.

En conclusion, l'antenne intégrant l'AMC formé par la troisième cellule (noté AMC3) est la seule structure qui permet de satisfaire le cahier de charge tout en réduisant l'épaisseur de l'antenne initiale (sans AMC) de presque 50 %. Par conséquent, cette structure sera retenue pour la suite de ce travail.

Enfin, l'influence de la couche d'air sur les performances de l'antenne avec AMC (troisième cellule uniquement) sera étudiée et discutée. Cette étude, concernant uniquement les performances en adaptation et en bande passante, est réalisée en variant à chaque fois l'épaisseur (h_a) et en gardant inchangés les autres paramètres. Les résultats de cette étude paramétrique sont illustrés par la figure 3.19.

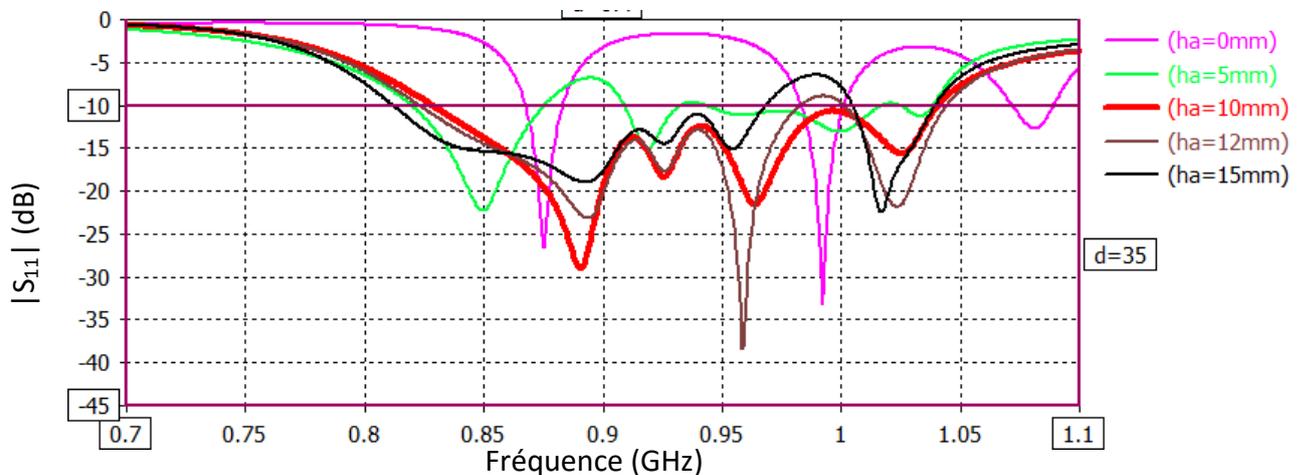


Figure 3.19. Coefficient de réflexion pour différentes valeur de h_a .

D'après la figure 3.19, la valeur de la couche d'air permettant d'avoir les meilleures performances en termes d'adaptation et de bande passante est de 10mm. Cette valeur permet une réduction de presque 50 % de l'épaisseur totale de l'antenne patch avec U-slot.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de réduire l'épaisseur d'une antenne patch avec U-slot destinée pour lecteur RFID UHF. Après la présentation de cette antenne ainsi que ses performances, le cahier des charges à respecter a été donné. Ensuite, trois cellules d'AMC ont été proposées et testées dans le but de diminuer l'épaisseur totale de l'antenne tout en gardant ses performances. La comparaison des résultats de simulation de l'antenne intégrant ces trois types d'AMC a permis d'identifier la cellule permettant un très bon compromis entre épaisseur et performances affichées. La réalisation et la validation expérimentale de cette structure avec AMC seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Réalisation et validation expérimentale

4.1 introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la réalisation ainsi que la validation expérimentale de l'antenne compacte pour lecteur RFID UHF conçue dans le chapitre 3.

Ce chapitre est organisé comme suit. Après la description détaillée des étapes de réalisation d'antenne (génération des masques, soudure et montage de l'antenne en utilisant des supports adaptés), des photographies d'antenne ainsi réalisée seront montrées. Ensuite, la validation expérimentale de l'antenne réalisée s'est faite en mesurant son coefficient de réflexion à l'aide d'un VNA et le confronter aux résultats issues de la simulation électromagnétique. Ce chapitre se termine par une comparaison des performances des antennes patch lecteur RFID avec et sans AMC.

