

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 البليدة
Université Saad DAHLAB de BLIDA
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Télécommunication

Spécialité Réseaux et Télécommunications

Présenté par :

EZZEROUG EZZRAIMI Fatma Zohra

&

BOURABIA Imene

Conception, simulation et réalisation d'antennes ULB compactes

Proposé et encadré par :

Mr. HEBIB Sami & Mlle BOUMAAZA Kawter

Année Universitaire : 2019-2020

Avant tout, nos remerciements vont en premier lieu à **DIEU** qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos gratitudee à notre promoteur **Mr HEBIB SAMI**, pour ses qualités scientifiques et humaines, qui nous ont beaucoup aidé et guidé tout au long de ce travail, et pour le temps et la patience qui nous a accordé.

Nos remerciements vont aussi à **Mlle BOUMAAZA KAWTER** pour la documentation, l'accompagnement tout au long de ce travail et les conseils prodigués.

Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années d'études.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidé de loin ou de près à réaliser ce travail.

A mon cher papa

Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. « Merci papa »

A ma chère mère

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout-puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes frères et ma sœur « Yahia, Mohamed, Abed Allah, Asma »

Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

Je dédie ce modeste travail aussi

A tous mes amis sans exception.

A mon binôme Imene et sa famille.

A tout ce qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Mlle EZZEROUG EZZRAIMI

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

Ma très chère mère pour son amour et ses encouragements.

A mon très cher père, qui j'aurais aimé qu'il soit parmi nous, mais le bon

Dieu en a décidé autrement. « Allah yerahmo ».

A mon frère.

A mon mari.

A ma chère fille Elin.

A toute ma famille.

A mes chères copines Houda et Aziza.

A mon binôme Fatma Zohra.

A tous mes enseignants.

Mlle BOURABIA

ملخص:

وقد تطلب التطور الأخير للاتصالات ذات النطاق العريض الفائق (ULB) هوائيات مكيفة خصيصاً لهذه التكنولوجيا. ويلبي هذا المشروع النهائي هذه الحاجة بالتركيز على تصميم أجهزة هوائي ULB المدمجة ومحاكمتها وتحقيقها في مجال التكنولوجيا المطبوعة. وفي هذا السياق، اقترحت ثلاثة هوائيات من النوع ULB، ونفذت وتم التحقق منها تجريبياً. وبشكل عام، فإن نتائج القياس التي تم الحصول عليها تتوافق بشكل جيد مع تلك التي تم التنبؤ بها من خلال المحاكاة الكهرومغناطيسية، وبالتالي التحقق من الأداء الصحيح لهوائيات ULB الثلاثة المصممة.

كلمات المفاتيح: اتصالات فائقة النطاق (ULB)؛ هوائي صغير الحجم؛ تقنية مطبوعة؛ محاكاة كهرومغناطيسية.

Résumé :

L'essor récent des communications ultra large bande (ULB) a nécessité des antennes spécialement adaptées à cette technologie. Ce travail de projet de fin d'études répond à ce besoin en s'intéressant à la conception, simulation et réalisation d'antennes ULB compactes en technologie imprimée. Dans ce contexte, trois antennes ULB ont été proposées, réalisées et validées expérimentalement. De façon générale, les résultats de mesure obtenus sont en bon accord avec ceux prédits par simulation électromagnétique et valident ainsi le bon fonctionnement des trois antennes ULB conçues.

Mots clés : communications ultra large bande (ULB) ; antenne compacte ; technologie imprimée ; simulation électromagnétique.

Abstract:

The recent development of Ultra-wideband communications (UWB) has required antennas specially dedicated to this technology. This project meets this need by dealing with the design, simulation and fabrication of compact UWB antennas in printed technology. In this context, three UWB antennas have been proposed, fabricated and validated experimentally. In general, the obtained measurement results are in a good agreement with those predicted by electromagnetic simulation and thus validate the good behavior of the three designed UWB antennas.

