

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 : Systèmes des Télécommunications

Présenté par

Kichah Nour Elhouda

&

Katir Hanane

Conception et amélioration des performances d'une antenne bi-bande en utilisant les AMC

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

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de notre promoteur Pr. HEBIB Sami et notre Co-promotrice Melle. CHENAOUI Safia, on les remercie pour la qualité de ses encadrements exceptionnels, pour ses patiences, ses rigueurs et ses disponibilités durant notre préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté en acceptant d'examiner notre travail.

Nous désirons aussi remercier tout le cadre enseignant de l'université SAAB DAHLAB Blida 1, qui ont fourni les outils nécessaires à la réussite de notre études universitaires.

Finalement nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis et à tous ceux qui participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, aux personnes qui, malgré que leurs noms ne figurent pas dans ce document, qui nous ont toujours soutenu et encouragés au cours de la préparation de ce travail.

Dédicaces

A celle qui aime sans compter, elle a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation et de ses dévouements

A ma chère mère

A l'homme qui sacrifie pour m'assurer les bonnes conditions, l'univers à sa plénitude n'est jamais comparable à la capacité du son cœur

A mon père

A mon partenaire de vie, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études

A mon cher mari

A ma petite fille et mon ange, sache que je te remercie pour cet amour infini qui a introduit dans ma vie du sens, du bonheur et d'espoir

A ma petite famille qui m'a toujours soutenue

A tous mes collègues, mes proches et amis

Je dédie ce modeste travail du profond de mon cœur

KICHAH Nour Elhouda

Dédicaces

*A ma chère et tendre mère, qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce
jour*

*A mon cher père, pour tous les efforts et le incessant qui m'a toujours
apporté*

*A mes deux sœurs « Khadidja et Fadoua » et mon frère « Aymen » et toute
ma famille*

*A mes meilleurs amis « Meriem et Ibtissem » qui sont été toujours là pour
moi pour m'encouragé et me soutenir*

A tous mes enseignants et mes collègues

Je dédie ce modeste travail du profond de mon cœur

KATIR Hanane

الملخص: أحد تطبيقات المواد الخارقة هو AMC (الموصلات المغناطيسية الاصطناعية). هذا الأخير له خصائص كهرومغناطيسية مثيرة للاهتمام للتطبيقات اللاسلكية. إنها تجعل من الممكن ، من بين أمور أخرى ، تحسين أداء الهوائيات المطبوعة عن طريق قمع انتشار الموجات السطحية. الهدف من هذا المشروع هو تحسين أداء الإشعاع والتكيف لهوائي مطبوع مزدوج النطاق. تم تصميم هذا الأخير لأول مرة ومحاكته وتحسينه باستخدام برنامج CST Microwave Studio Suite. بعد ذلك ، تم تحديد مجموعة واحدة 3×7 AMC ودمجها في الهوائي المصمم مسبقًا. تُظهر بنية الهوائي المكونة على هذا النحو (الهوائي + AMC) تحسُّنًا في الكسب والتكيف مقارنةً بالهوائي وحده.

الكلمات المفتاحية: المواد الخارقة ؛ AMC. هوائي مطبوع النطاق المزدوج؛ CST

Résumé : L'une des applications des métamatériaux sont les AMC (conducteurs magnétiques artificiels). Ces derniers possèdent des propriétés électromagnétiques très intéressantes pour les applications sans fil. Ils permettent, entre autres, d'améliorer les performances des antennes imprimées en supprimant la propagation des ondes de surface. L'objectif de ce projet consiste en l'amélioration des performances en rayonnement et d'adaptation d'une antenne imprimée bi-bande. Cette dernière a été tout d'abord conçue, simulée et optimisée avec le logiciel CST Microwave Studio Suite. Ensuite, un réseau AMC 7×3 prometteur a été identifié et intégré à l'antenne précédemment conçue. La structure antennaire ainsi composée (antenne + AMC) affiche une amélioration du gain et de l'adaptation par rapport à l'antenne seule.

Mots clés : métamatériaux; AMC ; antenne imprimée ; bi-bande ; CST

Abstract: One of the applications of metamaterials are AMC (artificial magnetic conductors). The latter have very interesting electromagnetic properties for wireless applications. They make it possible, among other things, to improve the performance of patch antennas by suppressing the propagation of surface waves. The objective of this project is to improve the radiation and matching performance of a dual-band patch antenna. The latter was first designed, simulated and optimized with the CST Microwave Studio Suite software. Then, a promising 3×7 AMC array was identified and integrated into the previously designed antenna. The antenna structure thus composed (antenna + AMC) displays an improvement in gain and matching compared to the antenna alone.

Keywords: metamaterials; AMC; patch antenna; dual band; CST

Liste des acronymes et abréviations

2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional
AMC	Artificial Magnetic Conductor
BW	BandWidthch
CST	Computer Simulation Technology
dB	Decibel
dBd	Decibel relative to the dipole
dBi	Decibel relative to an isotropic antenna
DCS	Distribute Control System
DVB-T	Digital Video broadcasting-Terrestrial
EBG	Electromagnetic Band Gap
EHF	Extremely High Frequency
EM	Electromagnetic
FIT	Finite Integration Technique
FR-4	Flame Resistant 4
GPS	Global Positioning system
GSM	Global System for mobile communication
HF	High Frequency
HIS	High Impedance Surfaces
IEEE	Institute of Electricals and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LTE	Long Term Evolution
MF	Modulation of frequency
MMIC	Monolithic Micowave Integrated Circuit

PEC Perfect Electric Conductor

PMC Perfect Magnetic Conductor

PIFA Planar Inverted F-Antenna

PDA Personal Digital Assistant

RF Radio Frequency

RFID Radio Frequency Identification

SHF Super High Frequency

SMA Sub Miniature version A

SRR Split Ring Resonator

TEM Transverse Electric and Magnetic

TSF Taylor Spatial Frame

UHF Ultra High Frequency

UMTS Universal mobile Telecommunication System

ITU-R International Union of Telecommunications Radiocommunication

VHF Very High Frequency

WLAN Wireless Local Area Network

WIFI Wireless Fidelity

WPT Word Poker Tour

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralités sur les antennes	3
1.1 Introduction	3
1.2 Antennes : définition, historique et applications	3
1.2.1 Définition d'antenne	3
1.2.2 Historique	4
1.2.2 Applications	6
1.3 Caractéristiques principales d'une antenne	7
1.3.1 Diagramme de rayonnement	7
1.3.2 Directivité	8
1.3.3 Le gain	8
1.3.4 Efficacité (Rendement)	9
1.3.5 Polarisation	10
1.3.6 Impédance d'entrée	10
1.3.7 Coefficient de réflexion et adaptation	11
1.3.8 Bande Passante	12
1.4 Antennes imprimées	13
1.4.1 Structure d'une antenne imprimée	13
1.4.2 Les différentes formes d'une antenne imprimée	14
1.4.3 Techniques d'alimentation	14
1.4.3.1 Alimentation par contact	15
1.4.3.2 Alimentation par proximité	16
1.4.4 Avantages et inconvénients des antennes patch	18
1.5 Techniques d'obtention des antennes multi-bandes	18
1.5.1 Combinaison de plusieurs éléments rayonnants	19
1.5.2 Créations des fentes dans l'élément rayonnant	21
1.5.3 La technique fractale	22
1.6 Conclusion	23
Chapitre 2 Généralités sur les AMC	24
2.1 Introduction	24
2.2 Définition	24
2.3 Structure d'AMC	25

2.4	Principe, historique et applications des AMC	26
2.4.1	Principe des AMC	26
2.4.2	Historique	27
2.4.3	Applications	28
2.5	Paramètre d'AMC	29
2.6	Types D'AMC	31
2.7	Etat de l'art sur les AMC multi-bandes	32
2.7.1	Intérêt des AMC	32
2.7.2	Exemples d'applications des AMC	34
2.8	Conclusion	35
Chapitre 3 Conception et amélioration des performances d'une antenne bi-bande		36
3.1	Introduction	36
3.2	Cahier des charges et logiciel de simulation	37
3.3	Antenne patch rectangulaire bi-bande	37
3.3.1	Coefficient de réflexion	38
3.3.2	Gain	39
3.3.3	Diagrammes de rayonnement	40
3.4	Antenne bi-bande avec réseau AMC	43
3.4.1	Cellules AMC	43
3.4.1.1	Cellule AMC 1	43
3.4.1.2	Cellule AMC 2	45
3.4.2	Réseau AMC	46
3.4.3	Intégration du réseau AMC avec l'antenne bi-bande	47
3.4.4	Etude paramétrique de l'antenne bi bande avec le réseau AMC	49
3.4.4.1	La largeur du plan de masse de l'antenne (Lg)	49
3.4.4.2	Le nombre de cellules	51
3.4.4.1	La couche d'air (ha)	52
3.4.5	Validation de la structure (antenne + réseau AMC)	53
3.4.5.1	Coefficient de réflexion	54
3.4.5.2	Le gain	55
3.4.5.3	Diagrammes de rayonnement	56
3.4.6	Conclusion	59
Conclusion générale		60
Annexe		61
Bibliographie		64

Liste des figures

Figure 1. 1. Chaîne de transmission d'une OEM [2].	3
Figure 1. 2. Représentation d'une antenne d'émission et de réception [3].	4
Figure 1. 3. Historique des radiocommunications [4].	5
Figure 1. 4. Occupation du spectre radiofréquence [4].	6
Figure 1. 5. Représentation du diagramme de rayonnement : (a) vue 3D, (b) vue 2D (repère polaire), (c) vue 2D (repère cartésien) [4].	7
Figure 1. 6. Polarisation de l'onde électromagnétique [7].	10
Figure 1. 7. Représentation de l'impédance de l'antenne [9].	11
Figure 1. 8. Illustration de la bande passante à -10 dB à partir du coefficient de réflexion [9].	12
Figure 1. 9. Exemple d'antennes patch [4].	13
Figure 1. 10. Structure d'une antenne patch rectangulaire [4].	13
Figure 1. 11. Les différentes formes d'antenne patch. [10].	14
Figure 1. 12. Alimentation par ligne micro-ruban [12].	15
Figure 1. 13. Alimentation par sonde coaxiale [12].	15
Figure 1. 14. Alimentation par fente [12].	16
Figure 1. 15. Alimentation par couplage de proximité [12].	17
Figure 1. 16. Association des PIF As DCS et UMTS sur le même plan de masse avec leurs languettes de court-circuit [19].	19
Figure 1. 17. Association de deux antennes différentes, PIFA pour UMTS et l'antenne IFA pour WLAN [19].	19
Figure 1. 18. Antenne PIFA avec fente [21].	21
Figure 1. 19. Différents types d'antennes fractales [18].	22
Figure 2. 1. La combinaison des ondes : (a) selon un conducteur électrique parfait (b) selon un conducteur magnétique artificiel [22].	25
Figure 2. 2. Géométrie d'une cellule AMC [23].	26
Figure 2. 3. La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule AMC [27].	27
Figure 2. 4. Cellules AMC [26].	29
Figure 2. 5. Circuit équivalent LC [32].	29
Figure 2. 6. Types d'AMC [26].	31
Figure 2. 7. Cellule unitaire AMC [26].	31
Figure 3. 1. Antenne patch proposée : (a) Vue de dessus (b) Vue de dessous (c) Vue perspective (d) Vue de coté	38
Figure 3. 2. Coefficient de réflexion simulé de l'antenne patch bi-bande.	39
Figure 3. 3. Variation du gain de l'antenne bi-bande en fonction de la fréquence.	39
Figure 3. 4. Diagrammes de rayonnement en 3D aux fréquences : (a) $f_{01} = 3.08\text{GHz}$ (b) $f_{02} = 6.18\text{GHz}$.	40
Figure 3. 5. Diagramme de rayonnement 2D polaire à $f_{01} = 3.08\text{GHz}$ pour (a) $\Phi = 0^\circ$ et (b) $\Phi = 90^\circ$.	41
Figure 3. 6. Diagramme de rayonnement 2D polaire à $f_{02} = 6.18\text{GHz}$: (a) $\Phi = 0^\circ$ (b) $\Phi = 90^\circ$.	42
Figure 3. 7. Cellule AMC 1 : (a) Structure (b) Modèle de simulation	43
Figure 3. 8. Phase du coefficient de réflexion de la cellule AMC 1	44
Figure 3. 9. Cellule AMC 2 : (a) Structure (b) Modèle de simulation	45
Figure 3. 10. Les phases du coefficient de réflexion de la cellule AMC 2	46
Figure 3. 11. Réseau AMC bi bande 3x3 à base de (a) cellule AMC 1 (b) cellule AMC 2.	46
Figure 3. 12. Géométrie de la structure (antenne + réseau AMC).	47
Figure 3. 13. Comparaison entre les structures AMC 1 et AMC 2 : (a) Coefficient de réflexion (b) Gain	48
Figure 3. 14. Influence de la valeur de L_g sur les coefficients de réflexion	49

Figure 3. 15. Influence de la valeur de Lg sur le gain.....	50
Figure 3. 16. Influence de nombre de cellules sur les coefficient de réflexion	51
Figure 3. 17. Influence de nombre de cellules sur le gain.....	51
Figure 3. 18. Effet de variation de nombre de cellules sur le coefficient de réflexion.....	52
Figure 3. 19. Effet de variation de nombre de cellules sur le gain.....	52
Figure 3. 20. Structure (antenne + réseau AMC 7x3) (a) vue de dessous (b) vue perspective.....	53
Figure 3. 21. Coefficient de réflexion du système (antenne + AMC)	54
Figure 3. 22. Gain du système (antenne + AMC)	55
Figure 3. 23. Diagramme de rayonnement en 3D au fréquences de résonance : (a) $f_{01} = 3.49\text{GHz}$ (b) $f_{02} = 6.095\text{ GHz}$	56
Figure 3. 24. Diagramme de rayonnement polaire à $f_{01} = 3.49\text{GHz}$ (a) $\phi = 90^\circ$ (b) $\phi = 0^\circ$	57
Figure 3. 25. Diagramme de rayonnement polaire à $f_{02} = 6.095\text{ GHz}$ (a) $\phi = 0^\circ$ (b) $\phi = 90^\circ$	58
Figure A. 1. L'interface principale de CST MICROWAVE Studio.	62
Figure A. 2. Conditions aux limites de la structure AMC.....	63

Liste des tableaux

Tableau 1. 1. Avantages et inconvénients des antennes imprimées [16].	18
Tableau 1. 2. Points forts et faibles de la combinaison de plusieurs éléments rayonnants [18].	20
Tableau 1. 3. Points forts et faibles des antennes fractales [18].	23
Tableau 2. 1. Les différents motifs AMC et leurs objectifs	35
Tableau 3. 1. Cahier des charges de travail	37
Tableau 3. 2. Dimensions de l'antenne proposée	38
Tableau 3. 3. Gain aux bandes de fréquences	40
Tableau 3. 4. Dimensions de la cellule AMC 1	44
Tableau 3. 5 Dimensions de la cellule AMC 2	45
Tableau 3. 6 . Dimension de la structure (antenne + réseau AMC) final	53
Tableau 3. 7. Niveaux de coefficient de réflexion aux fréquences de resonanceGain aux bandes de	54
Tableau 3. 8. Gain aux bandes de fréquences du système	55
Tableau 3. 9. Comparaison des résultats du gain de l'antenne bi bande sans AMC avec les trois structure (antenne + AMC)	56

Introduction générale

La multiplicité des standards de communication (GSM, GPS, Wifi, LTE, DVB-T...) amène un nombre d'antennes croissant sur des objets comme les véhicules automobiles, les avions, les trains, pour ne citer que des moyens de transports. Cependant, dans ce type de dispositif, bien que l'objet soit important, la place est réduite pour intégrer toutes les fonctionnalités électroniques et engendre un besoin en miniaturisation des antennes.

Une antenne est souvent placée devant ou à proximité d'un plan réflecteur métallique. En fonction du type de rayonnement souhaité, ces plans métalliques peuvent jouer le rôle de simple grand plan de masse (exemple d'antenne de type mono-polaire sur un toit de voiture ou sur une carlingue d'avion) ou d'un plan réflecteur afin d'avoir un rayonnement directionnel. Le plan métallique permettant alors l'intégration d'un circuit électronique en minimisant les interférences possibles. Le rayonnement peut ainsi être dirigé dans une direction d'intérêt, permettant d'une part d'améliorer le gain de l'antenne et d'autre part de réduire la sensibilité de l'antenne à son contexte, dans un demi-espace.

L'objectif de notre projet de fin d'étude consiste d'une part d'étudier, concevoir, et simuler une antenne patch rectangulaire de deux bandes de fréquences de résonance et d'autre part d'améliorer les performances de cette structure en utilisant des conducteurs artificiels magnétiques (AMC) bi bandes. Notre mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une description des antennes, ces applications et ces caractéristique principale. Ainsi que les techniques d'obtention de d'alimentation d'une antenne imprimée et ces différentes formes.

Le deuxième chapitre est consacré à une description des AMC, leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques ainsi et ses applications dans le domaine des antennes.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et simulation d'une antenne bi-bande. Ensuite, il aborde, dans un second temps, l'amélioration de ses performances en intégrant un réseau AMC. La conception et la simulation électromagnétique ont été réalisées à l'aide d'un logiciel adapté afin de gagner du temps et d'optimiser la structure aux paramètres souhaités. Les résultats de simulation en termes d'adaptation et du gain sont affichés et discutés. Ce chapitre se termine par une comparaison entre les performances de l'antenne bi-bande et la nouvelle structure (antenne + réseau AMC).

Chapitre 1 Généralités sur les antennes

1.1 Introduction

Ce chapitre est destiné à présenter dans le cas général la description des antennes, commençant en premier lieu par leur définition, ces applications, en plus d'un bref rappel de ces propriétés caractéristiques en termes de diagramme de rayonnement de directivité, d'efficacité et de gain...etc. que on va traiter dans ce chapitre. En second lieu les antennes imprimées sont mises en évidence, en détaillant également leurs techniques d'alimentation, puis nous terminerons avec les principaux techniques d'obtention d'antennes multi-bandes et en fin une conclusion.

1.2 Antennes : définition, historique et applications

1.2.1 Définition d'antenne

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vit vers ça en réception, afin d'assurer la transmission de l'information. On peut les qualifier comme des adaptateurs d'impédance entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur [1]. Comme le montre la Figure 1.1.

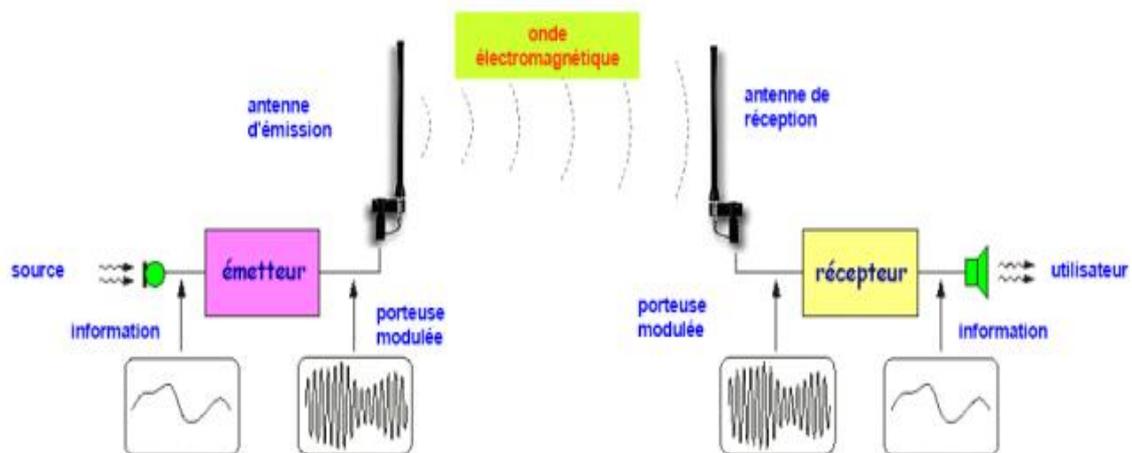


Figure 1. 1. Chaîne de transmission d'une onde électromagnétique [2].

Ainsi, on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre une source et l'espace libre dans lequel cette énergie va se propager.

Réciproquement, à la réception, l'antenne capte et transmet l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur, comme illustré dans la Figure 1.2 [3].

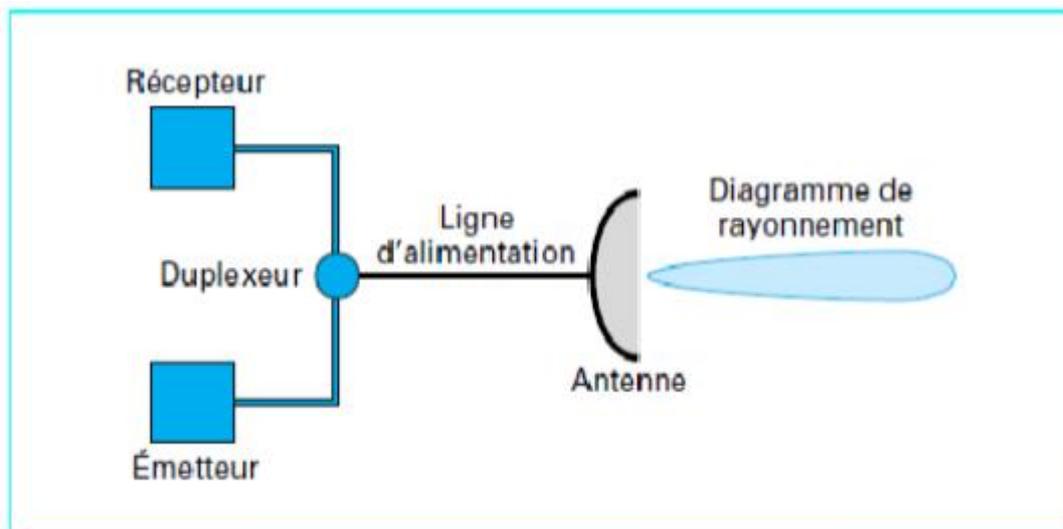


Figure 1. 2. Représentation d'une antenne d'émission et de réception [3].