4.2 Réalisation

L'antenne à réaliser est celle présentée dans la figure 3.14 et ses dimensions sont celles données dans le tableau 3.6. Le substrat utilisé pour la réalisation est le FR4 ($\epsilon_r=4.3$, épaisseur=1.6mm). Nous avons utilisés 4 substrats d'épaisseurs 1.6mm, Les masques (typons) à réaliser sont illustrés par la figure 4.1.

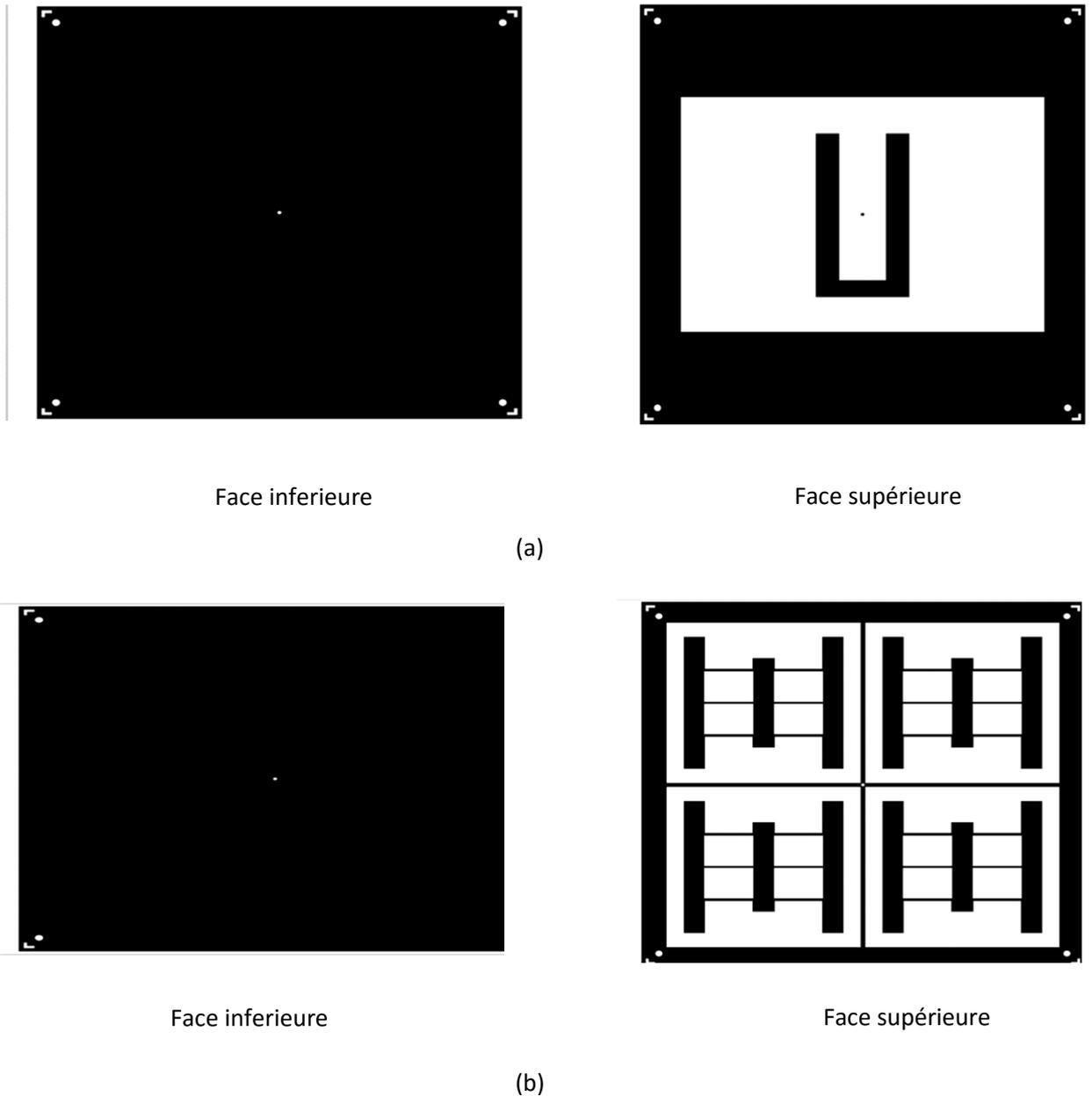


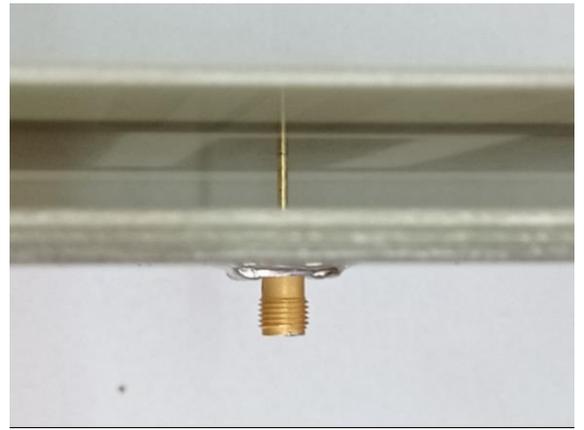
Figure 4.1. Typons de l'antenne patch RFID avec AMC à réaliser : (a) partie antenne, (b) partie AMC.