Keywords: ultra-broadband communications (ULB); compact antenna; printed technology; electromagnetic simulation.

Liste des acronymes et abréviations

2D :	Deux dimensions ou bidimensionnel.
3D :	Trois dimensions ou tridimensionnel.
BP :	Bande passante.
CPW :	Coplanar waveguide.
dB :	Décibel.
dBd :	Décibel par rapport au dipôle.
dB_i :	Décibel par rapport à une antenne isotrope.
EHF :	Extremely High Frequency.
FCC :	Federal Communications Commission.
FIT :	Finite Integration Technique.
FR-4 :	Flame Resistant 4.
GPR :	Ground Penetrating Radar.
GPS :	Global Positioning System.
HF :	High Frequency.
IR :	Impulse Radio.
LF :	Low Frequency.
Max :	Maximum.
MF :	Medium Frequency.
Réf :	Référence.
RF :	Radio Frequency.
RFID :	Radio Frequency Identification.
SHF :	Super High Frequency.
SMA :	Sub Miniature version A.
UHF :	Ultra High Frequency.
ULB :	Ultra Large Bande.
UWB :	Ultra Wide Band.
VHF :	Very high frequency.
WPAN :	Wireless Personal Area Network.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Liste des acronymes et abréviations	V
Table des matières	VI
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII

Introduction générale

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1

Généralités sur les antennes

1.1 Introduction	3
1.2 Antennes : définition, historique et applications	3
1.2.1 Définition d'une Antenne	3
1.2.2 Bref historique	4
1.2.3 Applications des antennes	5
1.3 Caractéristiques principales d'une antenne	6
1.3.1 Paramètres radioélectriques	6
a. Impédance d'entrée	6
b. Coefficient de réflexion Γ	7
c. Bande passante	7
1.3.2 Paramètres de rayonnement	8
a. Diagramme de rayonnement	8

b. Directivité.....	9
c. Gain.....	9
d. Rendement	9
1.4 Les antennes imprimées	10
1.4.1 Structure d'une antenne imprimée	10
1.4.2 Techniques d'alimentation des antennes imprimées	11
a. Alimentation par contact	11
b. Alimentation par proximité	12
1.4.3 Avantages et inconvénients des antennes imprimées	14
a. Avantages	14
b. Inconvénients.....	14
1.4.4 Techniques d'élargissement de la bande passante d'une antenne patch	15
a. Plan de masse partiel ou modifié.....	15
b. Introduction de fentes	16
c. Technique multi-résonateurs	16
1.5 Conclusion	17

Chapitre 2

Etat de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire

2.1 Introduction	18
2.2 Technologie ULB : définition, historique et domaine d'applications	18
2.2.1 Définition	18
2.2.2 Bref historique sur la technologie ULB	19
2.2.3 Domaine d'applications	20
2.3 Avantages et inconvénients de l'ultra large bande	21

2.3.1 Avantages	21
2.3.2 Inconvénients	21
2.4 Etat de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire.....	21
2.5 Conclusion.....	30

Chapitre 3

Conception et simulation d'antennes ULB compactes

3.1 Introduction	31
3.2 Spécifications techniques (cahier des charges)	31
3.3 Antenne 1.....	32
3.3.1 Description de l'antenne	32
3.3.2 Résultats de simulation	33
3.3.3 Etudes paramétriques	36
a. Paramètre W_{sub}	36
b. Paramètre d	37
c. Paramètre W_e	38
3.4 Antenne 2.....	39
3.4.1 Description de l'antenne	39
3.4.2 Résultats de simulation	40
3.4.3 Etudes paramétriques	43
a. Paramètre W_{rec}	43
b. Paramètre L_{plan}	44
c. Paramètre L_1	45
3.5 Antenne 3.....	46
3.5.1 Description de l'antenne	46
3.5.2 Résultats de simulation	47