1.2.2 Historique

La possibilité de transmettre à distance et sans fil des signaux électriques fut entrevue dès la mise en évidence des phénomènes d'induction par Michael Faraday (1831). Ainsi, dans une certaine mesure, la bobine, qui deviendra le cadre, peut-elle être considérée comme la première antenne. Toutefois, il ne s'agit pas encore véritablement de propagation, et il faut attendre les expériences d'Heinrich Hertz (1887) pour confirmer la théorie de James Clerk Maxwell (1873) selon laquelle les champs électriques et magnétiques se propagent, comme la lumière, sous forme d'ondes. Avec un doublet électrique formant éclateur, Hertz réussit à produire et à détecter des ondes décimétriques. On peut déjà noter la présence d'un réflecteur parabolique destiné, comme en optique, à focaliser le rayonnement. De ce fait, c'est du côté des ondes kilométriques que Guglielmo Marconi franchit des étapes décisives en radiotélégraphie avec, au départ, un simple fil relié à un cerf-volant [1].

Le russe POPOV invente l'antenne, élément essentiel pour la transmission sur de longues distances de signaux de TSF. Le 24 mars 1896, il réussit la première transmission et réception d'ondes hertziennes entre divers bâtiments de l'université de SAINT PETERSBOURG avec des antennes d'émission et de réception verticales pour améliorer la réception [1].

De nombreux scientifiques ont mené des études expérimentales et théoriques sur les antennes. Parmi ceux-ci, on peut citer Karl Ferdinand BRAUN, (1850-1918), prix Nobel de physique avec MARCONI en 1909, qui bien que souvent connu comme inventeur de l'oscillographe cathodique a également imaginé l'antenne directionnelle [1].

La première liaison transatlantique eut lieu en 1901. Très vite, les possibilités offertes par la triode, inventée par Lee De Forest en 1906, permirent d'effectuer des liaisons téléphoniques sur de grandes distances. La première liaison transpacifique entre les États Unis et le Japon, avec relais à Honolulu, eut lieu en 1915. Jusqu'à la fin de la Première Guerre mondiale, les antennes demeurèrent exclusivement constituées par des fils, ou des arrangements de fils disposés au sol, suspendus au plus haut des supports disponibles - la tour Eiffel, entre autres, tendus entre les superstructures des navires, déroulés à partir des avions, etc [1]. La Figure 1.3 résume de façon graphique l'historique des radiocommunications.

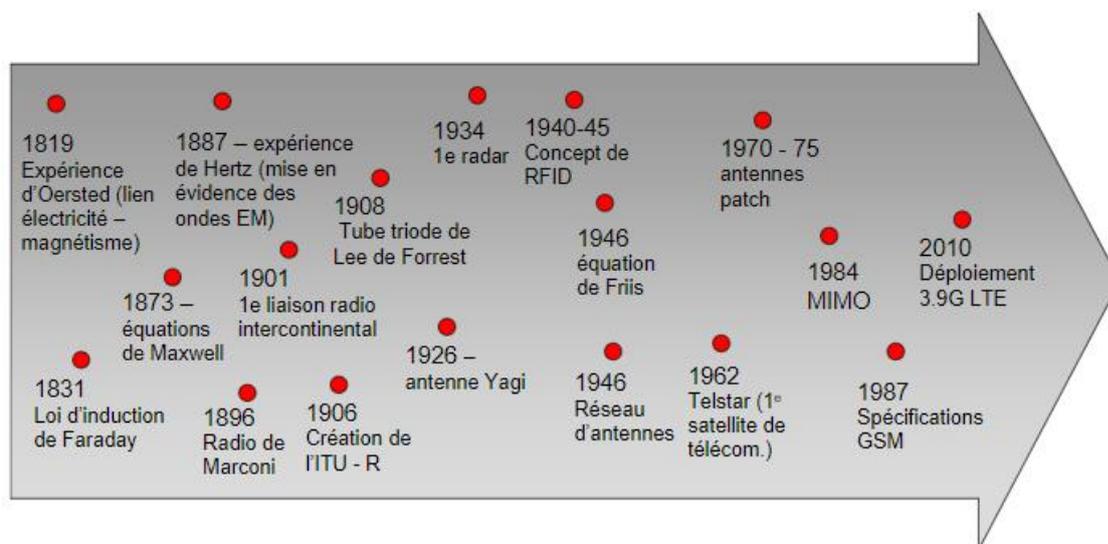


Figure 1. 3. Historique des radiocommunications [4].

1.2.2 Applications

Il existe plusieurs bandes, caractérisées par des longueurs d'ondes différentes ou des antennes, qui peuvent être utilisées pour un grand nombre des tâches, (voir la Figure 1.4).

Parmi eux :

- Ondes kilométriques (30kHz-300kHz) et hectométriques (300kHz-3MHz) pour la radiodiffusion à modulation d'amplitude ou les liaisons avec les sous-marins.
- Ondes décamétriques (3MHz-30MHz) pour les liaisons radio intercontinentales ou maritimes.
- Ondes métriques (30MHz-300MHz) pour la radiodiffusion à modulation de fréquence, la télévision, la radionavigation.
- Ondes décimétriques (300MHz-3GHz) pour la télévision, le radar, les liaisons avec les mobiles.
- Ondes centimétriques (3GHz-30GHz) pour les liaisons terrestres par faisceaux hertziens, les liaisons spatiales avec les satellites artificiels ou les sondes spatiales ainsi que pour la radiodiffusion, la télédétection par satellites artificiels, etc.
- Ondes millimétriques (30GHz-300GHz) pour la radioastronomie et certains radars de plus, elle est utilisée en raison de l'encombrement du domaine des radiofréquences et hyperfréquences [1].

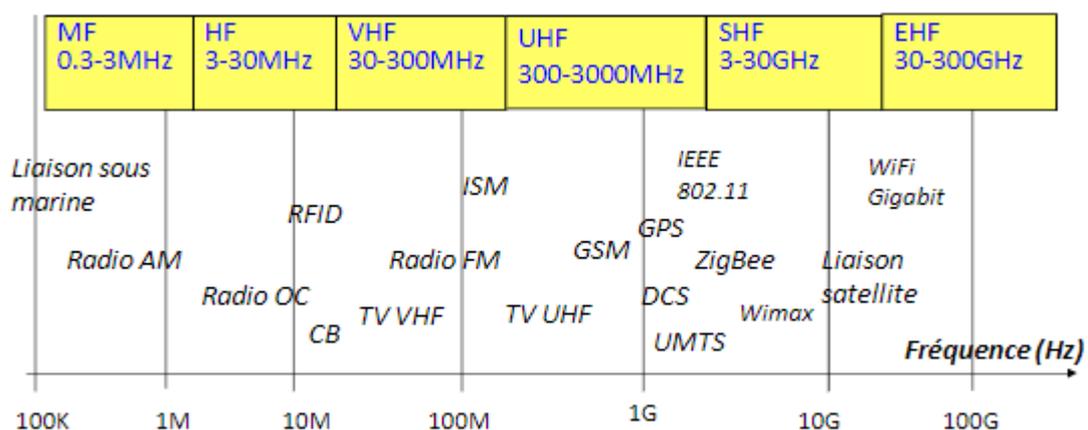


Figure 1. 4. Occupation du spectre radiofréquence [4].

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

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale [4].

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$ qui varie entre 0 et 1 selon la direction. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H [4] :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (1.1)$$

Avec $P(\theta, \varphi)$: La puissance rayonnée dans une direction quelconque.

$P_0(\theta_0, \varphi_0)$: La puissance rayonnée maximale.

Quelques exemples de diagrammes de rayonnement sont illustrés par la Figure 1.5.

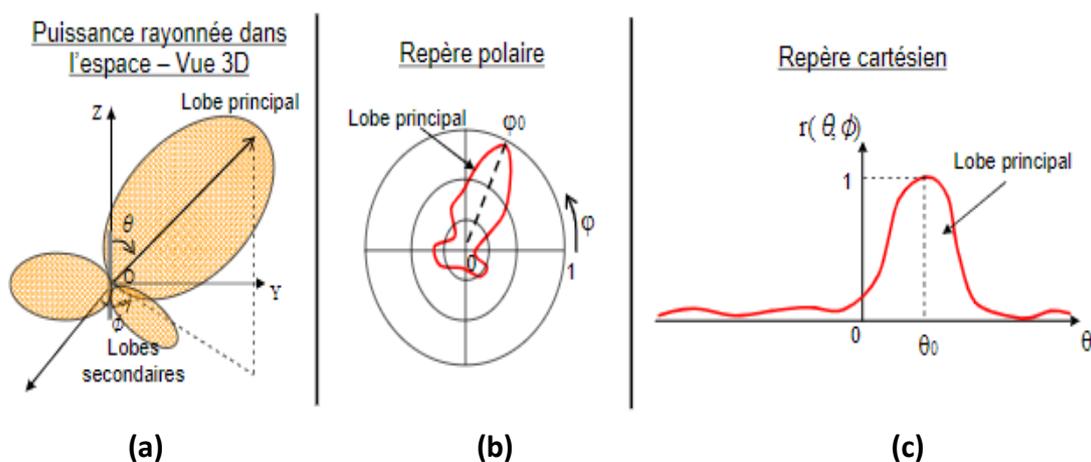


Figure 1.5. Représentation du diagramme de rayonnement : (a) vue en 3D (b) vue en 2D (repère polaire) (c) vue en 2D (repère cartésien) [4].

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est principalement relié à sa géométrie, mais peut aussi varier avec la fréquence. Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. Dans le cas d'une antenne omnidirectionnelle, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à un quelle que soit la direction considérée. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer [4].

1.3.2 Directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) donnée est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. Avec cette définition, une antenne fortement directive admet une faible ouverture de rayonnement, et une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement [5].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad (1.2)$$

avec P_R : puissance rayonnée totale (W).

1.3.3 Le gain

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée. Le gain d'une antenne dans une direction (θ, φ) , est le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction $P(\theta, \varphi)$, à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation et il est exprimé par (1.3) [1].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_A}{4\pi}} = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (1.3)$$

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante [1].

$$G(\theta, \varphi) = \eta \cdot D(\theta, \varphi) \quad (1.4)$$

avec η : Le rendement de l'antenne.

$D(\theta, \varphi)$: La directivité. tel que θ : l'angle d'élévation, φ : l'angle d'azimut.

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB. Le gain est généralement exprimé en dB ou en dBi, car une antenne isotrope est utilisée comme référence. On trouve aussi parfois le gain exprimé en dBd, lorsqu'une antenne dipôle est utilisée comme référence [4].

1.3.4 Efficacité (Rendement)

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_A sous forme de puissance rayonnée P_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations (1.3) et (1.4), on voit que le rendement relie le gain et la directivité [4].

$$\eta_{\text{ray}} = \frac{G}{D} \quad (1.5)$$

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 [6]. Quelques exemples sont donnés par la Figure 1.6.

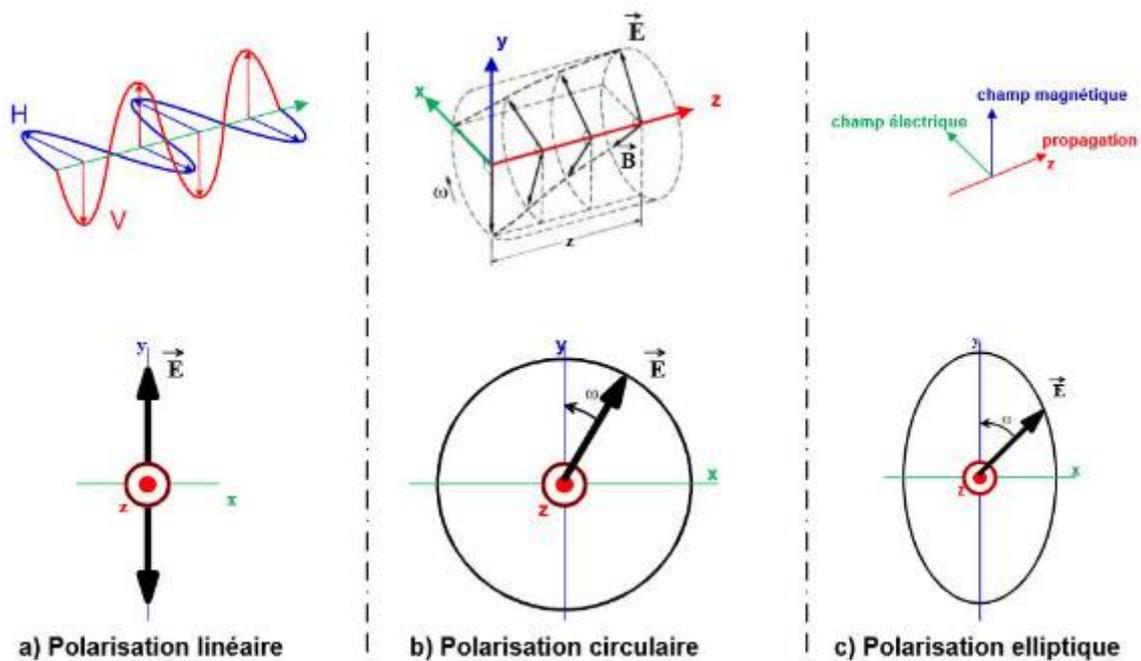


Figure 1. 6. Polarisation de l'onde électromagnétique [7].

1.3.6 Impédance d'entrée

D'un point de vue circuit, une antenne est caractérisée par son impédance d'entrée. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne Z_{Ant} se décompose en une partie réelle R_{Ant} et une partie imaginaire X_{Ant} et s'écrit comme suit [8] :

$$Z_{Ant} = R_{Ant} + jX_{Ant} \quad (1.8)$$

La partie réelle de l'impédance R_{Ant} regroupe la résistance des pertes et la résistance de rayonnement de l'antenne et elle s'écrit comme suit [8] :

$$R_{Ant} = R_{pertes} + R_{ray} \quad (1.9)$$

La Figure 1.8 représente l'impédance de l'antenne

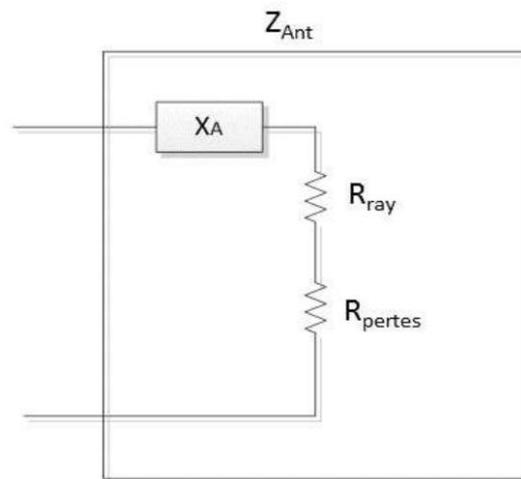


Figure 1.7. Représentation de l'impédance de l'antenne [9].

1.3.7 Coefficient de réflexion et adaptation

Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies. Pour une antenne d'impédance Z , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_c , le coefficient de réflexion peut être défini comme suit :

$$S_{11} = \frac{Z_{Ant} - Z_c}{Z_{Ant} + Z_c} \quad (1.10)$$

avec Z_c : L'impédance caractéristique (Ω)

Z_{Ant} : L'impédance d'antenne (Ω)

Souvent Z_c est égale à 50Ω .

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$|S_{11}| = 20 \log_2(S_{11}) \quad (1.11)$$

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal. Une mesure peut être faite avec un analyseur de réseau [8].

1.3.8 Bande Passante

La largeur de bande ou la bande passante en adaptation d'une antenne peut être définie comme une bande de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil donné. Elle est souvent considérée comme une gamme de fréquences positionnées de part et d'autre de la fréquence centrale. Elle peut aussi être définie comme correspondant à la bande de fréquences où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est supérieur à un seuil. On parle alors de bande passante absolue [8], est donnée par :

$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (1.6)$$

On déduit souvent la bande passante d'une antenne à partir de la courbe de son coefficient de réflexion. Certains critères typiques sont pris comme un coefficient de réflexion inférieur à -6 dB ou à -10 dB. Souvent, on l'exprime en termes de bande passante relative par rapport à la fréquence centrale [8], est donnée par :

$$BP(\%) = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100 \quad (1.7)$$

La Figure 1.7 illustre un exemple d'une bande passante

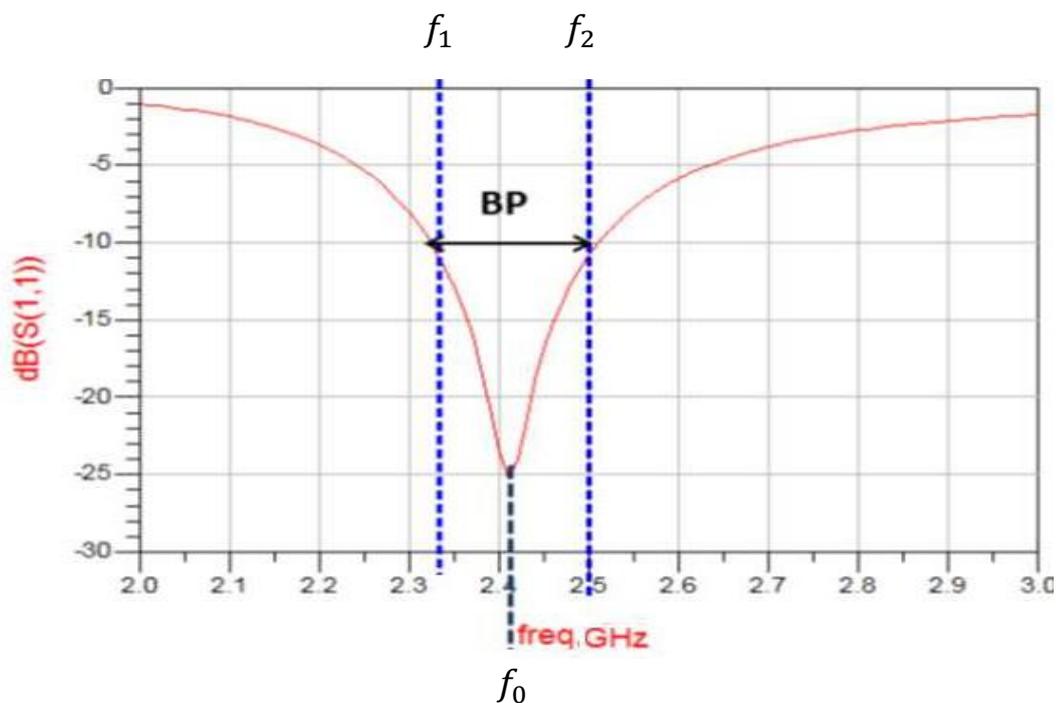


Figure 1.. Illustration de la bande passante à - 10 dB à partir du coefficient de réflexion [9]

1.4 Antennes imprimées

Le concept d'antennes patch est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 70. Les antennes imprimées ou micro ruban, ou « patch » en anglais sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. Grâce à leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes patch sont utilisées dans de nombreuses applications à partir des bandes VHF [4]. Quelques exemples d'antennes patch sont donnés par la Figure 1.9.



Figure 1. 7. Exemple d'antennes patch [4].

1.4.1 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne patch consiste en un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou forme plus élaborée) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse). Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante, sa structure est détaillée ci-dessous dans la Figure 1. 10 [4].

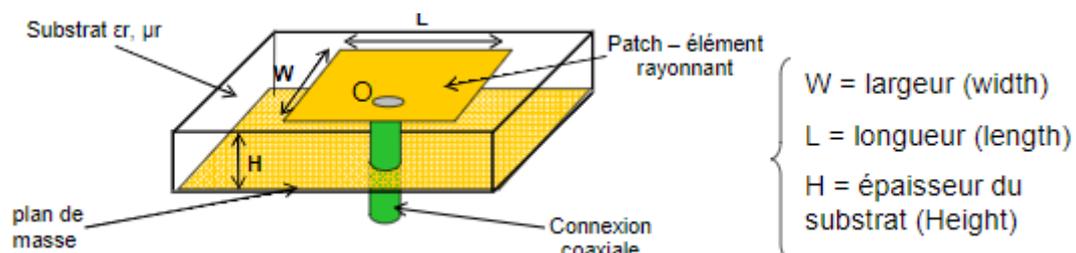


Figure 1. 8. Structure d'une antenne patch rectangulaire [4].

Les dimensions du patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur est guidé par la fréquence de résonance à donner à l'antenne. Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il peut être égal à trois ou quatre fois la longueur d'onde, ce qui représente parfois un encombrement trop important. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne. Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde et présenter de faibles pertes (on caractérise les pertes d'un diélectrique par la tangente des pertes notée $\tan(\delta)$). Une valeur typique se situe aux alentours de 10^{-3}) [4].

1.4.2 Les différentes formes d'une antenne imprimée

Il existe plusieurs formes d'antenne patch rectangulaire, carré, circulaire, dipôle, secteur d'anneau, elliptique, triangulaire, anneau, secteur de disque ... comme présentées dans la Figure 1.11 [10]. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication.

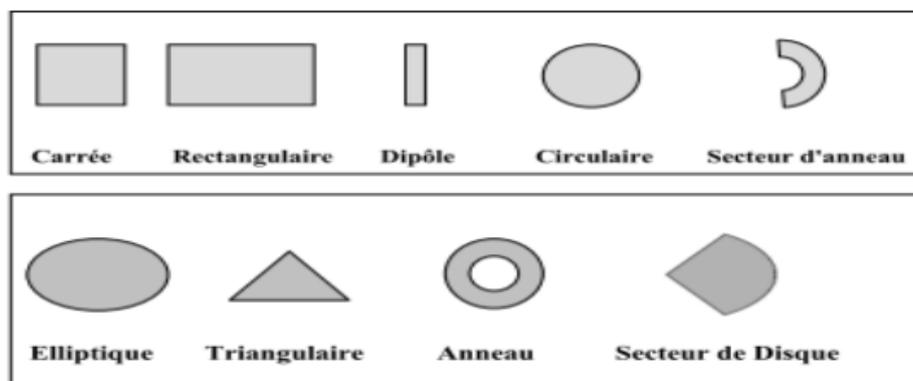


Figure 1. 9. Les différentes formes d'antenne patch. [10].

1.4.3 Techniques d'alimentation

L'alimentation des antennes patch est l'une des parties les plus importantes dans le processus de la conception. Pour cela, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but. En effet, elles peuvent être classées en deux grandes catégories [1] :

- Par contact : ligne micro-ruban, câble coaxial.
- Par proximité : couplage électromagnétique, couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse.