Après la réalisation des circuits imprimés (faces supérieures et inférieures) par l'entreprise ALMITECH située à Kouba, nous avons procédé au montage de l'antenne avec l'AMC. On a également soudé un connecteur de type SMA spécial dont le diamètre du conducteur central est de 1.3mm (figure 4.2) à l'endroit d'excitation de l'antenne.

Enfin, quatre vis avec écrous en plastique ont été utilisées pour maintenir la distance de la couche d'air (h_a) nécessaire au bon fonctionnement de l'antenne.



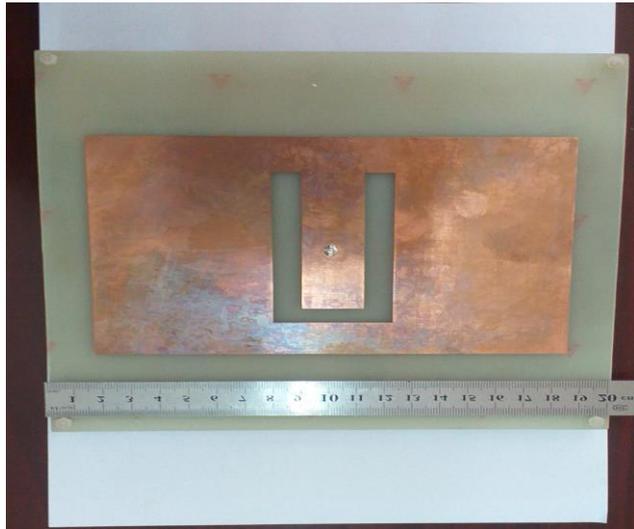
(a)



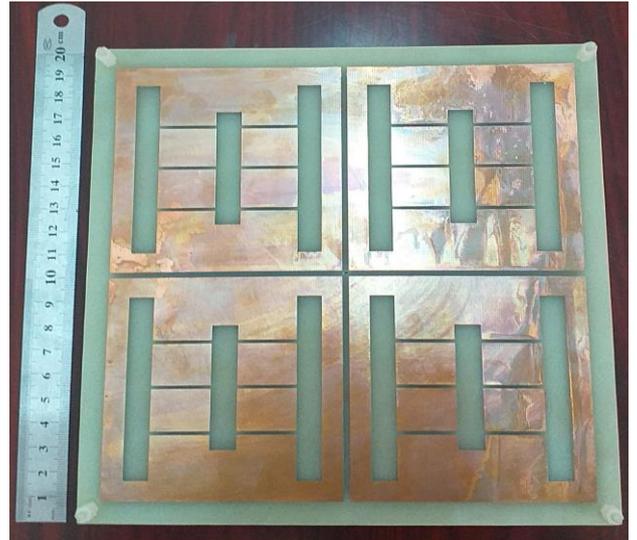
(b)

Figure 4.2. Photographie du connecteur SMA : (a) connecteur SMA, (b) connecteur SMA monté sur antenne.