3.5.3 Etudes paramétriques	50
a. Paramètre L_{plan}	50
b. Paramètre L_{ligne}	51
c. Paramètre W_e	52
d. Paramètre L_e	52
3.6 Comparaison entre les trois antennes	54
3.7 Conclusion	55

Chapitre 4

Réalisation et mesure d'antennes ULB compactes

4.1 Introduction	56
4.2 Réalisation des antennes	56
4.3 Résultats de mesure	59
4.3.1 Antenne 1	59
4.3.2 Antenne 2	60
4.3.3 Antenne 3	61
4.4 Comparaison des performances mesurées	62
4.5 Conclusion	63

Conclusion générale

Conclusion générale	64
---------------------------	----

Bibliographie

Bibliographie	65
---------------------	----

Annexe

A. CST MICROWAVE STUDIO	69
-------------------------------	----

Liste des figures

Figure 1.1 : Système global de communication sans fil	3
Figure 1.2 : Système comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice.....	4
Figure 1.3 : Quelques types d'antennes	4
Figure 1.4 : Historique des radiocommunications	5
Figure 1.5 : Occupation du spectre radiofréquence.....	6
Figure 1.6 : Antenne en mode émetteur.....	7
Figure 1.7 : Exemple d'une bande passante.....	8
Figure 1.8 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne	8
Figure 1.9 : Exemple d'antennes patch	10
Figure 1.10 : Structure d'une antenne patch rectangulaire.....	11
Figure 1.11 : Différentes géométries de l'élément rayonnant d'une antenne imprimée ..	11
Figure 1.12 : Alimentation par ligne imprimée (technologie microruban)	12
Figure 1.13 : Alimentation par sonde coaxiale.....	12
Figure 1.14 : Alimentation par guide d'ondes coplanaire (CPW)	13
Figure 1.15 : Alimentation par ligne micro ruban et fente	13
Figure 1.16 : Alimentation par couplage électromagnétique	14
Figure 1.17 : Antenne patch avec un plan de masse modifié	15
Figure 1.18 : Antenne patch rectangulaire avec un plan de masse partiel	16
Figure 1.19 : Antenne patch avec une fente circulaire	16
Figure 1.20 : Antenne patch avec des résonateurs	17
Figure 3.1 : Géométrie de l'antenne 1 étudiée, (a) face avant de l'antenne 1, (b) face arrière de l'antenne 1	32
Figure 3.2 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 1	33
Figure 3.3 : L'efficacité totale de l'antenne 1.....	35

Figure 3.4 : Gain de l'antenne 1	36
Figure 3.5 : Coefficient de réflexion de l'antenne 1 pour différentes valeurs de W_{sub}	37
Figure 3.6 : Coefficient de réflexion de l'antenne 1 pour différentes valeurs de d	37
Figure 3.7 : Coefficient de réflexion de l'antenne 1 pour différentes valeurs de W_e	38
Figure 3.8 : Géométrie de l'antenne 2 étudiée, (a) face avant de l'antenne 2, (b) face arrière de l'antenne 2	39
Figure 3.9 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 2	40
Figure 3.10 : L'efficacité totale de l'antenne 2	42
Figure 3.11 : Gain de l'antenne 2	43
Figure 3.12 : Coefficient de réflexion de l'antenne 2 pour différentes valeurs de W_{rec}	44
Figure 3.13 : Coefficient de réflexion de l'antenne 2 pour différentes valeurs de L_{plan}	44
Figure 3.14 : Coefficient de réflexion de l'antenne 2 pour différentes valeurs de L_1	45
Figure 3.15 : Géométrie de l'antenne 3 étudiée, (a) face avant de l'antenne 3, (b) face arrière de l'antenne 3	46
Figure 3.16 : Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 3	47
Figure 3.17 : L'efficacité totale de l'antenne 3	49
Figure 3.18 : Gain de l'antenne 3	50
Figure 3.19 : Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de L_{plan}	51
Figure 3.20 : Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de L_{ligne} ...	51
Figure 3.21 : Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de W_e	52
Figure 3.22 : Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de L_e	53
Figure 3.23 : Comparaison entre les coefficients de réflexion des trois différentes structures d'antennes	54
Figure 3.24 : Comparaison entre les efficacités des trois différentes structures d'antennes	54
Figure 3.25 : Comparaison entre les gains des trois différentes structures d'antennes ...	55