Les techniques les plus utilisées sont la bande millimétrique ou la ligne micro ruban ou le couplage par ouverture (fente) dans le plan de masse.

1.4.3.1 Alimentation par contact

A. Alimentation par ligne micro-ruban

L'alimentation peut être établie par la connexion directe à une ligne micro-ruban (montré par la Figure 1.12), dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [11].

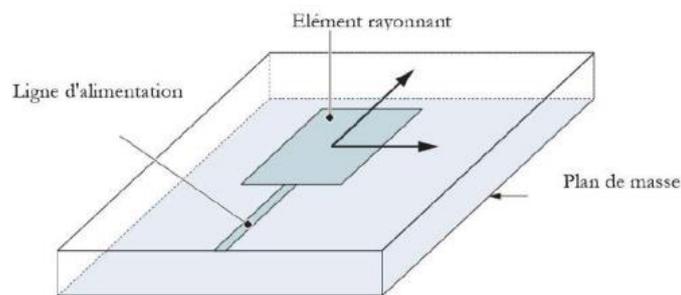


Figure 1. 10. Alimentation par ligne micro-ruban [12].

B. Alimentation par sonde coaxiale

Le câble traverse le plan de masse et le substrat. Le conducteur central est soudé sur l'élément rayonnant. Le conducteur extérieur quant à lui est soudé au plan de masse, Figure 1.13. Cette alimentation est très utilisée dans les antennes imprimées qui ont des patches de forme circulaire et annulaire (voir la Figure 1.14) [13].

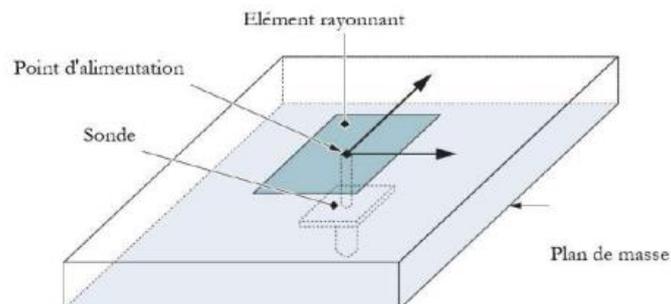


Figure 1. 11. Alimentation par sonde coaxiale [12].

1.4.3.2 Alimentation par proximité

A. Alimentation par fente

Cette structure (voir la Figure 1.14) est constituée par deux substrats séparés par un plan de masse, le patch est imprimé sur le substrat supérieur et le ruban d'alimentation est imprimé sur le substrat inférieur, avec une fente non résonnante fendue dans le plan de masse. L'adaptation d'impédance est contrôlée par les paramètres de la fente, la position et la longueur du ruban et la constante diélectrique de deux substrats. Cette structure d'alimentation offre une large bande d'impédance et une pureté de polarisation élevée, mais son coût de fabrication est très élevé. [14].

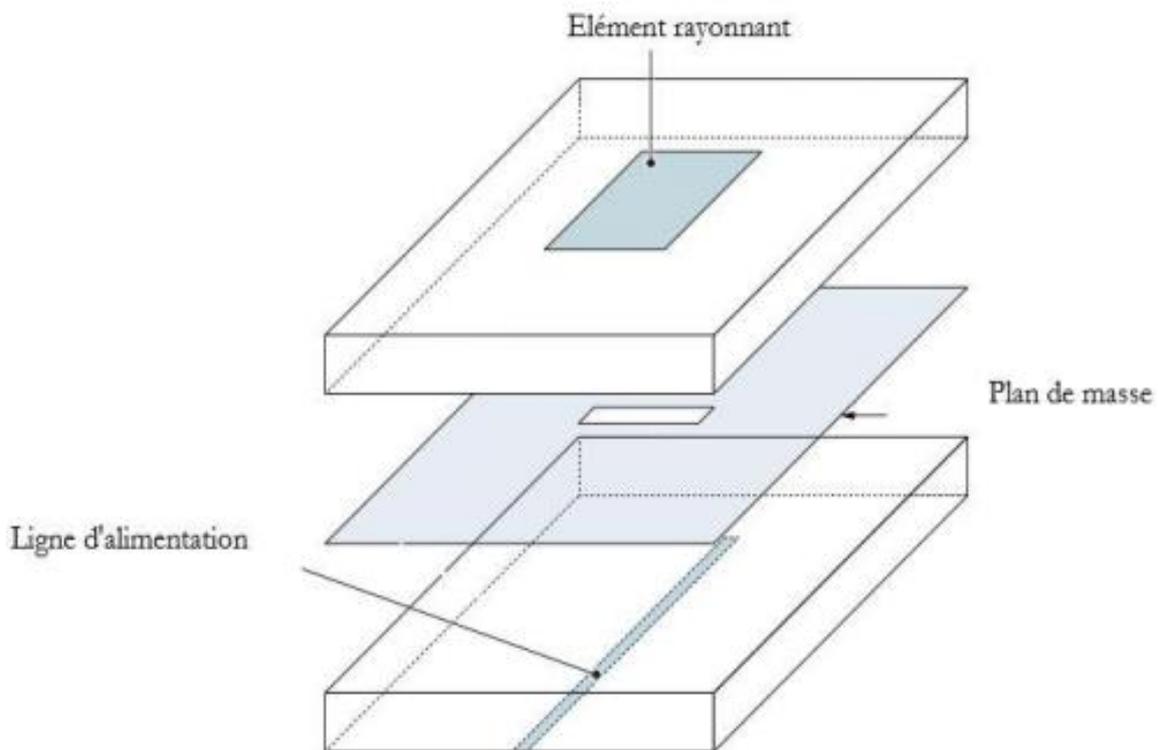


Figure 1. 12. Alimentation par fente [12].

B. Alimentation par couplage de proximité

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est située entre les deux substrats et le patch est imprimé sur le substrat supérieur (voir la Figure 1.15). L'avantage principal de cette technique est qu'elle élimine le rayonnement parasite dû à l'alimentation et fournit une largeur de bande élevée, en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [15].

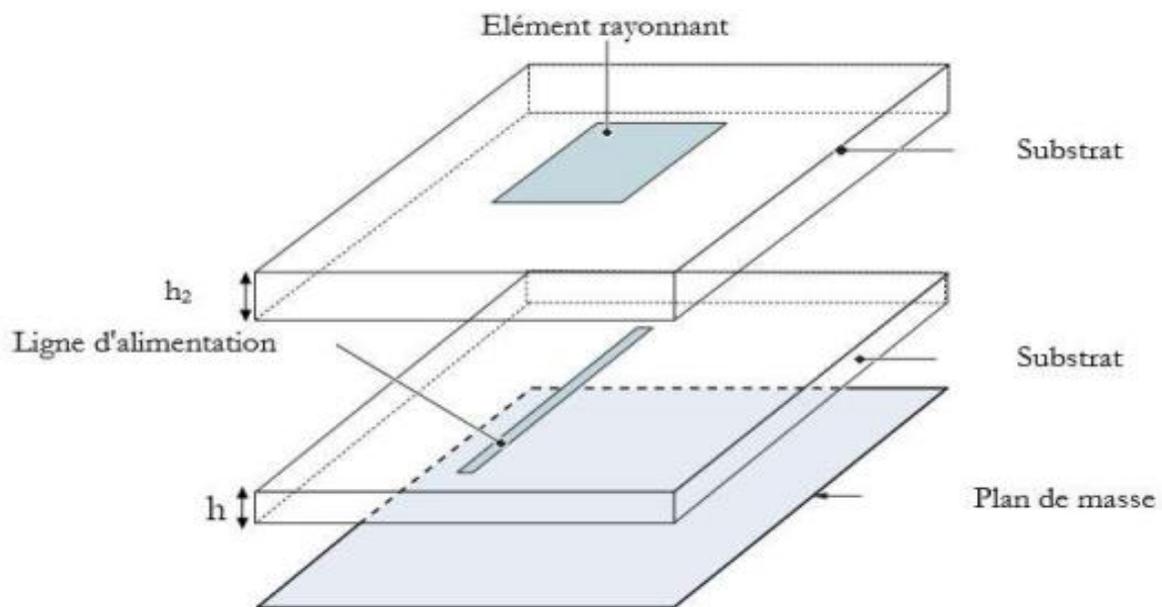


Figure 1. 13. Alimentation par couplage de proximité [12].

1.4.4 Avantages et inconvénients des antennes patch

Les avantages et les inconvénients sont présentés, successivement, dans le Tableau

1. 1. ci-dessous.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Faible masse, faible volume, faible épaisseur.• Possibilité d'imprimer sur des substrats souples.• Possibilité d'être intégrées dans des appareils électroniques nomades ou transportables.• Facilités de fabrication :<ul style="list-style-type: none">- mise en réseau.- intégration aisée de composants ou de circuits actifs hybrides.• Faible coût de fabrication.	<ul style="list-style-type: none">• Bande passante souvent étroite, de l'ordre de 1 à 5 (pour les éléments résonants de géométrie simple).• Directivité faible pour un élément seul (environ 6 dB)• Faible tenue en puissance.• Rendement limité de surface.• Risque de rayonnement parasite dû aux jonctions avec l'alimentation ou à la limitation du plan de masse.• Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisation.• Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits.

Tableau 1. 1. Avantages et inconvénients des antennes imprimées [16].

1.5 Techniques d'obtention des antennes multi-bandes

Une antenne multi-bande est une antenne qui fonctionne ou plus précisément qui résonne sur au moins deux fréquences avec les mêmes exigences (adaptation, valeur du coefficient de réflexion, etc) [11].

Une antenne multi-bande, par définition, est une antenne fonctionnant dans deux ou plusieurs bandes de fréquences avec des performances assez similaires dans ces bandes. Le fonctionnement d'une antenne multi-bande une de fréquence de résonance se traduit généralement par une adaptation « raisonnable » de l'antenne pour toutes les fréquences de la bande [17].

Les techniques utilisées pour faire résonner une antenne à plusieurs fréquences sont très variées et basées sur plusieurs concepts. Dans la suite, nous allons décrire les techniques les plus employées pour l'obtention d'antennes multi-bandes [18].

1.5.1 Combinaison de plusieurs éléments rayonnants

La combinaison de deux ou plusieurs éléments rayonnants (résonateurs) mono-bande de même type (voir Figure 1.16) ou différents les uns des autres (voir Figure 1.17), est une technique classique pour obtenir des antennes multi-bandes, l'alimentation des éléments constituant ces antennes multi-bandes peuvent être assurées par deux manières différentes : l'alimentation directe par port d'excitation et l'alimentation par couplage électromagnétique [10].

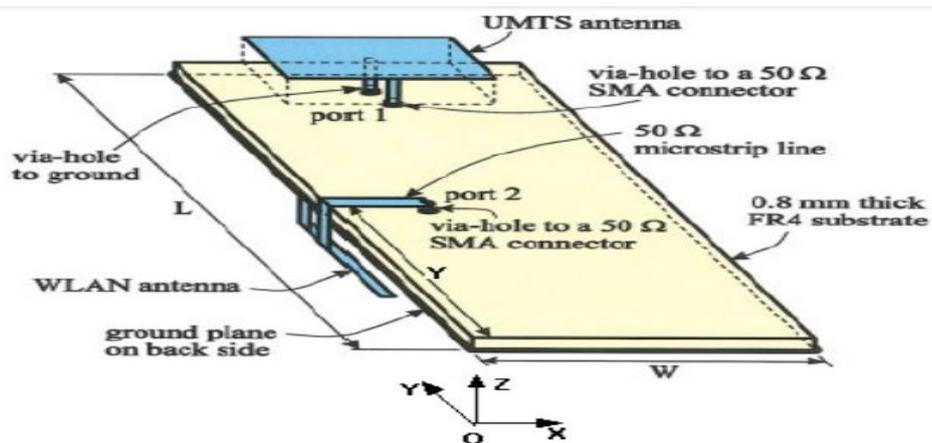


Figure 1. 14. Association des PIF As DCS et UMTS sur le même plan de masse avec leurs languettes de court-circuit [19].

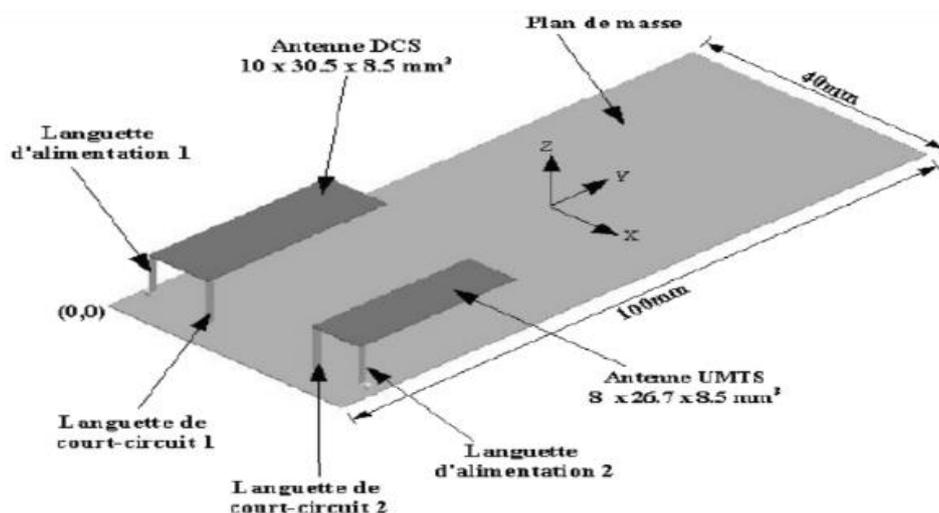


Figure 1. 15. Association de deux antennes différentes, PIFA pour UMTS et l'antenne IFA pour WLAN [19].

Dans le cas des antennes imprimées l'association de plusieurs éléments rayonnants peut se faire de deux façons différentes : soit ces éléments sont juxtaposés dans le même plan, soit ils sont empilés les uns sur les autres. Le cas où les deux méthodes sont combinées existe également, mais au détriment d'une augmentation importante du volume global de l'antenne [10]. Le tableau 1.3 suivant représente les points forts et faibles de la combinaison de plusieurs éléments rayonnants.

Points forts	Points faibles
<ul style="list-style-type: none"> • Facilité du premier dimensionnement des éléments constitutifs. • Rayonnement relativement identique sur toute la large bande couverte. • Bonne efficacité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Structures généralement encombrantes. • Couplage entre éléments pas toujours maîtrisé. • Bon positionnement des différents éléments rayonnants délicat. • Diagrammes de rayonnement généralement perturbés par les autres éléments rayonnants. • Nombre de ports d'excitation dans le cas d'excitations séparées.

Tableau 1. 2. Points forts et faibles de la combinaison de plusieurs éléments rayonnants [18].

1.5.2 Créations des fentes dans l'élément rayonnant

Cette technique consiste à créer une ou plusieurs fentes sur l'élément rayonnant de l'antenne (figure 1.18). Les fentes modifient le parcours des courants en créant de nouveaux chemins. Ce phénomène ajoute des fréquences de résonance à la structure ou fait baisser les modes supérieurs. En maîtrisant et en optimisant ces paramètres, il est donc possible de rapprocher suffisamment plusieurs fréquences de résonance pour les coupler. La bande passante est ainsi élargie [20].

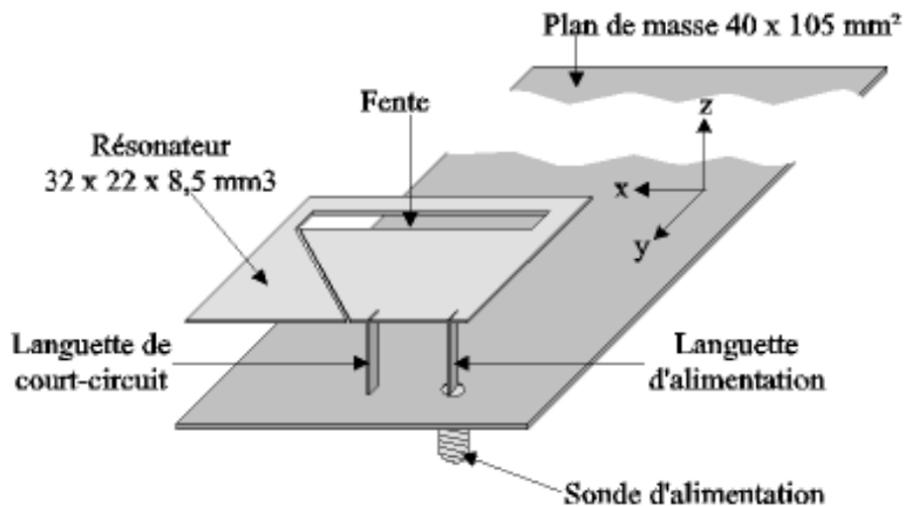


Figure 1. 16. Antenne PIFA avec fente [21].

1.5.3 La technique fractale

La géométrie fractale est une extension de la géométrie euclidienne. Son introduction a constitué une opportunité pour les antennistes pour découvrir de nouvelles configurations d'antennes. Le terme antenne « fractale » est un abus de langage. Les antennes étudiées ont juste des formes pré-fractales : ce sont des itérations plus ou moins élevées alors que la forme fractale est le résultat d'une itération à l'infini [18].

En dehors de leur utilisation pour obtenir des antennes multi-bandes, les fractals peuvent également être utilisés pour la miniaturisation des antennes. Ils trouvent également quelques applications dans la conception des antennes large-bandes ou dans la conception des antennes directives. Toutefois, les antennes fractales restent un sujet polémique : quelques auteurs, considèrent l'aspect fractal dans la structure d'une antenne comme un élément déterminant dans les performances de l'antenne en question. D'autres, réfutent totalement cette idée et considèrent que les fractals n'apportent rien de réellement nouveau.

Dans la littérature, plusieurs géométries fractales ont été exploitées pour la conception d'antennes multi-bandes. Quelques exemples sont donnés par la figure 1.19 [18].

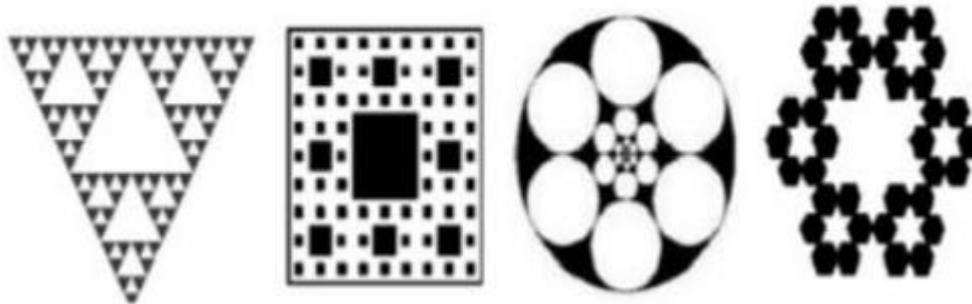


Figure 1. 17. Différents types d'antennes fractales [18].

Le tableau ci-dessous montre les points forts et faibles des antennes fractales.

Points forts	Points faibles
<ul style="list-style-type: none">• Généralement plus compactes .• Esthétique (beauté des Fractales) .	<ul style="list-style-type: none">• Rapports de fréquences de fonctionnement pas aisément contrôlable .• Manque de règle de conception• Faible contrôle de la polarisation du champ rayonné .• Diagrammes peu similaires aux différentes fréquences .

Tableau 1. 3. Points forts et faibles des antennes fractales [18].

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté les diverses caractéristiques fondamentales qui définissent toute les antennes telles que le diagramme de rayonnement, le gain, la polarisation, l'impédance d'entrée ...etc. Leurs applications, ensuite les techniques d'alimentation des antennes imprimées, ainsi que les techniques d'obtention des antennes multi-bandes.

Chapitre 2 Généralités sur les AMC

2.1 Introduction

Ce chapitre est destiné à présenter dans le cas général une description des AMC, commençant en premier lieu par leur définition, leur structure, un bref historique, paramètres et ces applications, puis un état de l'art sur les AMC multi-bande et en fin une conclusion.

2.2 Définition

Le premier conducteur magnétique artificiel AMC (Artificial Magnetic conductor) est constitué d'une répétition périodique des patches métalliques imprimés sur substrat placé au-dessus d'un plan de masse métallique [22]. Les dimensions et l'espacement entre les patches métalliques sont électriquement très petits devant la longueur d'onde de fonctionnement, la variation de ces deux paramètres peut modifier la fréquence de résonance d'AMC.

L'AMC présente une propriété importante : toutes les ondes qui arrivent à cette surface seront totalement réfléchies (coefficient de transmission $T=0$) avec un coefficient de réflexion $R=1$ [22], ainsi les ondes incidentes et les ondes réfléchies sont en phase. Cela va être un avantage en plaçant cette structure comme plan de masse pour une antenne car les ondes rayonnées (onde 1) par ce dernier et les ondes réfléchies (onde 2) par l'AMC se combinent d'une manière constructive (voir Figure 2.1.b) et ceci entraîne une amélioration des caractéristiques de l'antenne.

Contrairement au plan de masse classique les ondes réfléchies sont déphasées de π (coefficient de réflexion $R=-1$) par rapport aux ondes rayonnées. En conséquence la combinaison est destructive (voir Figure 2.1.a), les performances de l'antenne sont dégradées.