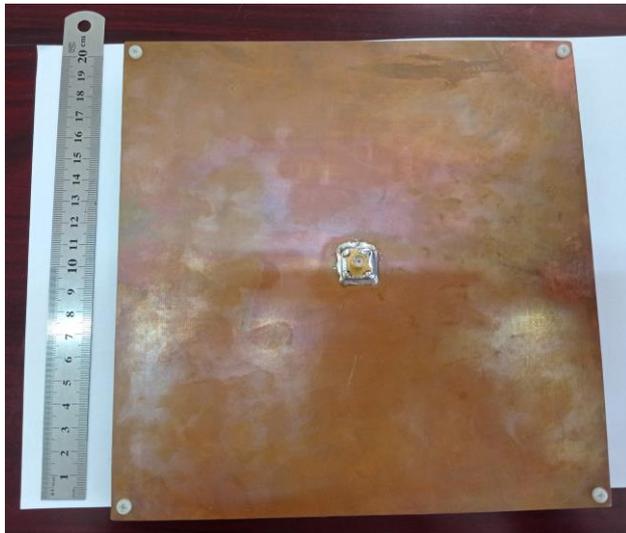
La figure 4.3 représente les photographies de l'antenne patch RFID avec AMC réalisée et montée.



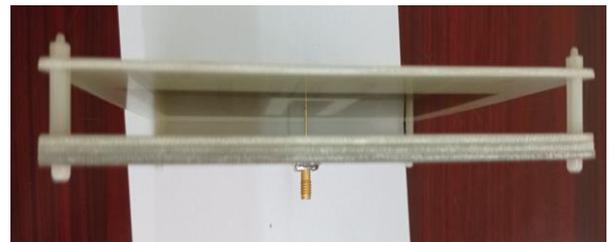
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.3. Photographie de l'antenne patch avec AMC réalisée : (a) Vue de dessus de l'antenne, (b) Vue de dessus de l'AMC avant montage, (c) Vue de dessous (plan de masse), (d) Vue de côté.

4.3 Mesure du coefficient de réflexion

Les mesures du coefficient de réflexion de l'antenne réalisée ont été effectuées en utilisant l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) R&S ZVL disponible au laboratoire DIC (pavillon 16). Ce dispositif à deux ports permet de mesurer les paramètres S dans la bande 9KHz jusqu'à 3 GHz. Après

calibration du VNA dans la bande 0.7GHz à 1.1GHz, l'antenne a été caractérisée en le connectant avec un câble coaxial de type SMA. La configuration de mesure de l'antenne est montrée dans la figure 4.4.

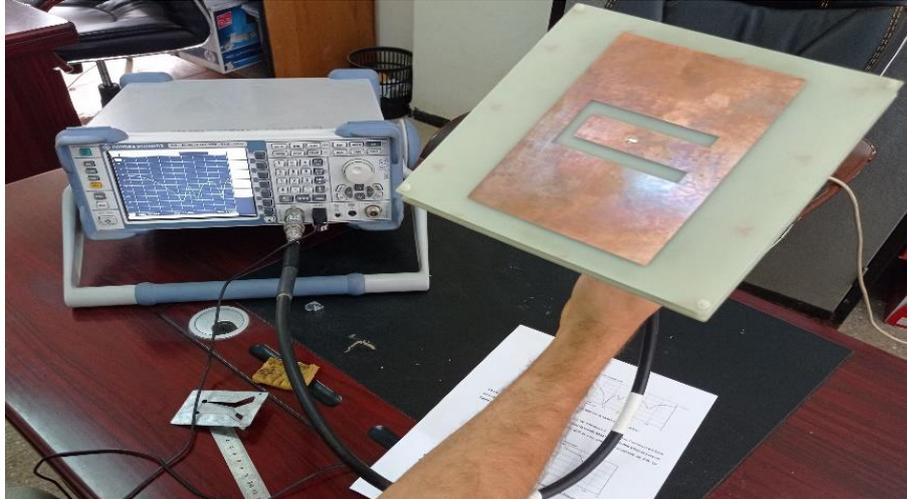


Figure 4.4. Antenne patch RFID avec AMC sous test.