Figure 4.1 : Typons de l'antenne 1 à réaliser, (a) Face avant (Elément rayonnant), (b) Face arrière (Plan de masse)	57
Figure 4.2 : Typons de l'antenne 2 à réaliser, (a) Face avant (Elément rayonnant), (b) Face arrière (Plan de masse)	57
Figure 4.3 : Typons de l'antenne 3 à réaliser, (a) Face avant (Elément rayonnant), (b) Face arrière (Plan de masse)	57
Figure 4.4 : Photographie de l'antenne 1 réalisée, (a) Face avant, (b) Face arrière	58
Figure 4.5 : Photographie de l'antenne 2 réalisée, (a) Face avant, (b) Face arrière	58
Figure 4.6 : Photographie de l'antenne 3 réalisée, (a) Face avant, (b) Face arrière	59
Figure 4.7 : Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne 1	60
Figure 4.8 : Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne 2	60
Figure 4.9 : Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne 3	61
Figure 4.10 : Comparaison entre les coefficients de réflexion mesurés des trois différentes structures d'antennes réalisées.....	62

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Quelques antennes ULB en technologie planaire	29
Tableau 3.1 : Cahier des charges	31
Tableau 3.2 : Dimensions de l'antenne 1 étudiée	32
Tableau 3.3 : Diagramme de rayonnement aux cinq fréquences de l'antenne 1 dans le plan E et H	35
Tableau 3.4 : Dimensions de l'antenne 2 étudiée	39
Tableau 3.5 : Diagramme de rayonnement aux cinq fréquences de l'antenne 2 dans le plan E et H	42
Tableau 3.6 : Dimensions de l'antenne 3 étudiée	46
Tableau 3.7 : Diagramme de rayonnement aux cinq fréquences de l'antenne 3 dans le plan E et H.....	49
Tableau 3.8 : Tableau Comparatif entre les trois différentes structures d'antennes.....	55
Tableau 4.1 : Tableau Comparatif des performances mesurées entre les trois d'antennes réalisées.	62

La transmission des ondes dans l'environnement et plus précisément dans le canal de propagation a conduit au développement de multiples services : télécommunications, radar, radiodiffusion, télévision, radionavigation, etc. Dans toutes ces applications, l'antenne est la composante principale qui assure l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace.

Le développement des nouveaux systèmes de télécommunications sans fil nécessite la conception d'antennes de plus en plus difficiles à élaborer. Afin de répondre aux besoins actuels des télécommunications, des ingénieurs sont amenés à concevoir des antennes planaires, ces derniers présentent plusieurs avantages à savoir : compacité, faible coût de fabrication, large bande passante, simple profil, volume réduit et facilité de réalisation.

Les communications sans fil sont aujourd'hui perpétuellement en évolution. Avec l'augmentation des besoins de débits élevés et la rareté des bandes de fréquence disponibles, il est devenu essentiel de trouver des nouvelles solutions qui répondent à ces exigences. La technologie ultra large bande semble être une solution très prometteuse.

Les systèmes de communication ultra large bande (ULB) occupent une place importante dans la communication sans fil en raison de leurs avantages, comme la faible susceptibilité à l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples, meilleure utilisation du spectre, débits plus grands, communications protégées.

L'objectif de ce projet de fin d'études est la conception et la réalisation d'antennes ULB compactes en technologie imprimée. Trois antennes compactes originales, opérant dans la totalité de la bande ULB [3.1 - 10.6] GHz, ont été ainsi proposées, simulées et validées expérimentalement. Les résultats de mesure obtenus, en bon accord avec la simulation, respectent dans une certaine mesure le cahier des charges fixé.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente quelques généralités sur les antennes (définition, historique, applications et principales caractéristiques). Une attention particulière est accordée ensuite aux antennes imprimées, leurs techniques d'alimentations ainsi qu'aux techniques d'élargissement de bande passante.