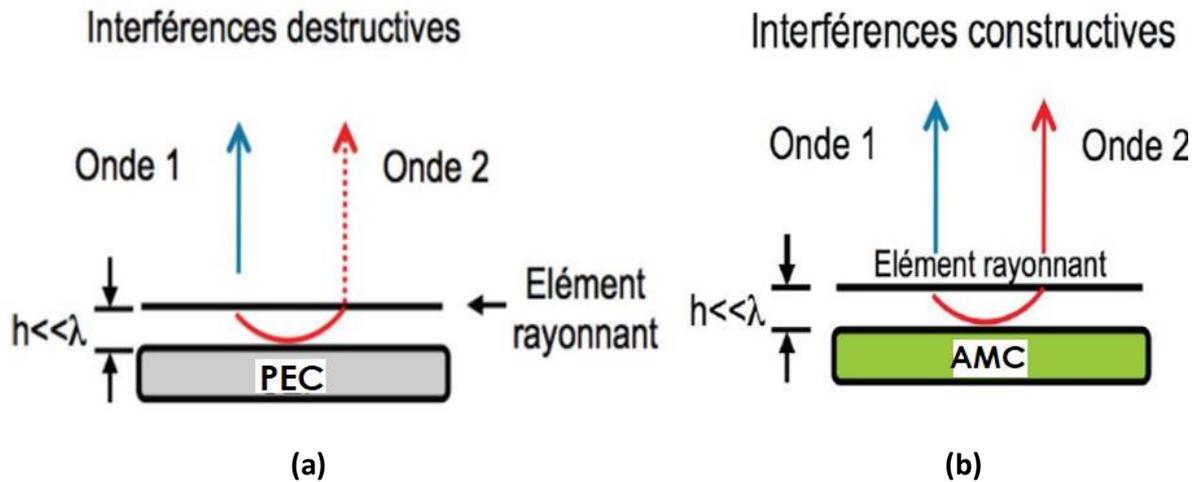


Figure 2. 1. La combinaison des ondes : **(a)** selon un conducteur électrique parfait **(b)** selon un conducteur magnétique artificiel [22].

Les AMC sont utilisées dans plusieurs applications, par exemple la minimisation de couplage dans les réseaux d'antennes [22], un substrat sur lequel repose une antenne afin de réduire sa taille sans affecter ses performances. Dans notre cas, l'utilisation d'AMC est de remplacer le plan de masse de l'antenne et ainsi d'améliorer ses caractéristiques.

2.3 Structure d'AMC

La structure AMC est en fait une simple cellule unitaire répétée plusieurs fois pour former une surface. Chaque cellule unitaire comprend trois parties : la couche inférieure de plan de masse métallique, le chapeau métallique (patch) sur le dessus et une voie conductrice entre les deux, comme le montre la Figure 2.2. Les dimensions de ce chapeau sont soigneusement déterminées de telle sorte qu'il existe un espace spécifique [23]. La cellule AMC est généralement réalisée sur la base de substrats diélectriques périodiques et de divers schémas de métallisation [24], et plusieurs types de plans de masse AMC ont déjà été largement étudiés.

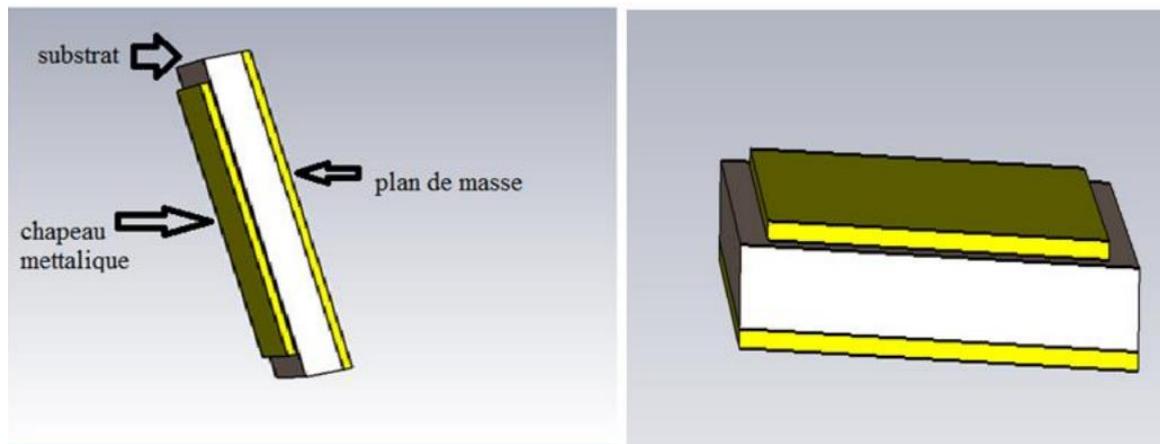


Figure 2. 2. Géométrie d'une cellule AMC [23].

Une structure AMC est conçue pour limiter le comportement d'un conducteur magnétique parfait (PMC) et reflète les ondes électromagnétiques sans inversion de phase dans le champ électrique . La structure périodique artificielle qui met en œuvre la cellule AMC pourrait également bloquer la propagation des ondes électromagnétiques dans certaines bandes de fréquences et présenter ainsi un comportement de bande interdite électromagnétique (EBG) [25].

2.4 Principe, historique et applications des AMC

2.4.1 Principe des AMC

Les surfaces AMC ont deux propriétés importantes et intéressantes ne se produisent 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 [26].

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 2.3 ci-dessous montre la phase

du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence lorsque le réflecteur AMC est illuminée par une onde que l'on suppose plane et d'incidence normale.

La fréquence correspondante 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° [27]. En dehors de cette bande de fréquences, le réflecteur se comporte comme un réflecteur PEC.

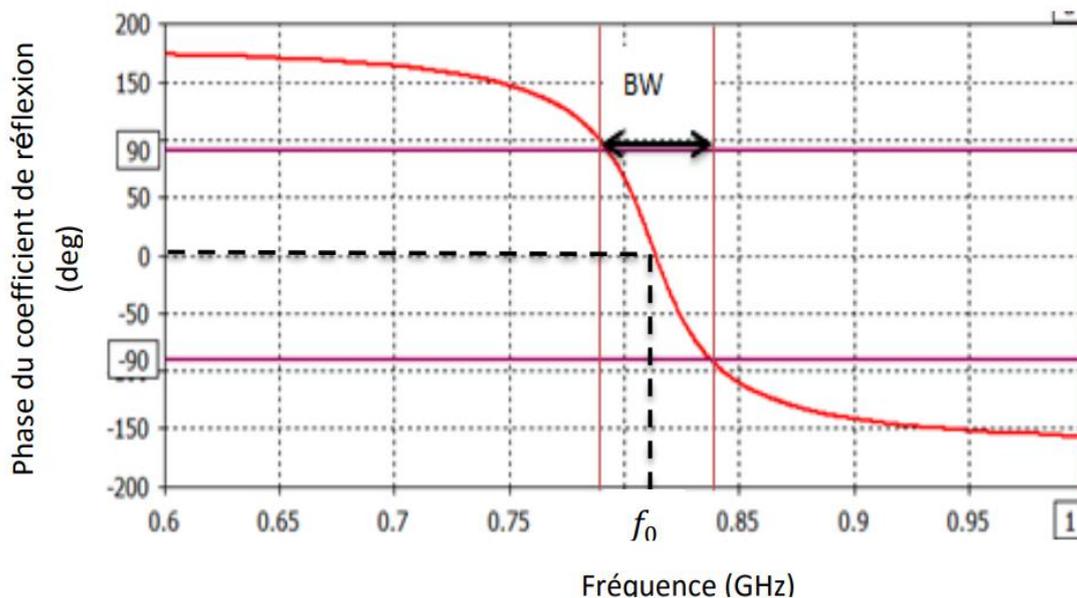


Figure 2. 3. La phase du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence d'une cellule AMC [27].

2.4.2 Historique

Les AMC (conducteurs magnétiques artificiels) sont un matériau à microstructure artificielle avec une structure de surface spéciale, qui a été proposé pour la première fois par Sievenpiper en 1999 [28]. Il est fabriqué en gravant une plaque plaquée de cuivre et présente une structure de surface à haute impédance et une très petite surface magnétique tangentielle des champs.

Lors de l'application de ce matériau à l'antenne, l'impédance élevée à la surface de l'AMC peut permettre une régulation simultanée de la suppression des ondes de surface et de la réflexion de phase nulle. Par conséquent, cette technique peut considérablement améliorer le gain directionnel et permettre la miniaturisation de l'antenne à profil bas [29].

En 2013, Wu et al. [28] ont proposé de mettre en œuvre un conducteur magnétique parfait (PMC) dans le système WPT en tant que réflecteur et ont prédit une efficacité de transmission améliorée grâce à simulations.

En 2015, Kamoda et al. [30] ont étudié des antennes à boucle de récupération d'énergie RF à double bande sur AMC avec adaptation d'impédance, et la fréquence de travail est de centaines de mégahertz.

En 2015, Lawson et al. [31] ont effectué des analyses de simulation en appliquant un AMC intégré dans un condensateur dans un WPT à induction magnétique, mais le matériau diélectrique de l'AMC de simulation et de la ferrite, ce qui est mauvais pour l'expérience et l'application. Leur étude a confirmé que la structure AMC peut protéger efficacement les ondes électromagnétiques. Dans cet article, ils ont appliqué une structure AMC intégrée avec un condensateur à puce à un système WPT et analysé l'efficacité de transmission du WPT par des simulations et des expériences.

Leurs analyse révèle différentes améliorations d'efficacité dans différentes conditions de fréquence, qui sont d'avantages rationalisées en fonction de la distribution de phase et de la distribution du champ magnétique proche. Par rapport à la recherche précédemment discutée de Wu et al. et Lawson et al, le système WPT intégré AMC proposé dans cette étude est réalisé en simulation et expérimentation à des dizaines de mégahertz, et ce système a une disposition plus simple et est plus facile à mettre en œuvre dans des applications pratiques[31].

Plus précisément, notre conception ne nécessite qu'un emballage de structure AMC à l'extrémité de l'émetteur et peut réaliser un mode de fonctionnement commutable entre deux fréquences différentes.

2.4.3 Applications

Il est connu que les structures HIS peuvent restreindre la propagation des courants de surface, tout en se comportant simultanément comme des parois magnétiques proches de leurs résonances. En raison de ces deux caractéristiques remarquables, les structures HIS sont appliquées dans toutes sortes d'antennes, telles que les antennes GPS dans les systèmes de télécommunication, dans l'aéronautique, etc. Surtout, ils ont été très utilisés comme plans de

masse dans la conception d'antennes à profil bas. La structure HIS elle-même peut fonctionner comme une antenne.

L'une des applications des AMC (Conducteurs Magnétiques Artificiels) ceux 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 comme le montre la Figure 2.4. Pour une bande de fréquence spécifiée, 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 [26].

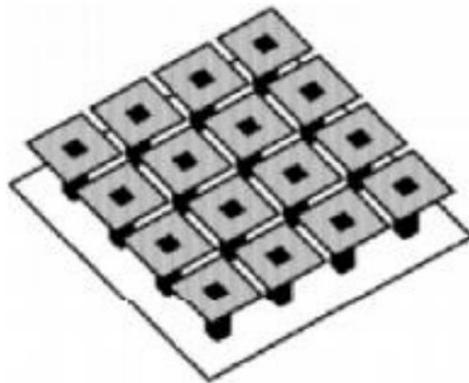


Figure 2. 4. Cellules AMC [26].

2.5 Paramètre d'AMC

Les structures HIS présentent une valeur d'impédance élevée autour de la résonance. L'impédance de surface des structures HIS peut être obtenue analytiquement ou numériquement, nous donnons une définition générale de l'impédance de surface des structures HIS en utilisant le circuit équivalent présenté dans la Figure 2.5 [32]. Puisque le circuit équivalent est une combinaison parallèle de composants L et C, l'impédance de surface peut être formulée comme suit:

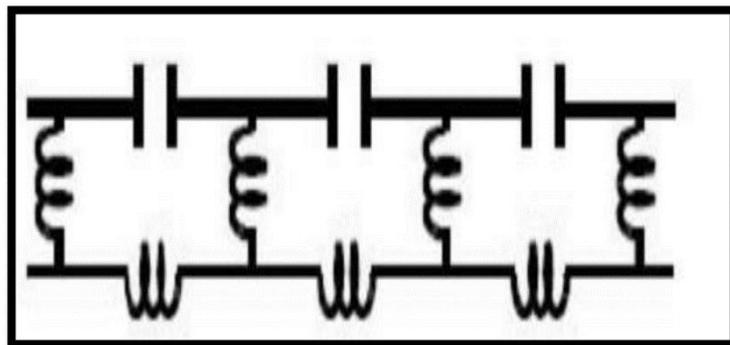


Figure 2. 5. Circuit équivalent LC [32].

$$Z_{\text{HIS}} = \frac{j\omega L}{1-\omega^2 L C} \quad (2.1)$$

L : l'inductance effective

C : capacité effective de la structure HIS

Sievenpiper décrit le calcul de L et C et indique que les valeurs sont d'autant plus importantes que la longueur du via est grande et que l'écart entre les patches est faible. Cependant, le gap ne peut atteindre des dimensions très petites. La capacité équivalente est donnée par :

$$C = \frac{\omega(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{1 - \omega^2 L C} \quad (2.2)$$

ε_1 et ε_2 permittivité du milieu de part et d'autre du réseau.

Dans l'analyse du paragraphe suivant $\varepsilon_1 = 1$, et $\varepsilon_2 = \varepsilon_r$

L'inductance équivalente de surface est donnée par :

$$L = \mu_0 \mu_r h \quad \text{En H/unité de surface} \quad (2.3)$$

La fréquence de résonance de la structure est définie par :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C}} \quad (2.4)$$

L'impédance de surface ne peut pas être mesurée directement dans des expériences. Par conséquent, nous choisissons un paramètre d'observation alternatif : le coefficient de réflexion qui peut être déterminé pour une surface d'impédance arbitraire en considérant l'onde stationnaire formée par une onde de marche avant frappant la surface de HIS et une onde de marche arrière réfléchi par celle-ci. Il peut également être obtenu en considérant un modèle de ligne de transmission [32], comme indiqué sur la Figure 2.10, et calculé à partir l'équations suivante :

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_P}{Z_L + Z_P} \quad (2.5)$$

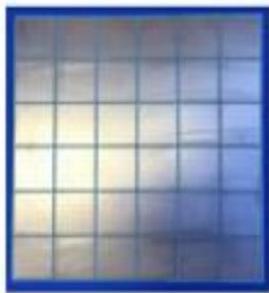
Z_p : est identique à l'impédance de l'espace libre ($Z_0 = 377$ ohms)

Z_L : est l'impédance d'entrée vue à une distance de la surface supérieure des structures HIS.

2.6 Types D'AMC

Un AMC est composé de motifs périodiques, dont la périodicité est inférieure à la longueur d'onde λ , répliqués sur un substrat diélectrique avec plan de masse. Historiquement, ces structures ont été réalisées avec des patches associés à des via mais les efforts récents se concentrent sur le développement de motifs planaires sans via, monocouches ou multicouches [26].

Dans la littérature, on trouve de nombreuses géométries selon le fonctionnement souhaité du AMC (mono-bande ou bi-bande) comme illustré dans la Figure 2.5.



AMC mono-bande



AMC bi-bande



AMC bi-bande hexagonal

Figure 2. 6. Types d'AMC [26].

La géométrie de la cellule unitaire est présentée dans la Figure 2.7 ci-dessous

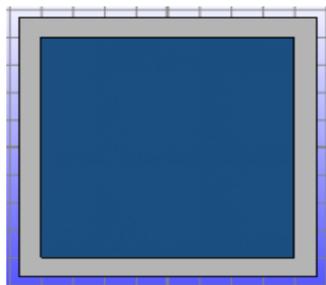


Figure 2. 7. Cellule unitaire AMC [26].

2.7 Etat de l'art sur les AMC multi-bandes

2.7.1 Intérêt des AMC

a. Miniaturisation

Les AMC sont des structures périodiques d'éléments résonants (souvent supérieurs à 4) dont la périodicité est proche du quart-longueur d'onde guidée [13]. Ils sont souvent utilisés à proximité d'antennes présentant, également des dimensions proches de la demi-longueur d'onde guidée. Par conséquent un réseau d'éléments résonants impose très rapidement une méta surface réfléchissante importante en surface vis-à-vis de l'antenne pour garantir son fonctionnement nominal sur la bande de fréquence d'intérêt.

La nécessité de réduire leurs dimensions est apparue pour rendre leur utilisation compatible au contexte des antennes miniatures intégrées dans la bande UHF, surtout pour les fréquences en dessous de 1 GHz. L'enjeu de miniaturisation concerne également l'épaisseur de ces méta surfaces [33].

Les AMC ne sont pas la meilleure solution pour réduire le couplage mutuel lorsqu'ils sont employés comme barrière électromagnétique au sein d'un réseau où les éléments rayonnants sont espacés d'une demi-longueur d'onde. La réduction de 3dB dans le plan E observée lorsqu'un AMC est placé au niveau du plan de masse est intéressante. Afin d'éviter un phénomène de fuite, il serait intéressant d'étudier le couplage mutuel lorsque le plan de masse est tapissé de motifs métalliques.

b. Améliorer le gain

Un des nombreux intérêts de ces structures artificielles est de pouvoir reproduire le caractère conducteur magnétique parfait (PMC) et ainsi remplacer le conducteur électrique parfait (PEC) utilisé comme réflecteur d'antenne [34]. L'utilisation d'un PEC comme plan de masse est traditionnellement employée dans la conception d'antennes. Situé sous l'élément rayonnant, le réflecteur métallique permet de rediriger le rayonnement arrière dans la direction normale au point de vue de l'antenne permettant d'améliorer le gain et d'isoler les dispositifs électroniques environnant. Cependant celui-ci montre certains inconvénients.

Dans le cadre d'applications faible encombrement, l'antenne est parallèle et plaquée au plan de masse entraînant une désadaptation de celle-ci et une détérioration du rayonnement. Ceci est dû au fait que la distribution de courant de l'antenne est annulée par

le courant image issu du PEC : le courant original est parallèle et en opposition de phase ($\phi = \pi$) avec le courant image. Il est donc nécessaire d'éloigner l'antenne de son réflecteur métallique afin de remettre les ondes en phase.

c. Elargir la bande passante

La fréquence de résonance de l'antenne varie avec la hauteur totale ainsi que la bande passante qui est plus large que celle de la structure antenaise basée sur l'AMC monocouche «conventionnelle». L'avantage de l'AMC double-couche décalée par rapport à l'AMC monocouche est qu'elle permet d'abaisser la fréquence de résonance, donc de réduire les dimensions des cellules élémentaires et d'élargir la bande passante [35].

d. Amélioration des performances d'une antenne patch

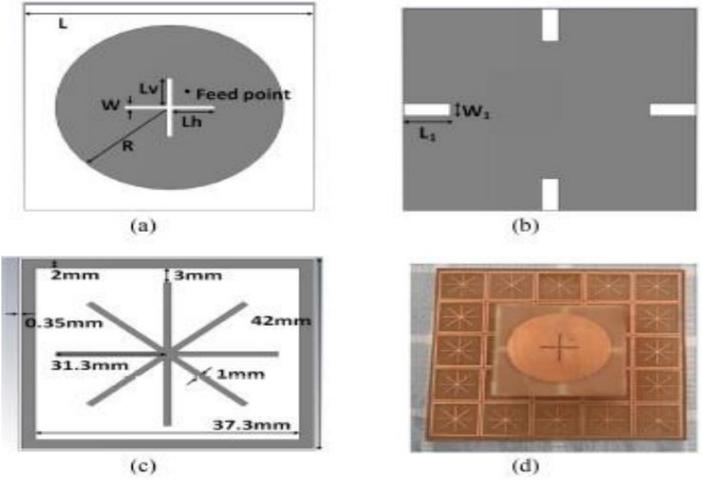
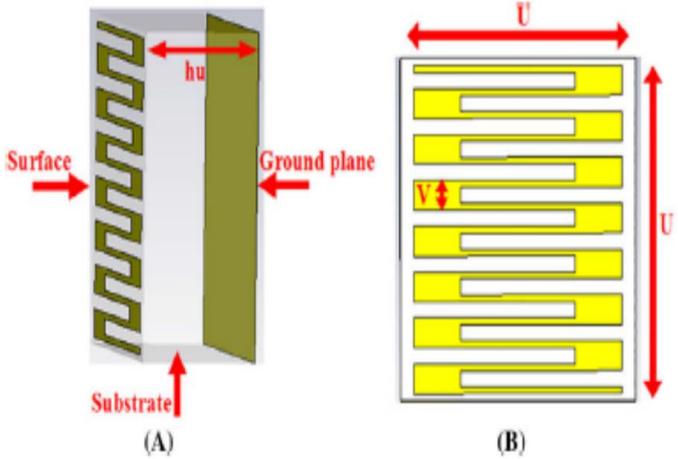
Une comparaison de quelques motifs pour réaliser un AMC, celui présentant les dimensions les plus petites et permettant d'obtenir le comportement d'un conducteur magnétique parfait à 1.62 GHz.

L'association du AMC composée d'un nombre fini de cellules à une antenne patch à double polarisation a été optimisée pour obtenir en définitive une structure rayonnante compacte possédant une adaptation de -15 dB et un gain réalisé de 7 dB à la fréquence de fonctionnement (1.62 GHz). Ces résultats ont été confirmés par la mesure. Pour justifier l'apport du AMC, une antenne identique a été présentée pour laquelle l'AMC est remplacé par un conducteur électrique parfait [36].

2.7.2 Exemples d'applications des AMC

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 : l'optique, les micro-ondes et les antennes.

Dans notre projet on intéresse d'antennes afin d'améliorer leurs caractéristiques en termes de bande passante, de gain et la miniaturisation de leurs tailles. Le Tableau 2.1 résume les différents motifs AMC et leurs objectifs.