Les résultats de mesure du coefficient de réflexion obtenus sont illustrés par la figure 4.5.

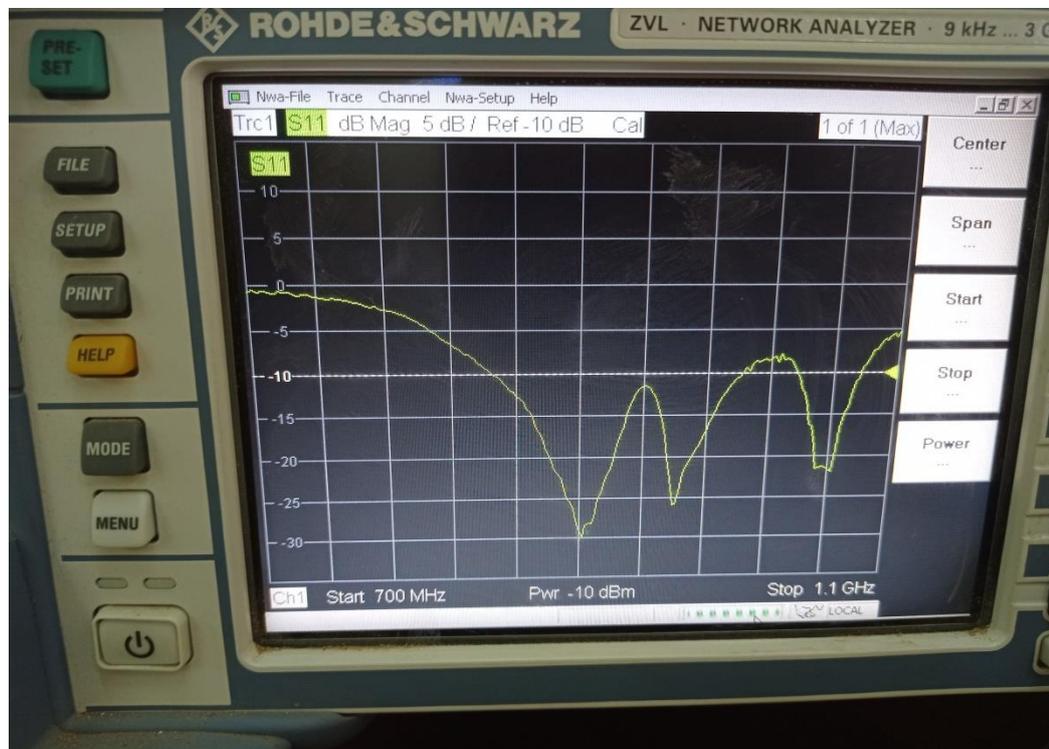


Figure 4.5. Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne patch RFID UHF avec AMC.

4.4 Comparaisons des résultats

Après avoir exporté les résultats de l'analyseur sous format de fichier « .DAT » vers MATLAB, nous les avons confrontés avec les résultats de simulation électromagnétique (CST). La comparaison entre les coefficients de réflexion mesuré et simulé de l'antenne patch RFID avec AMC est donnée par la figure 4.6.

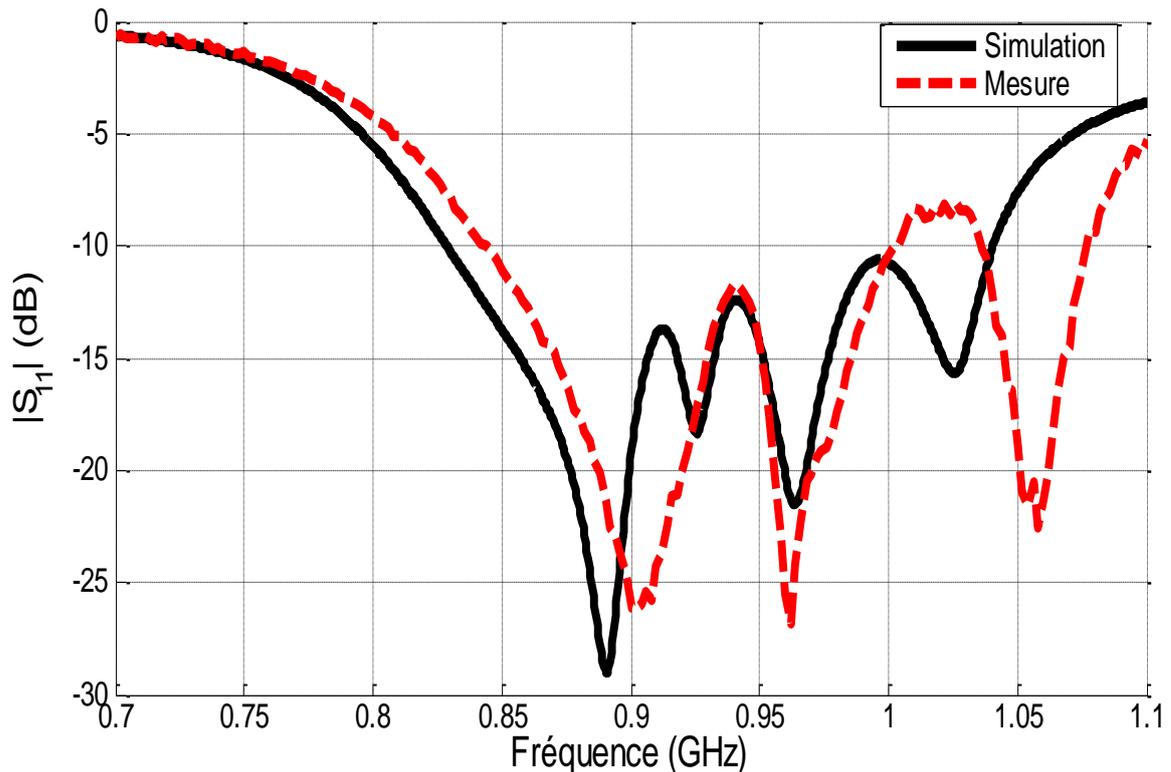


Figure 4.6. Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne patch RFID UHF avec AMC.

A partir de la figure 4.6, on constate un bon accord entre mesure et simulation. Toutefois, il est à noter un très léger décalage fréquentiel (de l'ordre de 16MHz) de la bande mesurée vers les fréquences supérieures. Par ailleurs, on constate une légère désadaptation entre 1 et 1.035GHz mais cette dernière n'est pas gênante car on est à l'extérieur de la bande RFID UHF (860-960MHz). Les bandes passantes simulées et mesurées sont presque les mêmes et sont respectivement égales à [828-1040]MHz et [846-1075]MHz. Ces différents écarts entre simulation et mesure peuvent être attribués aux défauts de fabrication et/ou aux incertitudes de mesure. Malgré ces écarts, le résultat

obtenu en mesure pour l'antenne respecte bien les spécifications fixées dans notre cahier des charges.

Le tableau 4.1 présente la comparaison entre les antennes RFID UHF avec et sans AMC. Les paramètres considérés sont : les bandes passantes mesurées, le gain et l'épaisseur de chaque antenne.

Antenne	RFID UHF sans AMC [5]		RFID UHF avec AMC	
	Totale	Couche d'air	Totale	Couche d'air
Épaisseur (mm)	30	26.8	16.4	10
BW mesurée (MHz)	[792-974]		[846-1075]	
Gain simulé (dB)	8		7	

Tableau 4.1. Comparaison des antennes avec et sans AMC.

D'après le tableau 4.1, on peut noter que pour des performances en termes de bande passante et de gains assez similaires, l'antenne intégrant l'AMC présente une épaisseur totale réduite de presque 50%. Les deux antennes (avec et sans AMC) satisfont le cahier des charges initialement défini.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la validation expérimentale de l'antenne lecteur RFID avec AMC dimensionnée auparavant dans le chapitre 3. Afin d'y parvenir, nous avons tout d'abord réalisé et monté le prototype d'antenne en décrivant les différentes étapes nécessaires. Ensuite, nous avons validé expérimentalement ce prototype à l'aide d'un analyseur VNA en mesurant le coefficient de réflexion ainsi que la bande passante. Enfin, des comparaisons ont été effectuées afin d'illustrer l'apport des AMC dans la réduction de l'épaisseur de l'antenne.