Motif AMC	Application
 <p>(a) (b) (c) (d)</p>	<p>« 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 [36].</p>
 <p>(A) (B)</p>	<p>« Augmenter le gain » 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 [37].</p>

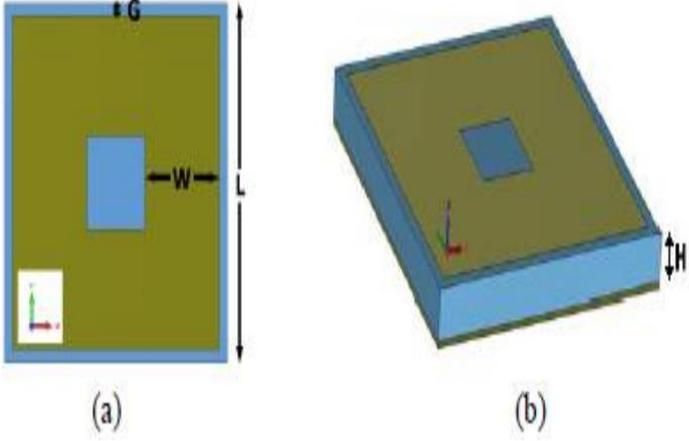
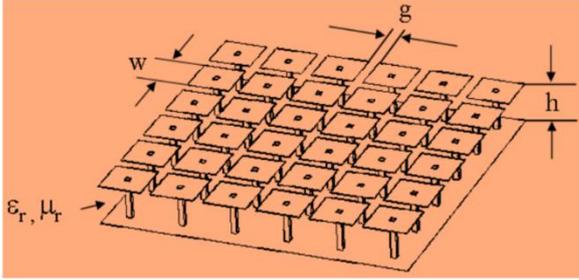
 <p>(a) (b)</p>	<p>« Elargir la bande passante »</p> <p>Antenne planaire large bande à profil bas basée sur l'utilisation d'une surface à haute impédance (HIS) atteint une bande passante relative de 55,6%, un gain élevé de 10,25dBi et une efficacité de rayonnement de 97% [38].</p>
	<p>Les Conducteurs Magnétiques Artificiels introduites par D. Sievenpiper en 1999 dans le but de supprimer les ondes de surface d'antennes de type "patch", et ainsi augmenter leur rendement. En effet un "patch" est une antenne plaquée sur un plan de masse, cette antenne émet des pertes [26].</p>

Tableau 2. 1. Les différents motifs AMC et leurs objectifs.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon générale les AMC (conducteurs magnétiques artificiels). Ces structures artificielles trouvent plusieurs applications 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. Ce chapitre se termine avec un état de l'art non exhaustif sur l'utilisation des AMC dans le domaine de la conception des antennes.

Chapitre 3 Conception et amélioration des performances d'une antenne bi-bande

3.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse, dans un premier temps, à la conception et simulation d'une antenne bi-bande. Ensuite, il aborde, dans un second temps, l'amélioration de ses performances en intégrant un réseau AMC. La conception et la simulation électromagnétique ont été réalisées à l'aide d'un logiciel adapté afin de gagner du temps et d'optimiser la structure aux paramètres souhaités.

Ce chapitre est organisé comme suit. Après la définition du cahier des charges, une antenne patch rectangulaire bi bande a été conçue et optimisée. puis, deux cellules AMC bi-bandes ont été proposées et comparées. Afin d'améliorer les performances en rayonnement de l'antenne bi-bande, un réseau AMC a été intégré comme plan réflecteur. Enfin, des études paramétriques sur la structure (antenne + réseau AMC) ont été conduites dans le but de comprendre les effets de variation des différents paramètres et de valider les dimensions optimales du système ainsi construit.

3.2 Cahier des charges et logiciel de simulation

Le but de notre travail consiste à concevoir une antenne imprimée rayonnante sur les deux bandes : [3310-3680] MHz et [5940-6250] MHz. Plus de détails sur les performances ainsi que les spécifications techniques à atteindre sont données dans le tableau 3.1.

Performance	Spécification	
Bande passante	[3310-3680] MHz	[5940-6250] MHz
Gain (<i>broadside</i>)	>5dBi	
Adaptation	$ S_{11} < -10\text{dB}$	
Diagramme de rayonnement	Unidirectionnel dans la direction <i>broadside</i>	
Taille	La plus compacte possible	
Alimentation	Ligne micro ruban avec $Z_c = 50 \Omega$	
Type de Substrat (existant sur le marché algérien)	FR4 ($h=1.6\text{mm}$, $\epsilon_r=4.3$)	

Tableau 3. 1. Cahier des charges de travail

La simulation électromagnétique ainsi que l'optimisation ont été conduites en utilisant le logiciel commercial CST MICROWAVE Studio. Plus de détails sur ce logiciel sont donnés en Annexe.

3.3 Antenne patch rectangulaire bi-bande

L'antenne conçue est une antenne patch bi-bande ($5 \times 5 \times 0.16 \text{cm}^3$). Le patch rectangulaire est imprimé sur un substrat de type FR4 ($h = 1.6\text{mm}$ et $\epsilon_r = 4.3$), ce dernier est placé sur un plan de masse partiel. Cette structure est alimentée par une ligne micro ruban d'impédance caractéristique 50Ω , de longueur L_f de largeur W_f . La Figure 3.1 illustre la structure rayonnante conçue avec ses différents paramètres.

Les paramètres géométriques de l'antenne conçue sont présentés dans le Tableau 3.2.

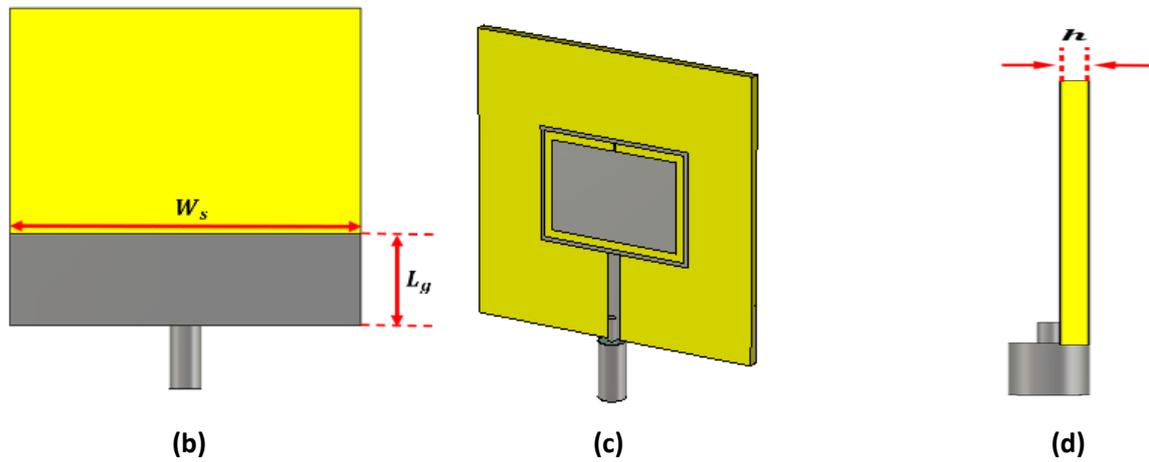
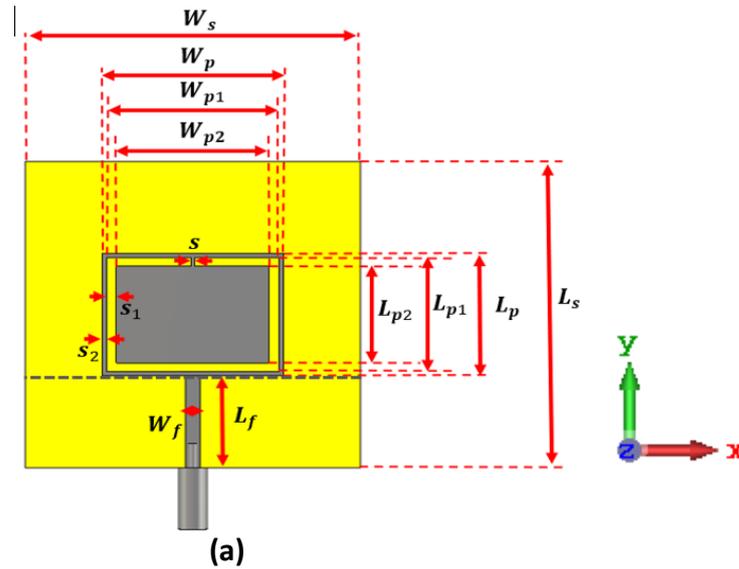


Figure 3. 1. Antenne patch proposée : **(a)** Vue de dessus **(b)** Vue de dessous **(c)** Vue perspective **(d)** Vue de coté

Paramètres	W_s	W_p	W_{p1}	W_{p2}	W_f	L_s	L_p	L_{p1}	L_{p2}	L_f	L_g	s	s_1	s_2	h
Longueurs (mm)	50	27	25.6	22.8	2.15	50	20	18.6	15.8	15	14.5	0.5	1.2	0.8	1.6

Tableau 3. 2. Dimensions de l'antenne proposée

3.3.1 Coefficient de réflexion

La Figure 3.3 présentent les résultats de simulation du coefficient de réflexion de l'antenne patch bi-bande. Ces résultats montrent que l'antenne proposée fonctionne dans deux bandes : [2690-3460] MHz et [5920-6440] MHz. On obtient ainsi des bandes passantes de $\Delta f_1 = 770\text{MHz}$ et $\Delta f_2 = 520\text{MHz}$ respectivement.

En ce qui concerne l'adaptation, on constate des niveaux de coefficient de réflexion de -35.41dB et -19.11 dB pour les deux fréquences de résonance de cette antenne : $f_{01} = 3.08\text{GHz}$ et $f_{02} = 6.18\text{ GHz}$ respectivement. Cela montre que cette antenne est bien adaptée dans ces deux bandes de fonctionnement.

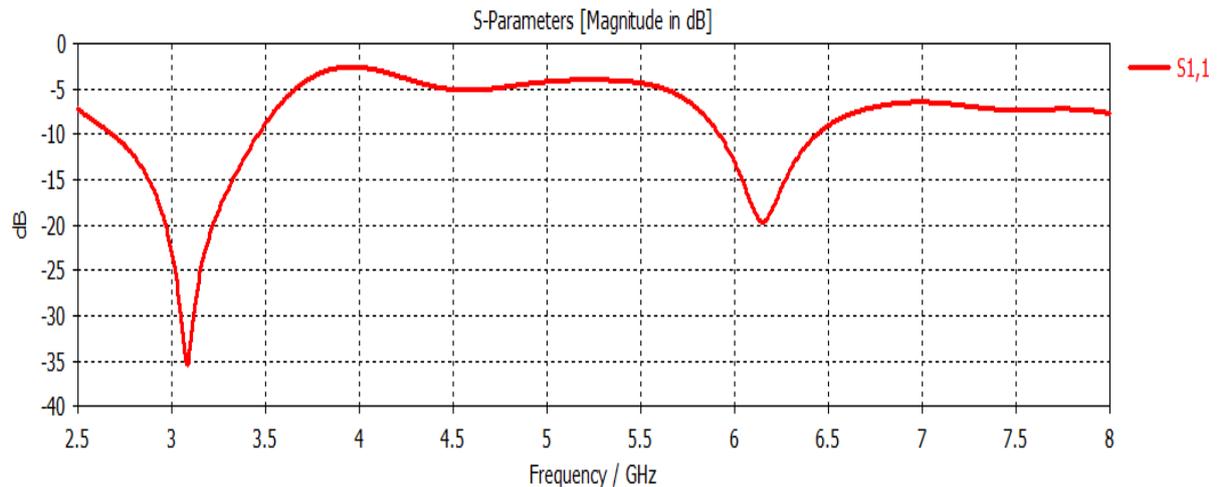


Figure 3. 2. Coefficient de réflexion simulé de l'antenne patch bi-bande

3.3.2 Gain

La Figure 3.3 montre la variation du gain broadside (Theta=Phi=0) de l'antenne patch bi-bande en fonction de la fréquence. Les valeurs de gain dans les bandes [2690-3460] MHz et [5920-6440] MHz sont récapitulés dans le Tableau 3.3.



Figure 3. 3. Variation du gain de l'antenne bi-bande en fonction de la fréquence.

Fréquences (GHz)	1 ^{ère} bande			2 ^{ème} bande		
	2.69	3.08	3.46	5.92	6.18	6.44
Gain (dBi)	+1.33	+2.56	+2.61	-7.81	-5.84	-8.42

Tableau 3. 3. Gain aux bandes de fréquences

D'après les résultats obtenues, on remarque un gain maximal de +2.61 dans la première bande et un gain maximal de -5.84dBi dans la seconde bande. Ces valeurs sont donc inférieures à celles requises dans le cahier des charges (>5dBi dans les deux bandes). Ces valeurs de gain seront par la suite améliorées en intégrant le réseau AMC.

3.3.3 Diagrammes de rayonnement

La Figure 3.4 représente les diagrammes de rayonnement 3D (en gain) simulés aux fréquences de résonance $f_{01} = 3.08\text{GHz}$ et $f_{02} = 6.18\text{GHz}$.

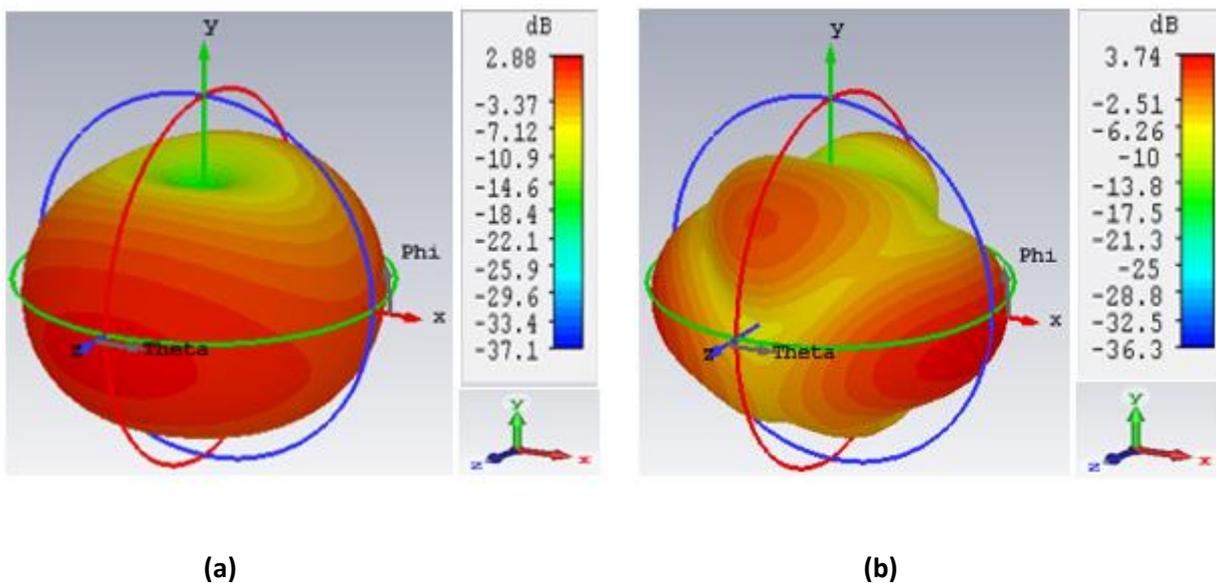
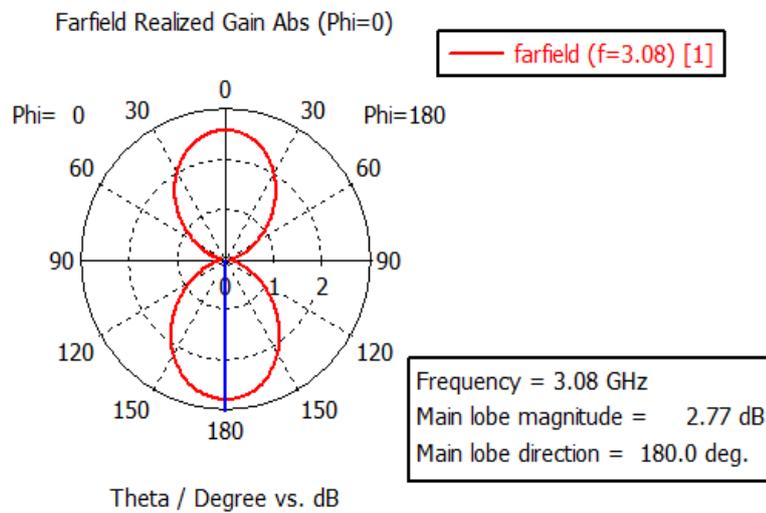
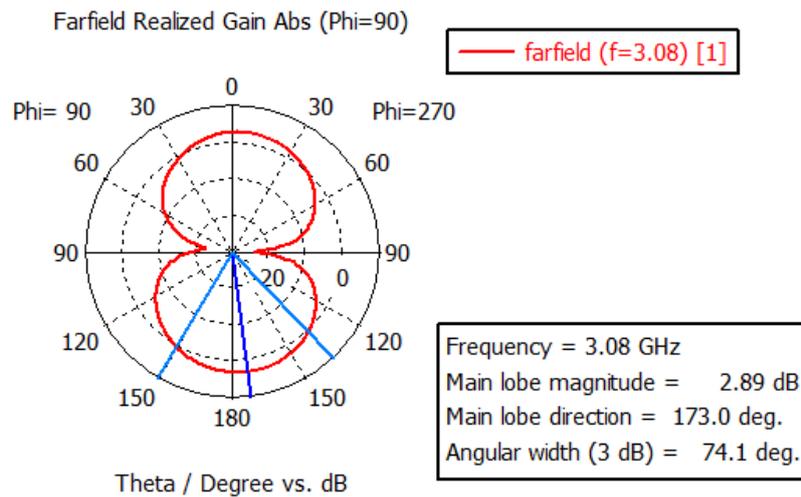


Figure 3. 4. Diagrammes de rayonnement en 3D aux fréquences : (a) $f_{01} = 3.08\text{GHz}$ (b) $f_{02} = 6.18\text{ GHz}$

La Figure 3.5 représente les diagrammes de rayonnement polaires à la fréquence $f_{01} = 3.08$ GHz, aux deux plans E et H. Les diagrammes dans ces deux plans sont relativement similaires avec un rayonnement de type bi-directionnel.



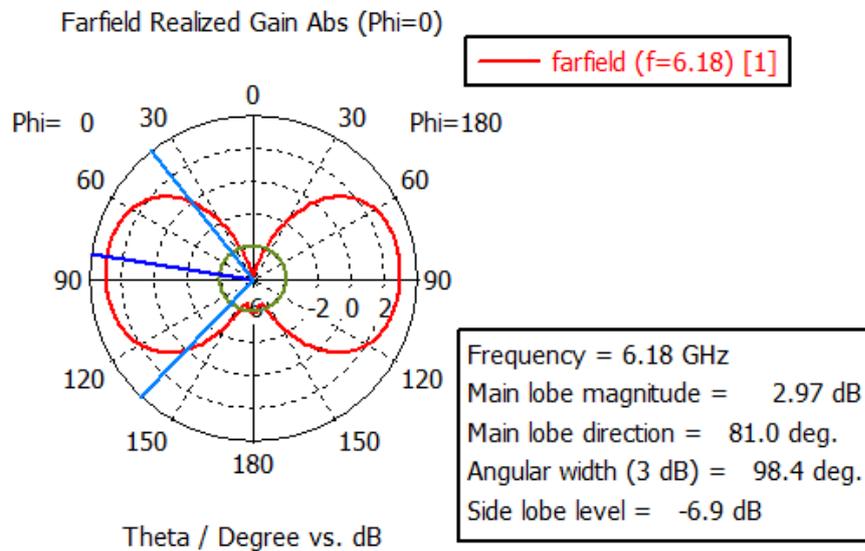
(a)



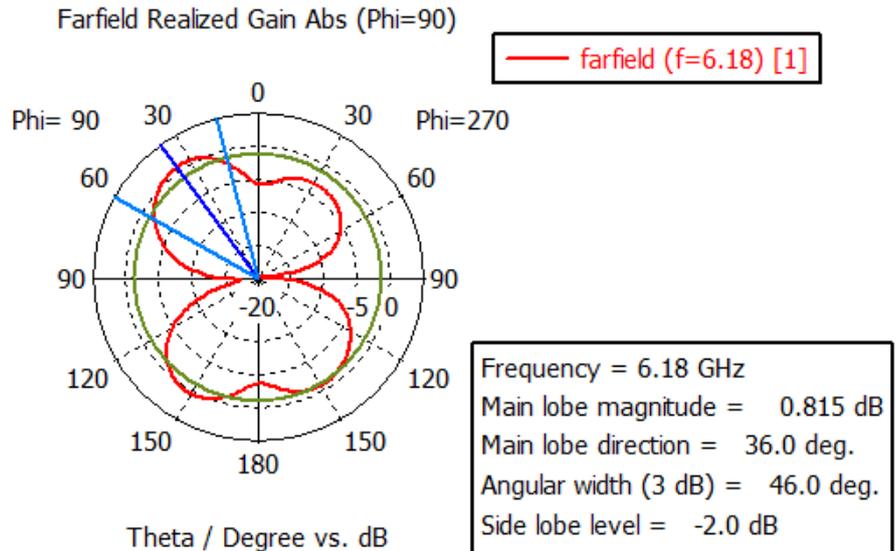
(b)

Figure 3. 5. Diagramme de rayonnement 2D polaire à $f_{01} = 3.08$ GHz pour (a) $\Phi = 0^\circ$ et (b) $\Phi = 90^\circ$.

La Figure 3.6 représente le diagramme de rayonnement polaire à la fréquence $f_{02} = 6.18$ GHz, aux deux plans E et H. On remarque la dégradation du diagramme à cette fréquence avec la formation de plusieurs maximums et minimums de rayonnement.



(a)



(b)

Figure 3. 6. Diagramme de rayonnement 2D polaire à $f_{02} = 6.18$ GHz : (a) $\phi = 0^\circ$ (b) $\phi = 90^\circ$.

Enfin, La forme des diagrammes obtenus à ces deux fréquences ne respectent pas le cahier des charges qui impose un diagramme unidirectionnel dans la direction broadside.

3.4 Antenne bi-bande avec réseau AMC

3.4.1 Cellules AMC

Nous avons dimensionné et étudié plusieurs cellules AMC bi-bandes. Deux cellules intéressantes parmi ces cellules ont été identifiées pour la formation du réseau AMC. La simulation électromagnétique de ces cellules a été réalisée avec CST en prenant des conditions aux limites périodiques afin d'imiter la forme périodique du réseau résultant.

3.4.1.1 Cellule AMC 1

La première cellule proposée est une cellule AMC bi-bande de type SRR, composée d'un motif carré métallique et d'une fente SRR. Le tout est imprimé sur un substrat de type FR4 (permittivité $\epsilon_r=4.3$ et une épaisseur de 3.2 mm) comme montrée par la Figure 3.7 (a). Le modèle de simulation CST de cette cellule est illustré par la Figure 3.7 (b). En fait, des murs électriques (PEC) et magnétiques parfaits (PMC) ont été imposés selon x et y. Un port de type guide d'ondes a été placé dans la région de champ lointain à +z pour exciter le signal tandis qu'un conducteur électrique parfait a été positionné à -z agissant comme plan de masse de la cellule unitaire. Les dimensions finales de la cellule bi-bande conçue sont résumées dans le Tableau 3.4.