Conclusion générale

L'identification par radio fréquences (RFID) trouve de plus en plus d'applications de la vie courante. Dans ce travail de projet de fin d'études, nous avons tenté de réduire l'épaisseur d'une antenne patch pour lecteur RFID UHF en utilisant les métamatériaux.

Après la présentation de généralités sur les antennes et la technologie RFID, nous avons mis l'accent sur les antennes imprimées et exposé les différentes techniques permettant de les miniaturiser. Ensuite, les systèmes RFID ont été introduits en détaillant leur principe de fonctionnement et leurs constituants.

Nous avons aussi mis l'accent sur les métamatériaux, leur historique et leurs différents types. Une attention particulière a été attribuée aux conducteurs magnétiques artificiels (AMC) en donnant leurs propriétés et applications. L'utilisation des AMC dans le domaine des antennes a été également adressée.

L'étape de conception d'antenne RFID UHF avec AMC a débuté par la présentation d'une antenne issue d'un travail de projet de fin d'études précédant et la définition du cahier des charges de travail. Plusieurs types d'AMC ont été ensuite intégrés sur cette antenne dans le but de réduire son épaisseur totale. Une structure intéressante permettant une réduction d'épaisseur de presque 50 % tout en respectant le cahier des charges a été identifiée. Enfin, cette antenne a été fabriquée et validée expérimentalement à l'aide d'un analyseur de réseau.

Bibliographie

- [1] C.A. BALANIS: «Antenna Theory Analysis And Design», John Wiley & sons, Fourth Edition, Canada, 2016.
- [2] S. HEBIB, « Antennes », cours, Université SAAD DAHLED BLIDA, 2017.
- [3] O. PICON et COLL : «Les antennes Théorie, conception et application», Préface de Maurice Bellanger.
- [4] A. Boyer, « Antennes », Support de Cours Enonce De Travaux Diriges, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 5 ème Année Réseau et Télécom, octobre 2011.
- [5] S.ZERFA et K.BOUMAAZA : «Conception, simulation et réalisation d'antennes pour lecteur RFID UHF», Mémoire de fin d'étude de master, Université SAAD DAHLAB, BLIDA, 2017/2018.
- [6] POISEL ET A.RICHARD: «Antenna Systems and Electronic Warefare Applications», London, 2012.
- [7] C.LUXEY et R. S. G. K. A. P : « Antennes imprimées- Bases et principes », E3310, Technique de l'Ingénieur, Mai 2007.
- [8] S. EL KADRI, « Contribution à l'étude d'antennes miniatures reconfigurables en fréquence par association d'éléments actifs», thèse de doctorat, Université de GRENOBLE, 2011.
- [9] N. KRISTOU, «Étude et conception de métamatériaux accordables pour la miniaturisation d'antennes aux fréquences micro-ondes», thèse doctorat, Université RENNES 1, FRANCE, 2018.
- [10] A. COELHO DE SOUZA : « Conception d'antennes et méthode de caractérisation des systèmes RFID UHF en champ proche et en champ lointain », thèse de doctorat, université Grenoble Alpes, FRANCE, 07 octobre 2015.
- [11] URL : <https://www.atlasrfidstore.com/rfid-antennas>, date d'accès 22 mai 2022 à 22:25.
- [12] A. ZAHZAH et O. HABLAL, «Conception et simulation d'une antenne à surface haute impédance pour le système GPS», Mémoire de fin d'étude, Université SAAD DAHLAB, BLIDA, 2016/2017.
- [13] A. OLIVIER, «*Copper vs. iron: Microwave magnetism in the metamaterial age*», Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 321, no 14, p. 2093-2101, 2009.
- [14] N. ENGHETA, & R.W ZIOLKOWSKI, Eds. «*Metamaterials: physics and engineering explorations*». John Wiley & Sons, 2006.
- [15] S. LUDOVIC, «Antennes à très large bande passante et de très faible épaisseur-Application à l'intégration d'antennes dans des structures de porteurs dans la bande 100Mhz-1Ghz», Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure des Télécommunications, PARIS, 2006.
- [16] R. CHIKHI, «Conception d'une antenne directive large bande pour des applications aérospatiales », Mémoire de fin d'étude, Université SAAD DAHLAB, BLIDA, 2019/2020.

- [17] S. SARKAR et B. GUPTA, «Une antenne polarisée circulairement à double bande avec un réflecteur AMC à double bande pour les lecteurs RFID», IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). IEEE, 2021.
- [18] H. ELZUWAWI, M. TAHSEEN, G. ELZUWAWI, T. DENIDNI, «A new RFID monopole antenna using a compact AMC structure», Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Montreal, Quebec, Canada, Article 2018.
- [19] M. HICHO, E. Antonino Daviu, M. Cabedo-Fabrés, «A Novel Low-Profile High-Gain UHF Antenna Using High-Impedance Surfaces», IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Article 2015.
- [20] M. LAOUISSAT, «Conception des antennes en bande L à base de métamatériaux», Magister, Université ZIANE ACHOUR, DJELFA, 2014.

La méthode utilisée pour la simulation de cellule sur CST

Pour dimensionner l'AMC, il faut définir les conditions aux limites appropriées pour introduire un mode TEM (onde plane) dont le trièdre direct est formé par les champs E et H. Un seul élément de la structure infinie est considéré. L'orthogonalité des champs est obtenue des conditions aux limites électriques selon un axe de part et d'autre de la cellule et des conditions aux limites magnétiques selon l'axe perpendiculaire. La phase du coefficient de réflexion de la structure est alors déterminée uniquement pour une incidence normale. Le logiciel CST permet de préciser ces conditions aux limites comme le montre la figure A1.1.

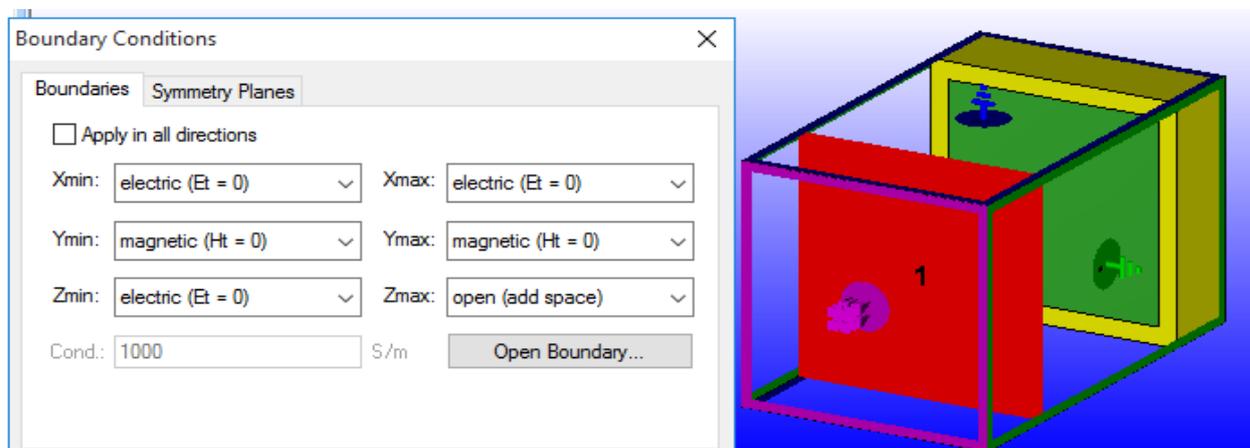


Figure A1.1. Conditions aux limites de la structure AMC.

X_{min} et X_{max} : $E_t = 0$ pour avoir le champ électrique horizontal.

Y_{min} et Y_{max} : $H_t = 0$ pour avoir le champ magnétique vertical.

Une fois, les conditions aux limites établies, la structure est placée à une distance assez éloignée de la source pour être dans la zone du champ lointain :

$D \geq \frac{2 \times a^2}{\lambda}$: Pour considérer comme un champ lointain

- **D** : distance par rapport à la cellule en m.
- **a** : la plus grande dimension de l'antenne exprimée en m.
- **λ** : longueur d'onde.