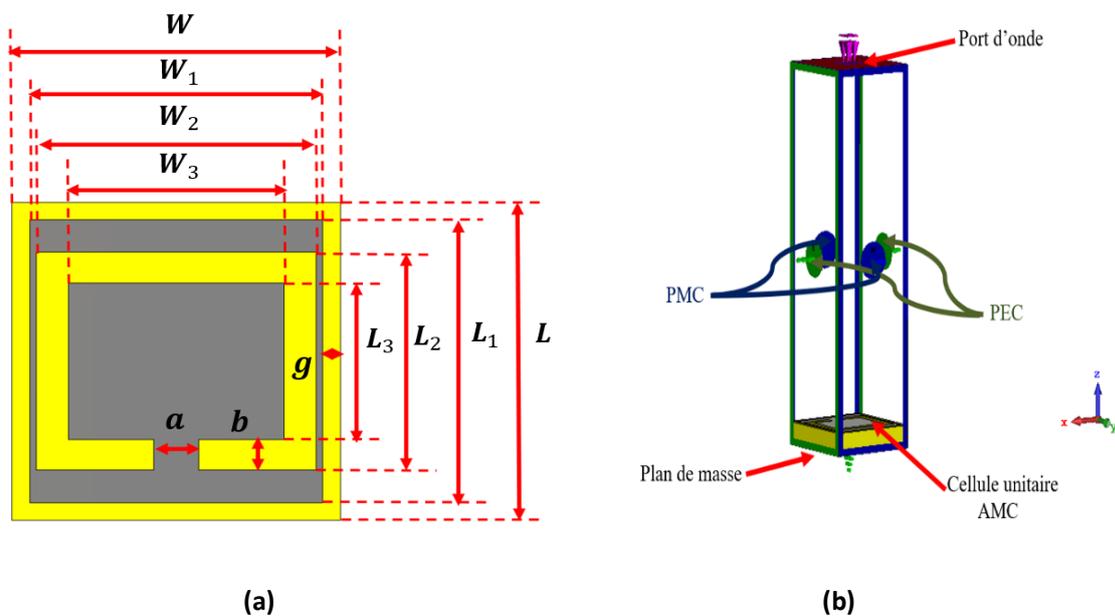


Figure 3. 7. Cellule AMC 1 : (a) Structure (b) Modèle de simulation

Paramètres	W	W_1	W_2	W_3	L	L_1	L_2	L_3	g
Longueurs (mm)	14.6	13	12.4	9.6	14.6	13	10	7.2	0.8

Les résultats de simulation en termes de phase du coefficient de réflexion de la cellule AMC 1 sont présentés par la Figure 3.8. D'après ces résultats, et en prenant les fréquences pour lesquelles la phase du coefficient de réflexion s'annule, on observe que la cellule SRR possède deux fréquences de résonance $f_{01} = 3.15\text{GHz}$ et $f_{02} = 6.45\text{ GHz}$. Les largeurs de bandes correspondantes à une phase du coefficient de réflexion comprise entre -90° et 90° sont [2.92 GHz à 3.35 GHz] et [6.14 à 6.75 GHz].

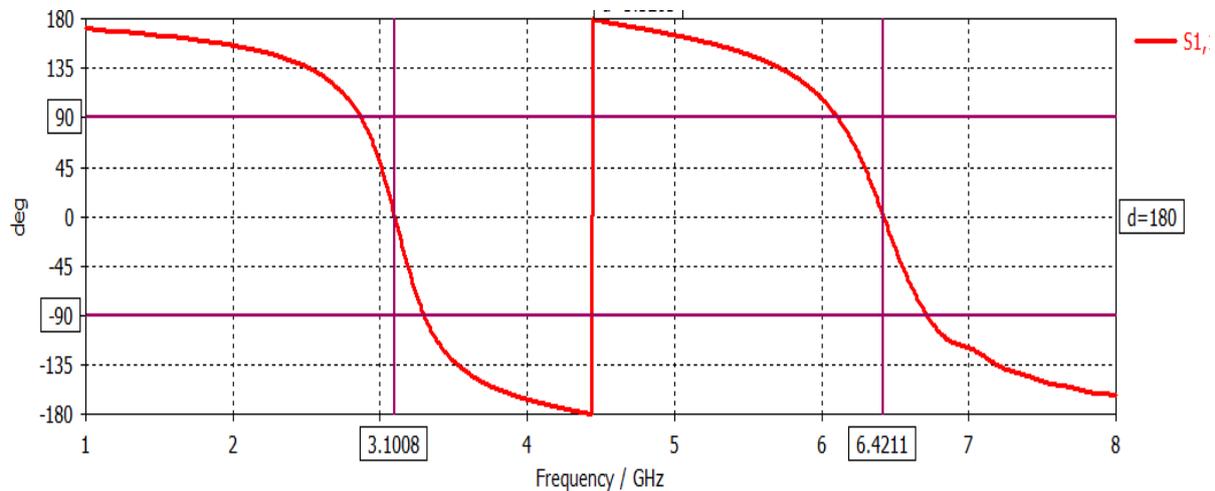


Figure 3.8. Phase du coefficient de réflexion de la cellule AMC 1

3.4.1.2 Cellule AMC 2

La deuxième cellule proposée est une cellule conductrice bi-bande de type Cross, incorpore un contour métallique carré avec des fentes latérales et centrales, se constitué d'une fente centrée de forme de croix. Le tout est imprimé sur un substrat de type FR4 (permittivité $\epsilon_r=4.3$ et une épaisseur de 3.2 mm) comme montré par la Figure 3.9 (a). Le modèle de simulation CST de cette cellule est illustré par la Figure 3.9 (b). Cette cellule fonctionne dans les bandes de fréquence [2960_3360] MHz et [6040_6370] MHz avec un substrat de type FR4 (permittivité $\epsilon_r=4.3$ et une épaisseur de 3.2mm). Les dimensions finales de la cellule bi-bande conçue sont résumées dans le tableau 3.5.

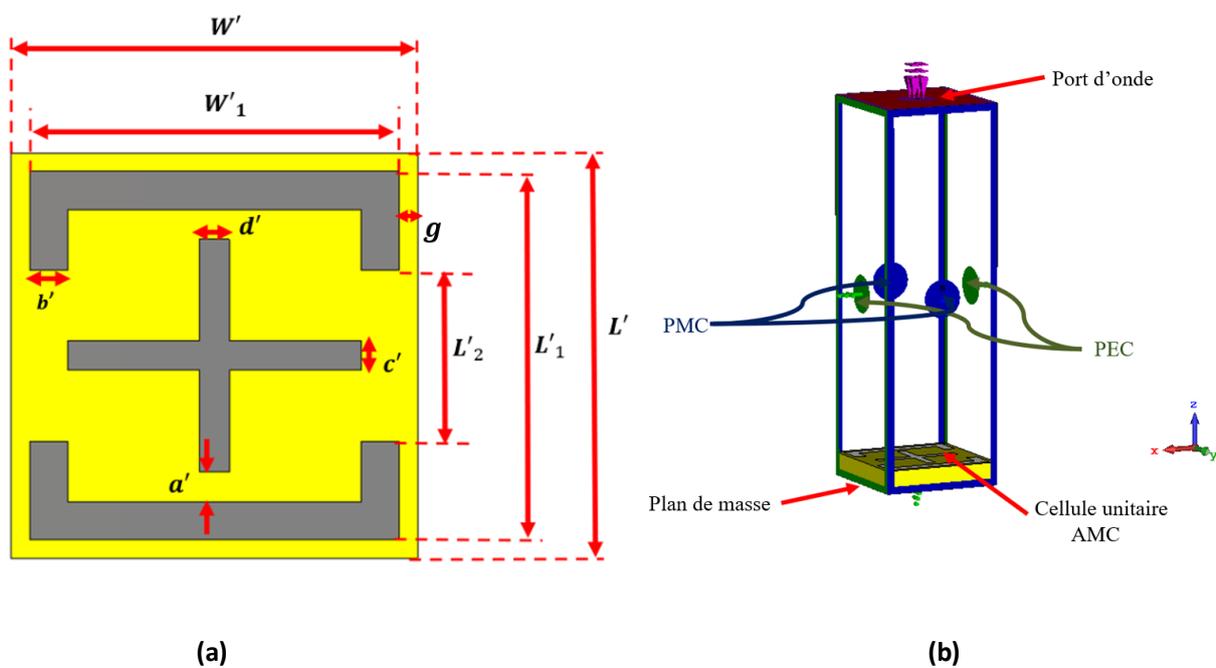


Figure 3. 9. Cellule AMC 2 : (a) Structure (b) Modèle de simulation

Les dimensions de cette cellule sont présentées sur le tableau 3.5 suivant :

Paramètres	W'	W'_1	b'	L'	L'_1	L'_2	g
Longueurs (mm)	16.5	15	1.55	16.5	15	7	0.75

Les résultats de simulation des phases du coefficient de réflexion de cette cellule sont présentés par la Figure 3.10. D'après ces résultats, et en prenant les fréquences pour lesquelles la phase du coefficient de réflexion s'annule, on observe que la cellule Cross possède deux fréquences de résonance $f_{01} = 3.17\text{GHz}$ et $f_{02} = 6.21\text{ GHz}$. Les largeurs de bandes correspondantes à une phase du coefficient de réflexion comprise entre -90° et 90° sont $[2.96\text{ GHz à }3.36\text{ GHz}]$ et $[6.04\text{ à }6.37\text{ GHz}]$.

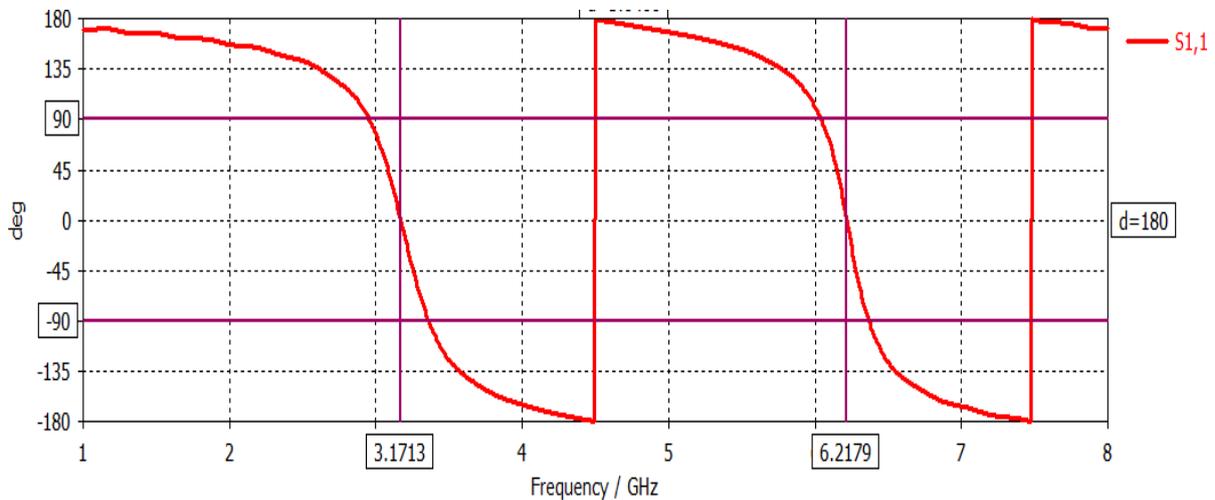


Figure 3. 10. Les phases du coefficient de réflexion de la cellule AMC 2

3.4.2 Réseau AMC

Dans cette partie, les deux cellules AMC dimensionnées précédemment vont être utilisées comme brique de base pour la construction de réseaux AMC. Ainsi, nous avons proposé deux réseaux AMC (voir Figure 3.11) de longueur $W_r=50\text{ mm}$ et largeur $L_r=50\text{mm}$, formés de 3×3 cellules des deux cellules précédentes : AMC 1 et AMC 2. Un gap entre cellules de $G_i = 2xg_i$ ($i=1$ ou 2 selon la cellule) est pris pour les deux réseaux AMC.

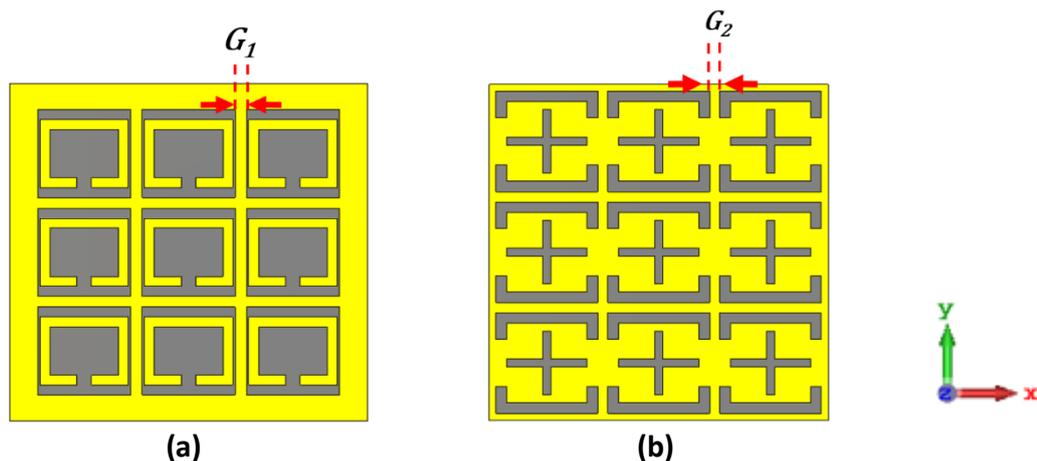


Figure 3. 11. Réseau AMC bi bande 3×3 à base de (a) cellule AMC 1 (b) cellule AMC 2

3.4.3 Intégration du réseau AMC avec l'antenne bi-bande

Les deux modèles AMC sont placés derrière l'antenne patch rectangulaire, séparés avec une couche d'air quelconque $h_a=2\text{mm}$. comme le montre la Figure 3.12

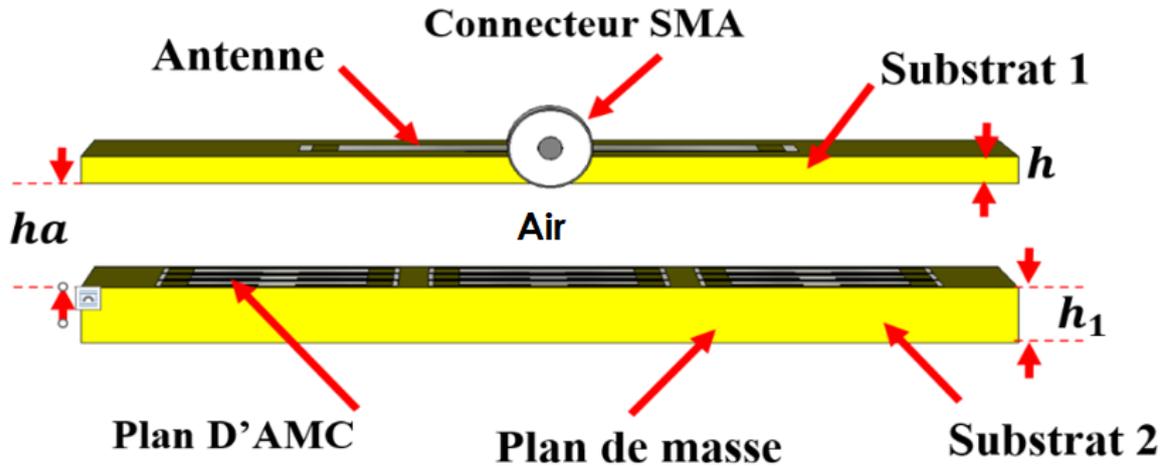
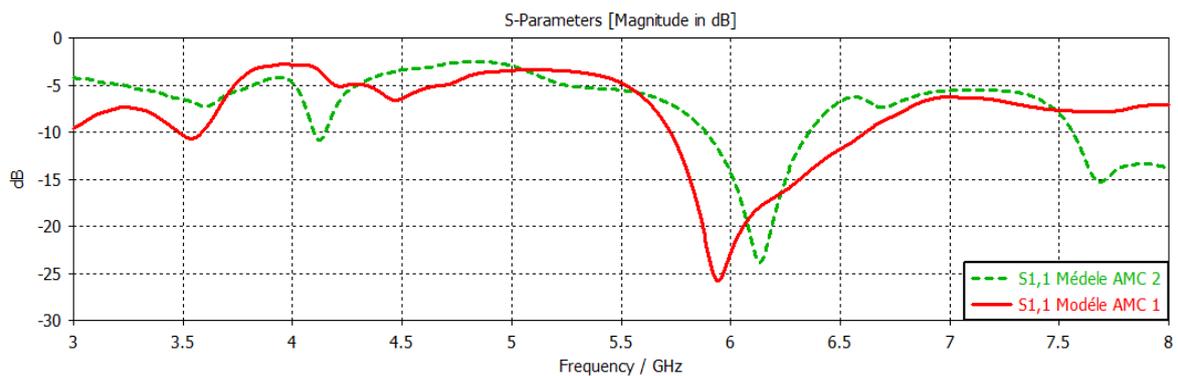
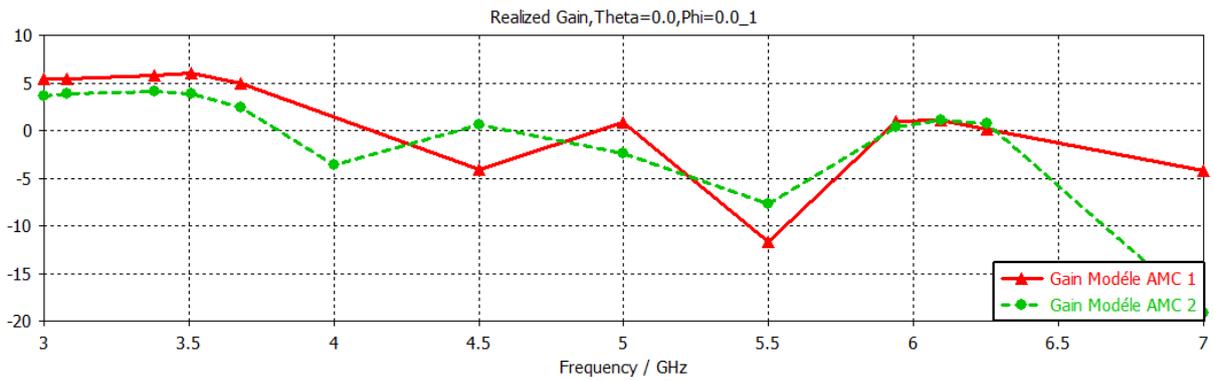


Figure 3. 12. Géométrie de la structure (antenne + réseau AMC)

La Figure 3.13 présente les résultats de simulation des deux modèles AMC avec l'antenne bi-bande et la différence des performances entre les deux structures. D'après les résultats de simulation obtenue, on peut observer que le gain et l'adaptation d'impédance de l'antenne bi-bande sont influencés par l'ajout des deux réseaux AMC dans les deux bandes de fréquences. Pour valider le meilleur réseau à étudier par la suite nous avons fait une comparaison de ses résultats.



(a)



(b)

Figure 3. 13. Comparaison entre les structures AMC 1 et AMC 2 : (a) Coefficient de réflexion (b) Gain

En ce qui concerne l'adaptation, par rapport au résultat de l'antenne bi-bande. On constate d'une part des niveaux de coefficient de réflexion de -10.66dB et -25.78dB pour les deux fréquences de résonance de la structure (antenne + modèle AMC1) f_{01} et f_{02} respectivement. De l'autre part des niveaux de coefficient de réflexion de -10.82dB et -23.74dB pour f_{01} et f_{02} de la structure (antenne + modèle AMC2)

En ce qui concerne gain. on remarque des valeurs de +6,01dBi et + 3.51dBi +1.13dBi pour f_{01} des structures (antenne +AMC 1) et (antenne +AMC2) respectivement. Des valeurs de +1.13dBi et+1.07dBi pour f_{02} structures (antenne + AMC1) et (antenne + AMC2) respectivement .

Enfin, on constate que la structure (antenne + AMC 1) a donné les meilleurs résultats en terme d'adaptation et du gain. Les performances de cette structure seront améliorées dans la démarches suivante.

3.4.4 Etude paramétrique de l'antenne bi bande avec le réseau AMC

Dans le but d'étudier l'influence de chaque paramètre sur les performances de la structure en terme d'adaptation et du gain, plusieurs études paramétrique sur l'antenne conçue précédemment seront présentées et discutée. Cette étude est réalisée en variant à chaque fois un paramètre et en gardant les autres paramètres constants. Les paramètres les plus influents sur la structure sont :

- La largeur du plan de masse de l'antenne (L_g)
- Le nombre de cellules
- La couche d'air (h_a)

3.4.4.1 La largeur du plan de masse de l'antenne (L_g)

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour les différentes valeur de la largeur de plan de masse de l'antenne $L_g=14.5, 13, 11.5, 10\text{mm}$ sont représentés par la Figure (3.14)

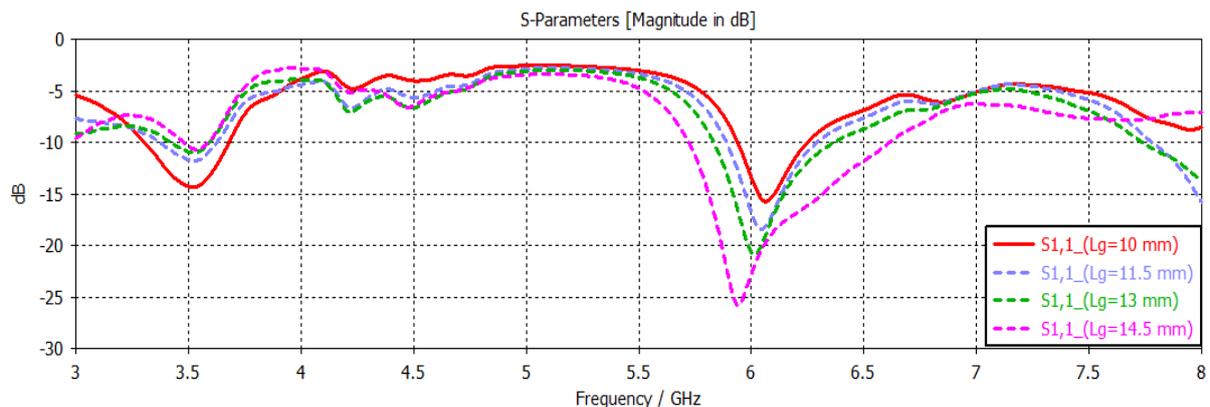


Figure 3. 14. Influence de la valeur de L_g sur les coefficients de réflexion

On observe que les deux bandes passantes d'impédance sont plus étroite et plus adaptées en variant L_g de 14.5mm à 10mm, Le niveau du coefficient de reflexion est diminué de -10.66dBi à -14.8dBi et de -15.2dBi à -25.8dBi dans la première la deuxième bande de fréquence respectivement

Les résultats de simulation du gain en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs de la largeur de plan de masse de l'antenne ($L_g = 14.5, 13, 11.5, 10\text{mm}$) sont représentés par la Figure (3.15).

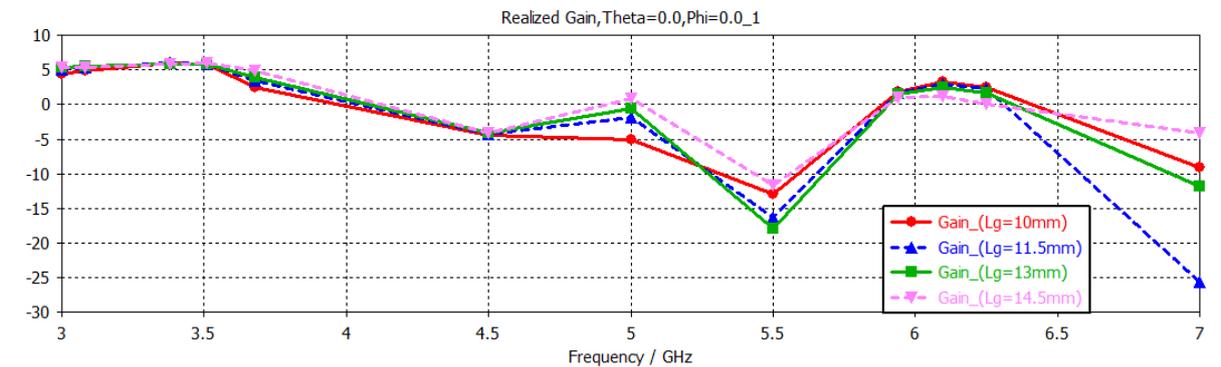


Figure 3. 15. Influence de la valeur L_g de sur le gain

On constate que le gain est améliorée en variant L_g de 14.5mm à 10mm, il est réduit de 6,02dBi à 5,8dBi dans la première bande. Par contre, il est augmenté de +1,13dBi à +3,36dBi dans la deuxième bande de fréquence de résonance.

On peut observer globalement que la réduction de L_g optimise les performances de cette structure et la meilleure largeur du plan de masse de l'antenne de cette structure est 10mm

3.4.4.2 Le nombre de cellules

Nous avons conçus des réseaux AMC avec des nombres de cellules plus grands. Les résultats de simulation du coefficient de réflexion et du gain en fonction de la fréquence pour les différents nombre de cellules du réseau AMC (3x3, 5x5, 7x3) sont représentés par les Figures 3.16 et 3.17 respectivement.

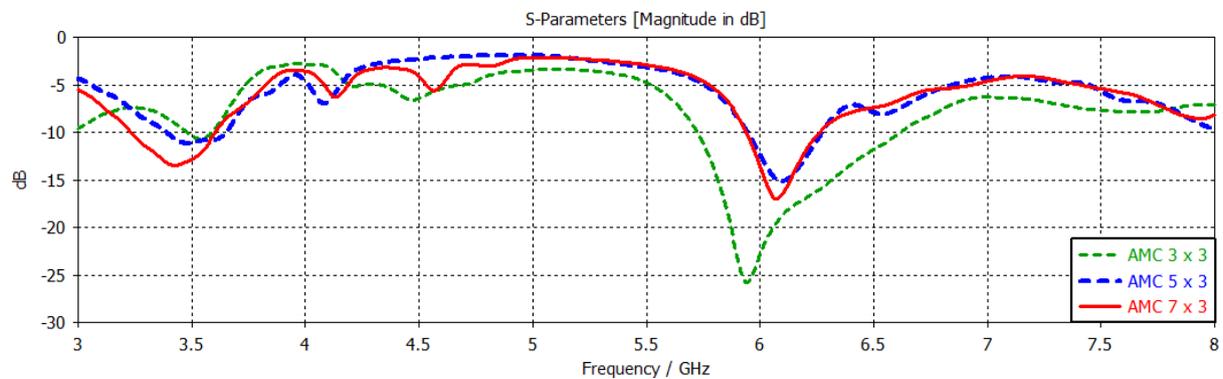


Figure 3. 16. Influence de nombre de cellules sur les coefficient de réflexion

On constate que les niveaux de coefficient de réflexion varie de -10.66dB à -13.47dB et de -25.78 dB à -16.99dB dans la premiere et la deuxième bande de fréquence respectivement.

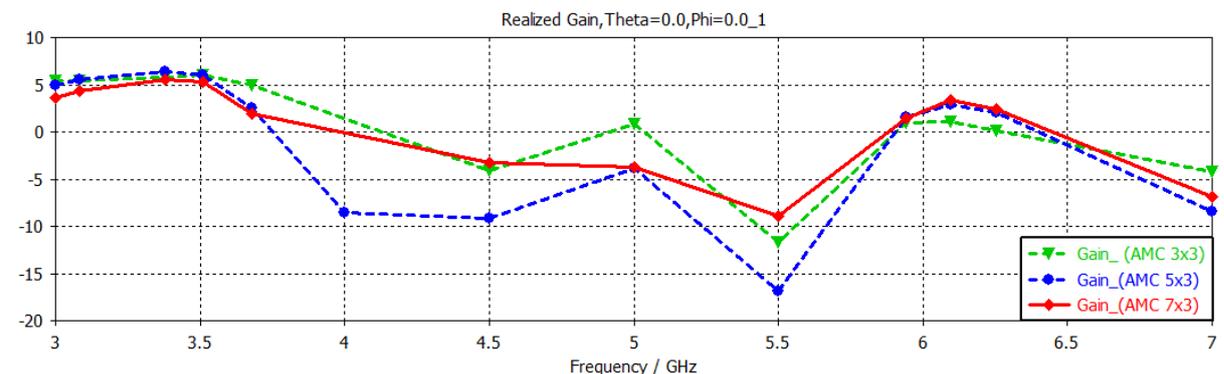


Figure 3. 17. Influence de nombre de cellules sur le gain.

On constate que les valeurs du gain varies de +6.01dBi à +5.27dBi et de +1.13dBi à + 3.37dBi dans la premiere la deuxième bande de fréquence respectivement. La simulation du réseau de 7x3 cellules AMC a donné les meilleurs résultats en terme du gain et d'adaptation et du gain des deux bandes passantes de fréquences de résonance.

3.4.4.1 La couche d'air (h_a)

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion et du gain en fonction de la fréquence pour des différentes valeurs de couche d'air AMC ($h_a=2, 4, 6, 8$) entre l'antenne bi-bande et le réseau AMC sont représentés par les Figures 3.18 et 3.19 respectivement.

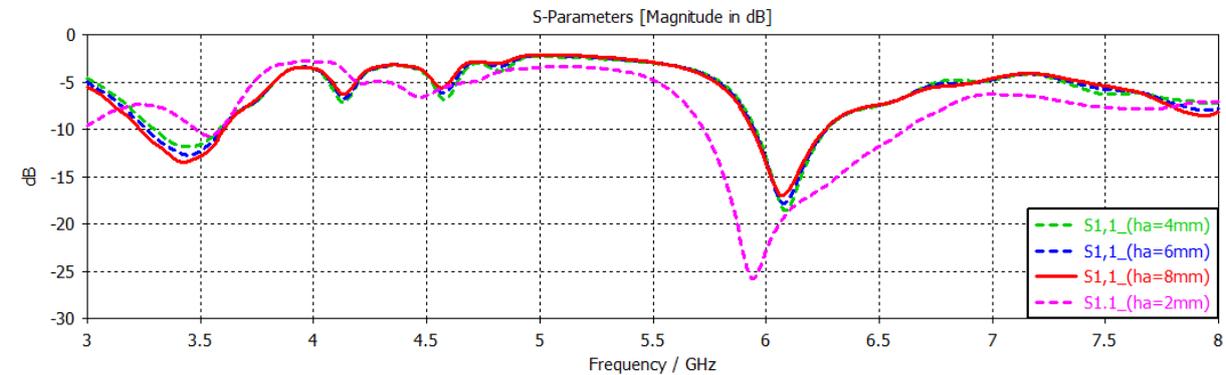


Figure 3. 18. Effet de variation de nombre de cellules sur le coefficient de réflexion

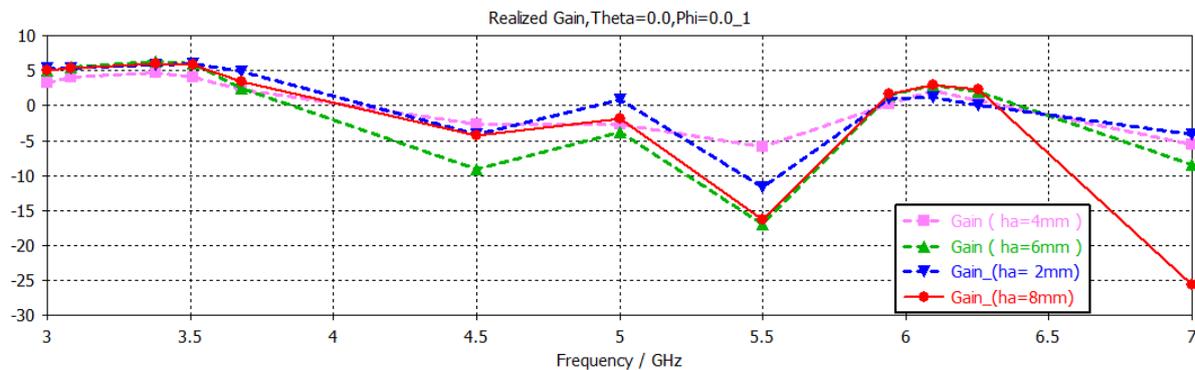


Figure 3. 19. Effet de variation de nombre de cellules sur le gain

On constate que les valeurs du gain varient de +6.01dBi à +5.82dBi et de +1.13dBi à +3.04dBi dans la première et la deuxième bande de fréquence respectivement. Alors la couche d'air la plus optimale des deux performances de la structure est $h_a=8\text{mm}$

D'après les études paramétriques effectuées précédemment, les valeurs retenues pour notre structure sont : $L_g=10\text{mm}$, nombre de cellules = 7×3 cellules, $h_a=8\text{mm}$.

3.4.5 Validation de la structure (antenne + réseau AMC)

En prenant en considération tous les paramètres optimaux précédents et en feront d'autres études paramétriques de l'antenne dans le système (antenne patch + réseau AMC), nous avons conçu la structure final de réseau AMC avec l'antenne bi-bande présenté par la Figure 3.20 Les paramètres géométrique cette structure sont récapitulé dans le Tableau 3.7

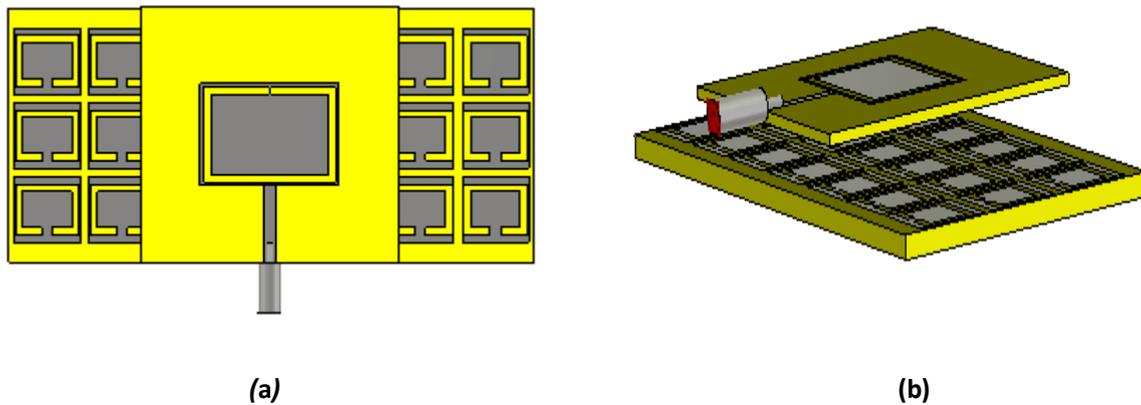


Figure 3. 20. Structure (antenne + réseau AMC 7x3) (a) vue de dessous (b) vue perspective

Paramètres	W	W_1	W_2	W_3	L	L_1	L_2	L_3	a	b	g	W_r	h_a
Longueurs (mm)	14.6	13	12.4	9.6	14.6	13	10	7.2	2	1.4	0.8	102.6	8

Paramètres	W_s	W_p	W_{p1}	W_{p2}	W_f	L_s	L_p	L_{p1}	L_{p2}	L_f	L_g	s	s_1	s_2	h
Longueurs (mm)	50	27	25.6	22.8	2.15	50	20	18.6	15.8	15	10	0.3	1.4	0.7	1.6

Tableau 3. 4 . Dimension de la structure (antenne + réseau AMC) final

3.4.5.1 Coefficient de réflexion

Les résultats de simulation finale du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de résonance sont présentés par la Figure 3.21

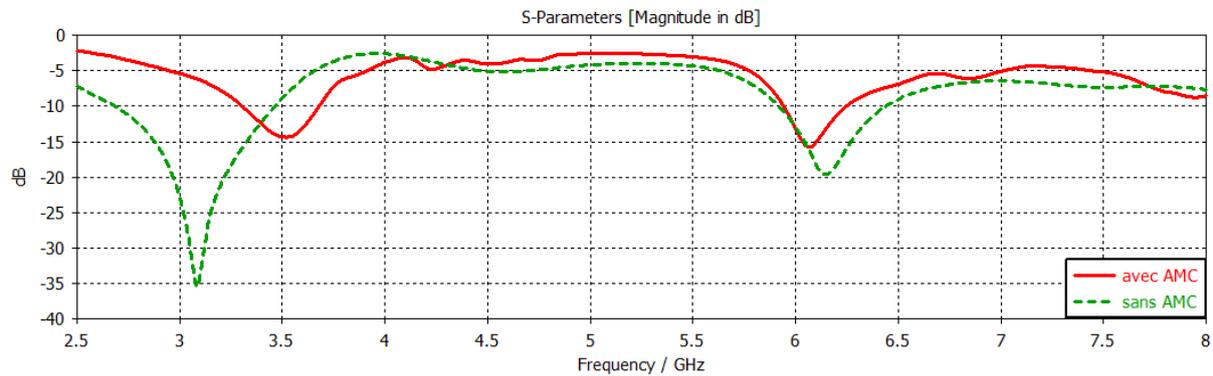


Figure 3. 21. Coefficient de réflexion du système (antenne + AMC)

Les résultats obtenus montrent que le système (antenne +AMC) fonctionne dans les bandes [3310_3680] MHz et [5540_6250] MHz. Donc : $\Delta f_1 = 370\text{MHz}$ et $\Delta f_2 = 310\text{MHz}$

Les deux fréquences centrales de résonance de ce système sont :

$$f_{01} = 3.49\text{GHz} \text{ et } f_{02} = 6.095 \text{ GHz}$$

Le tableau suivant montre les résultats d'adaptation obtenus aux fréquences de résonances f_{01} et f_{02}

Fréquences (GHz)	3.49	6.095
S_{11} (dB)	-14.35	-15.74

Tableau 3. 7 . Niveaux du coefficient de reflexion aux fréquences de résonance

3.4.5.2 Le gain

Les résultats de simulation finale du gain (dB) en fonction de la fréquence de résonance sont présentés par la Figure 3.22

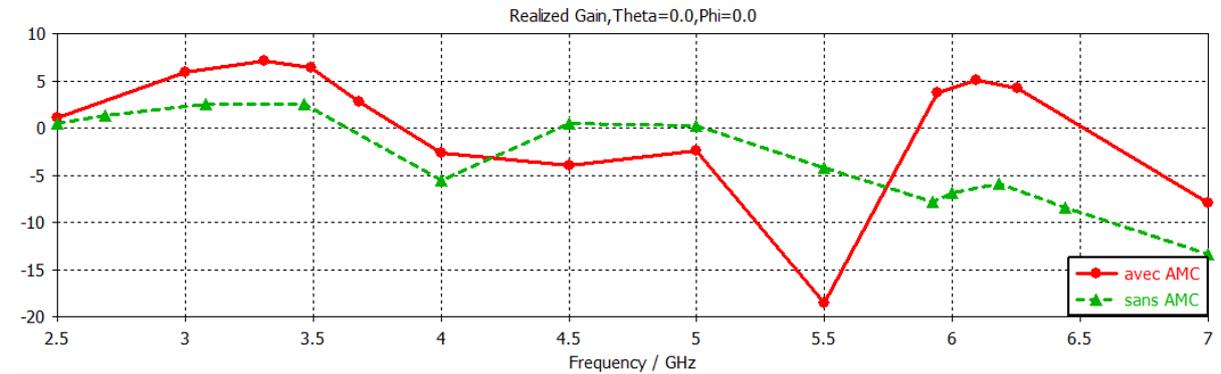


Figure 3. 22.Gain du système (antenne + AMC)

Les gains aux fréquences [3310_3680] MHz et [5940_6250] MHz sont récapitulés dans le Tableau 3.8.

Fréquences (GHz)	1 ^{ère} bande			2 ^{ème} bande		
	3.31	3.49	3.68	5.94	6.095	6.25
Gain (dBi)	+6.88	+6.39	+2.84	+7.81	+5.05	+4.16

Tableau 3.8. Gain aux bandes de fréquences du système

D'après les résultats obtenues, on remarque des gains de +6.39dBi et 5.05dBi avec des améliorations de 3.83dBi et 10.89dBi pour les deux fréquences de résonnance résultantes respectivement. Ces valeurs sont donc supérieures à celles requises dans le cahier des charges (>5dBi dans les deux bandes)

Le Tableau 3.9 présente une comparaison des résultats de simulation en terme de gain de l'antenne bi bande sans AMC avec les structures : (antenne + réseau AMC1),(antenne + réseau AMC2) et (antenne + réseau AMC final)

	Valeurs de gain (dBi)					
	1 ^{ère} bande			2 ^{ème} bande		
Antenne sans réseau AMC	+1.33	+2.56	+2.61	-7.81	-5.84	-8.42
Antenne + réseau AMC 1	+5.84	+6.01	+4.96	+1.01	+1.13	+0.13
Antenne + réseau AMC 2	+4.16	+3.51	+2.44	+0.40	+1.07	+0.79
Antenne + réseau AMC final	+6.88	+6.39	+2.84	+7.81	+5.05	+4.16

Tableau 3.9. Comparaison des résultats du gain de l'antenne bi bande sans AMC avec les trois structure (antenne + réseau AMC)

3.4.5.3. Diagrammes de rayonnement

Le diagramme de rayonnement en 3D est représenté dans la figure 3.23, il est simulé au fréquence f_{01} et f_{02} . Les diagrammes dans ces deux plans sont relativement similaires avec un rayonnement de type bi-directionnel.

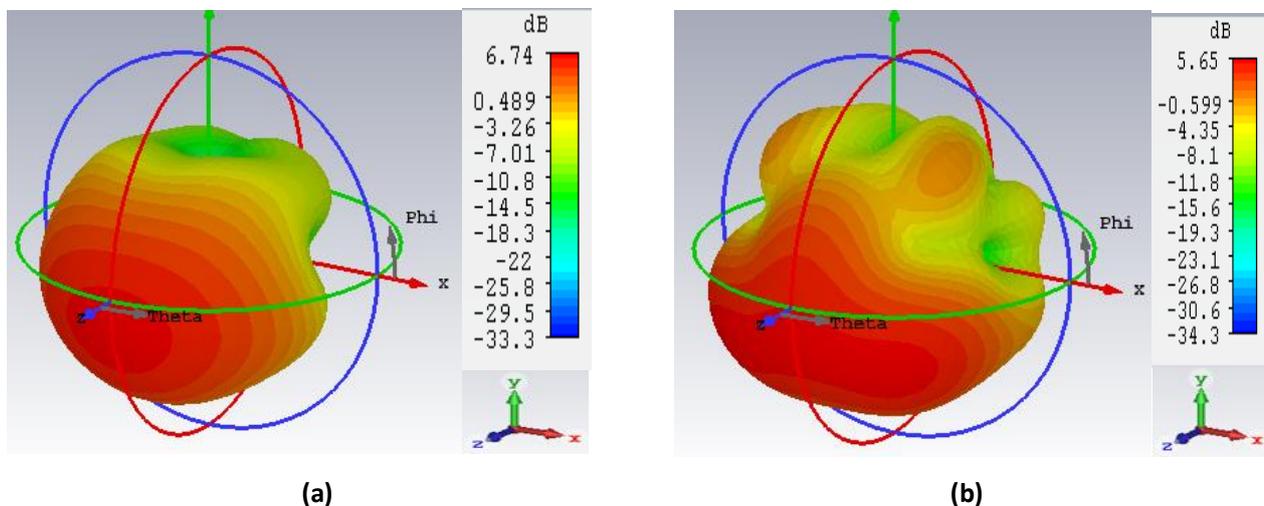


Figure 3. 23. Diagramme de rayonnement en 3D au fréquences de résonance :

(a) $f_{01} = 3.49\text{GHz}$ (b) $f_{02} = 6.095\text{ GHz}$

La Figure 3.24 représente le diagramme de rayonnement polaire à la fréquence $f_{01} = 3.49\text{GHz}$, pour $\text{Phi} = 90^\circ$ dans ce cas, le lobe principale à la direction $\text{Theta} = 10^\circ$ et pour $\text{Phi} = 0^\circ$ le lobe principale à la direction $\text{Theta} = 0^\circ$.

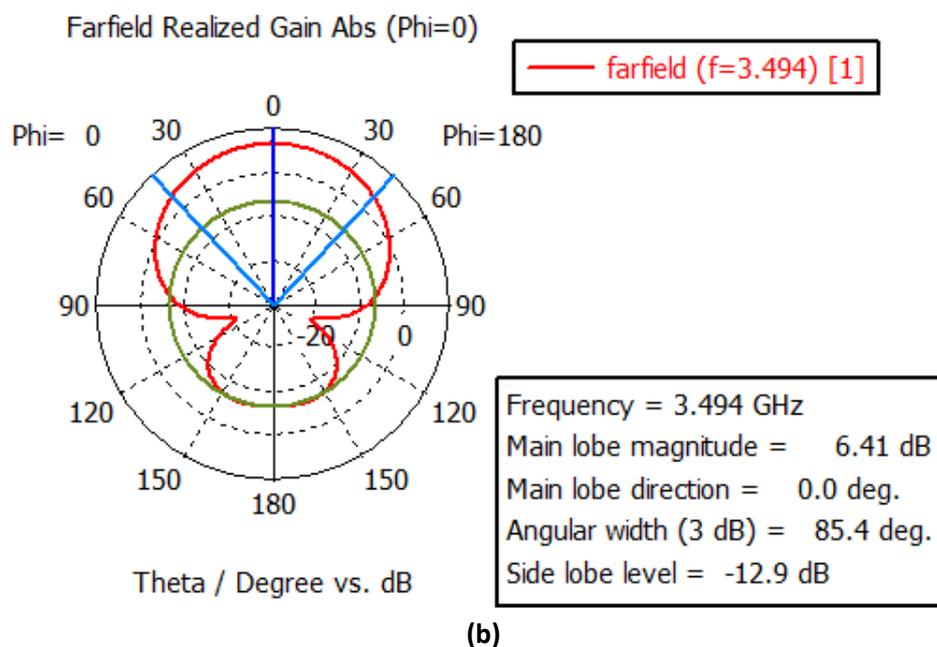
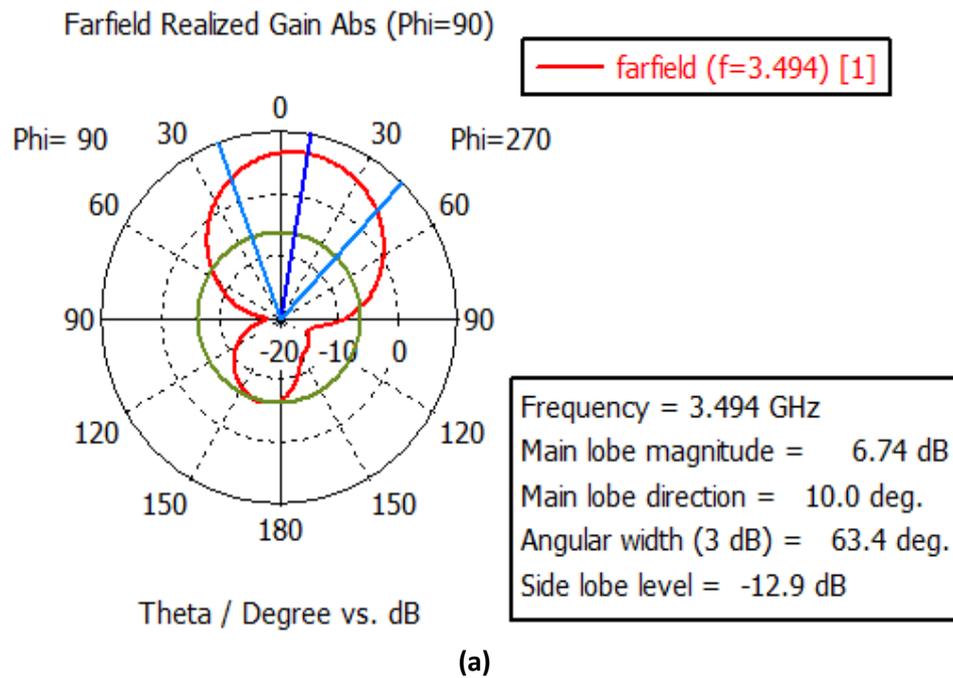
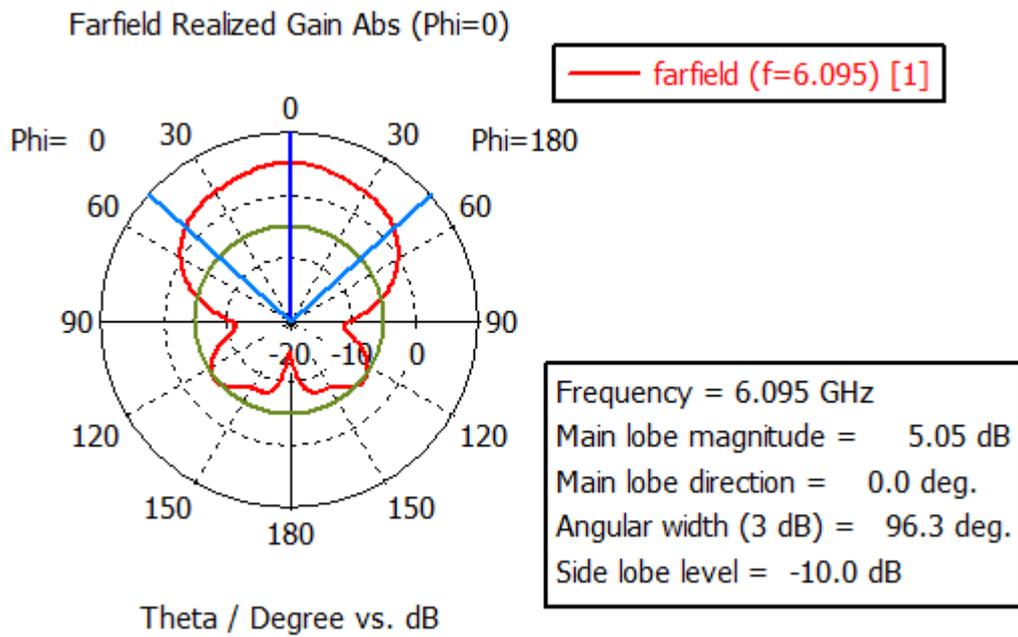
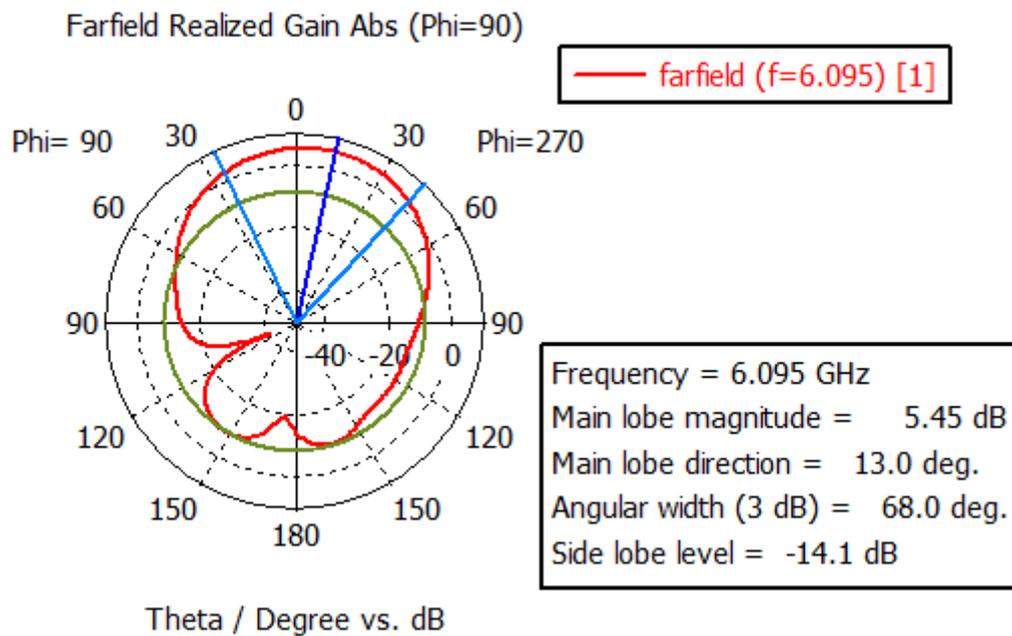


Figure 3. 24. Diagramme de rayonnement polaire à $f_{01} = 3.49\text{GHz}$ (a) $\text{phi} = 90^\circ$ (b) $\text{phi} = 0^\circ$.

La Figure 3.27 représente le diagramme de rayonnement polaire est à la fréquence $f_{02} = 6.095$ GHz, pour $\text{Phi} = 90^\circ$ dans ce cas, le lobe principale à la direction $\text{Theta} = 36^\circ$ et pour $\text{Phi} = 0^\circ$ le lobe principale à la direction $\text{Theta} = 0^\circ$.



(a)



(b)

Figure 3. 25. Diagramme de rayonnement polaire à $f_{02} = 6.095$ GHz (a) $\text{phi} = 0^\circ$ (b) $\text{phi} = 90^\circ$.

Enfin, La forme des diagrammes obtenus à ces deux fréquences respecte le cahier des charges qui impose un digramme unidirectionnel dans la direction broadside.

3.4.6 Conclusion

Ce chapitre a commencé par la conception et la simulation d'une antenne bi-bande en technologie imprimée. Ensuite, deux cellules AMC bi-bandes ont été proposées et comparées. Enfin, un réseau AMC a été intégré comme plan réflecteur à l'antenne bi-bande afin d'améliorer ses performances en rayonnement. Les résultats de simulation obtenus ont montré une amélioration en terme d'adaptation et de gain conformément au cahier des charges initialement fixé.

Conclusion générale

Les télécommunications sans fils, avec une forte demande en termes de débit et de qualité de l'information, nécessitent un système de communication de performances élevés. Les travaux de recherches sur les antennes microbandes se focalisent ces dernières années sur l'utilisation de nouveaux matériaux avec des caractéristiques spécifiques, comme les métamatériaux qui ne sont pas disponibles dans la nature, permet ces matériaux la cellule AMC (Artificial Magnetic Conductor) qui a été utilisé dans ce travail. Après la conception et la simulation d'une antenne bi-bande.

Dans un premier temps, nous avons présentés un bref aperçu sur les antennes en donnant leur définition, leurs différentes applications, ainsi que ses principales caractéristiques. Une description des antennes imprimées a été aussi donnée en citant ses différentes techniques d'alimentation. Par la suite l'étude a été menée sur les techniques d'alimentation des antennes multi-bandes.

Ensuite, on a approfondi notre recherche sur les conducteurs magnétiques artificiels (AMC) en donnant leurs historique, ainsi que ses propriétés et applications. L'utilisation des AMC dans le domaine des antennes a été également adressée.

L'étape de la conception et simulation électromagnétique d'antenne bi-bande 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. Deux types d'AMC ont été ensuite intégrés sur cette antenne dans le but d'améliorer ses performances. Une structure intéressante permettant une amélioration de la bande passante, le gain et la direction du rayonnement tout en respectant le cahier des charges identifiée.

Annexe

A.CST MICROWAVE STUDIO

A.1. Présentation du logiciel

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et développement dans les solutions de calcul les plus efficaces et les plus précises pour les conceptions électromagnétiques 3D. CST MWS est spécialisé dans la fourniture de simulation électromagnétique 3D rapide et précise des problèmes de haute fréquence [39].

Le logiciel utilise la théorie de l'intégration finie la FIT (Finite Integration Technique) qui a été développée par Thomas Weiland lors de sa thèse universitaire à Darmstadt en 1977. Il s'agit de la reformulation des équations intégrales de Maxwell sous une forme discrète afin de les rendre compatibles avec l'informatique pour résoudre des problèmes à géométrie complexe [39].

Afin de pouvoir répondre à toutes les demandes de simulation concernant le domaine de l'électromagnétisme, CST possède plus d'une dizaine de solveurs numériques. Ces solveurs sont tous adaptés à un domaine en particulier : on retrouve notamment des solveurs temporels et fréquentiels pour ce qui concerne les hautes et basses fréquences, un solveur intégral et asymptotique pour tout ce qui traite des larges structures. On retrouve enfin d'autres solveurs comme des solveurs multi physiques (thermique et fluide) ainsi qu'un solveur statique [40].

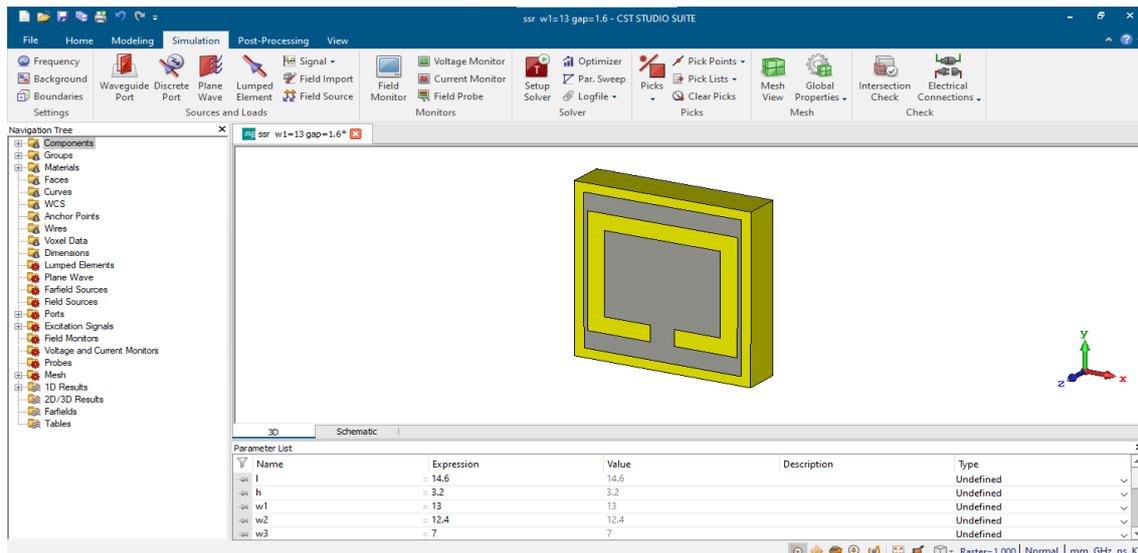


Figure A. 1. L'interface principale de CST MICROWAVE Studio.

A.2. La méthode utilisée pour la simulation de cellule sur CST

Il est crucial de définir les conditions aux limites appropriées pour dimensionner l'AMC et 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 pris en compte. 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. Ces conditions aux limites sont spécifiées à l'aide du logiciel CST comme vue à la Figure A.2.

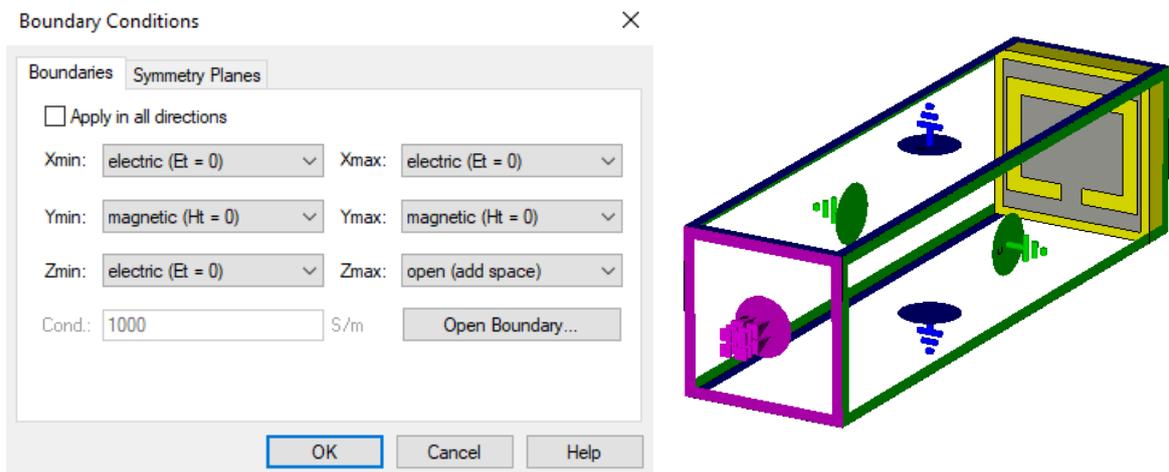


Figure A. 2. Conditions aux limites de la structure AMC.

Bibliographie

- [1] Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue, Mémoire " Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique". Présenté À L'université Du Québec À Chicoutimi ; Par Hamid C Horfi Mai2012
- [2] Support de court "système de communication " Réalisé par : Ben Salem Jamel Décembre 2014, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul
- [3] Mémoire de Fin d'Etudes "Conception et simulation d'une antenne micro ruban", Présenté par MOUNIB Hicham encadré par Dr. HAMAIZIA Zahra juin 2012.
- [4] A. Boyer, « Antennes », Support de Cours Enonce De Travaux Dirigés, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 5 ème Année Réseau et Télécom, octobre 2011.
- [5] Hedi RAGAD, "Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF", Thèse de Doctorat, 'Université de Tunis El Manar Tunisie, novembre 2013
- [6] O. PICON et COLL : «Les antennes Théorie, conception et application», Préface de Maurice Bellanger.
- [7] ZITOUNI Ahmed, "Etude et conception d'antennes ULB standards et à bandes rejetées", Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, Juin 2014.
- [8] Oumy DIOP, "Etude et Minimisation du Facteur de Qualité d'Antennes Miniatures conçues pour de Petits Objets Communicants", Thèse de Doctorat, Université De Nice-Sophia Antipolis, Septembre 2013.
- [9] thème Etude et Simulation d'une Antenne Micro-ruban Ultra Large Bande Soutenu publiquement le /06/ 2018 par : MAALOUL Elhadi et HAMADOU Akram
- [10] C. A. Balanis «Antenna theory Analysis and Design, Third Edition » John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [11] AZZAZ RAHMANI Salima, " ANALYSE ET CONCEPTION DES ANTENNES IMPRIMEES MULTIBANDES EN ANNEAUX CONCENTRIQUES POUR LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS", Thèse De Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, Juillet 2013.

- [12] 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.
- [13] ABLA BEHLOUL, " Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Avril 2010
- [14] Rabia Yahya, " 'Etude et la réalisation des antennes ultra-LARGE BANDE À DOUBLE POLARISATION". Mémoire pour l'obtention grade Maître ès sciences, Université du Québec INRS- ÉMT, 2011
- [15] KAID OMAR Omar, " Conception et modélisation d'une antenne pour les communications pour -Ultra Large Bande-" thèse doctorat, Université Des Sciences Et De Technologie D'Oran, avril 2013
- [18] OSTWALD (L.T.) et SCHROEDER (K.J.). – Missile Base Mounted Microstrip Antennas. IEEE Transaction on Antennas GARVIN (C.W.), MUNSON (R.E.) and no 5 p. 604-610 sept. 1977. Propagation, vol. 25.
- [16] G. Kossiavas A. Papiernik C. Luxey, R. Staraj. Antennes imprimées - bases et principes. Techniques de l'ingénieur, 2007.
- [17] A. Kamil, Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 GHz-10.6 GHz), grade du Maitre ès sciences (M.Sc), Université du Québec, 2011.
- [18] Sami Hebib, « Nouvelle topologie d'antennes multibandes pour applications spatiales », Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III- Paul Sabatier-2008.
- [19] Aliou DIALLO, « Systèmes Multi-Antennes Pour Diversité Et Mimo », thèse doctorat de l'université De Nice-Sophia Antipolis UFR sciences, 28 Novembre 2007
- [20] Mémoire de fin de cycle "Métamateriaux, applications aux antenne pour la téléphonie mobile" Présenté par M.DJERROUD Tarik encadré par M elle D. HAMZAoui 2013
- [21] Cyril LUXEY, « Solutions antennaires pour petits objets communicants et techniques de caractérisation associées », thèse doctorat de l'université NICE SOPHIA ANTIPOLIS, 21 Novembre 2008.

- [22] Fabrice LINOT, « Apport des Surfaces à Haute Impédance à la conception d'antennes réseaux compactes et d'antennes réseaux à très large bande passante », thèse doctorat de l'Institut des sciences et technologie de Paris, 7Avril 2001.
- [23] Shruti Karkare, Kavita Tewari, "Design of a Rectangular Microstrip Antenna with Artificial Magnetic Conductor Ground Plan", Chembur, Mumbai, November 2014.
- [24] Y Coulibali, "Étude et réalisation d'antenne hybride à base de résonateur diélectrique pour les systèmes de communications sans fils" thèse de doctorat. INRS 20
- [25] 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.
- [26] R. CHIKHI, «Conception d'une antenne directive large bande pour des applications aérospatiales », Mémoire de fin d'étude, Université SAAD DAHLAB, BLIDA, 2019/2020.
- [27] Nebil Kristou, Étude et conception de métamatériaux accordables pour la miniaturisation d'antennes aux fréquences micro-ondes, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France, Juillet 2018.
- [28] J. Wu, B. Wang, W. S. Yerazunis, and K. H. Teo, 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT), 155 (2013).
- [29] O. Luukkonen, C. Simovski, G. Granet, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A. V. Raisanen, and S. A. Tretyakov, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 56, 1624 (2008).<https://doi.org/10.1109/tap.2008.923327>Crossref
- [30] H. Kamoda, S. Kitazawa, N. Kukutsu, and K. Kobayashi, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 63, 4408 (2015).<https://doi.org/10.1109/tap.2015.2459132>Crossref
- [31] J. Lawson, D. C. Yates, and P. D. Mitcheson, 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 1 (2015).
- [32] Conference: 17ème Journées Nationales Microondes At: Brest, France. Authors: Lana Damaj & Lila Mouffok
- [33] Y. Dong, H. Toyao and T. Itoh, "Miniaturized zeroth order resonance antenna over a reactive impedance surface," 2011 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Hong Kong, 2011, pp. 58-61.

- [34] Ricardo Marques, Ferran Martin and Mario Sorolla, « Metamaterials with Negative Parameters Theory, Design, and Microwave Applications », livre, A John Wiley & Sons, 2008.
- [35] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. Broas, N. Alexopolous, and E. Yablonovitch, “High impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, pp. 2059–2074, nov. 1999.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] [URL /https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/cst-microwave-studio.html](https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/cst-microwave-studio.html) 1 juillet 2020
- [40] URL : <https://www.dps-fr.com/cst-studio-suite> 1 juillet 2020