Le second chapitre donne une brève description de la technologie ULB (définition, historique, domaines d'application et avantages/inconvénients). Il contient également un état de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire présenté sous forme d'un tableau tout en comparant leurs tailles et bandes de fonctionnement.

Le troisième chapitre est consacré à la conception, simulation électromagnétique d'antennes imprimées adaptées aux systèmes de communications ULB. Les résultats de simulation de trois antennes ULB originales et compactes sont affichés et discutés. Pour chaque antenne, des études paramétriques sont conduites afin d'optimiser davantage ses performances. Enfin, ce chapitre se termine par une comparaison des performances en simulation des trois antennes.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre est dédié à la réalisation et à la validation expérimentale des trois antennes ULB conçues. Après la description des étapes de réalisation de ces antennes, les résultats de mesure en termes de coefficient de réflexion sont présentés et comparés avec ceux obtenus en simulation. Ce chapitre se termine par une comparaison des performances en mesure des trois antennes.

Chapitre 1

Généralités sur les antennes

1.1 Introduction

Les antennes sont une partie essentielle de n'importe quel système sans fil. Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement) [1].

Ce chapitre a pour objectif de présenter les antennes d'une manière générale en donnant leur définition, leurs applications et surtout leurs principales caractéristiques.

Ensuite, une attention particulière sera accordée aux antennes imprimées, leurs techniques d'alimentations, ces avantages et inconvénients, enfin, on clôture le chapitre par les techniques d'élargissement de la bande passante de ce type d'antenne.

1.2 Antennes : définition, historique et applications

Un système de communication sans fil est présenté par la figure 1.1, ce système est constitué de deux blocs, un bloc d'émission et un bloc de réception, ces derniers sont séparés par un canal de propagation. L'antenne est la partie essentielle de n'importe quel système de communication sans fil [2].

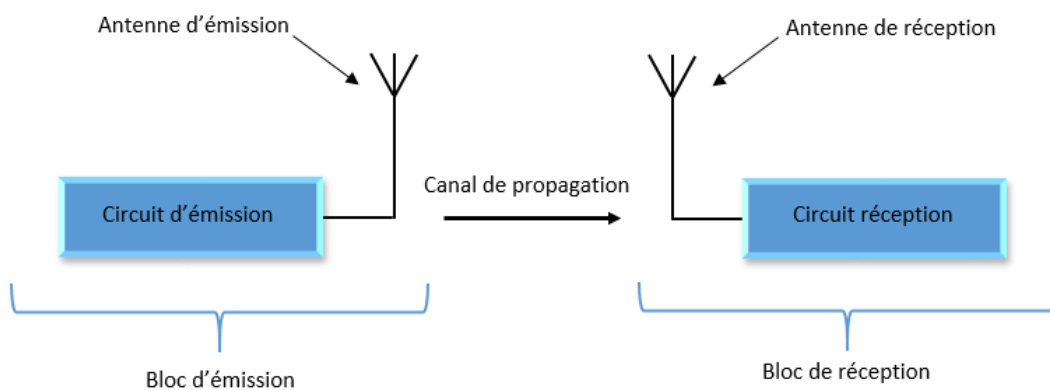


Figure 1.1. Système global de communication sans fil.

1.2.1. Définition d'une Antenne

Une antenne est un dispositif qui permette de rayonner (émetteur), ou de recevoir (récepteur) les ondes électromagnétiques. D'après la figure 1.2 le rôle de l'antenne est de convertir les grandeurs électriques existantes dans une ligne de transmission (tension et

courant) en grandeurs électromagnétiques dans l'espace (champ électrique et champ magnétique), ceci en émission et inversement en réception [3].

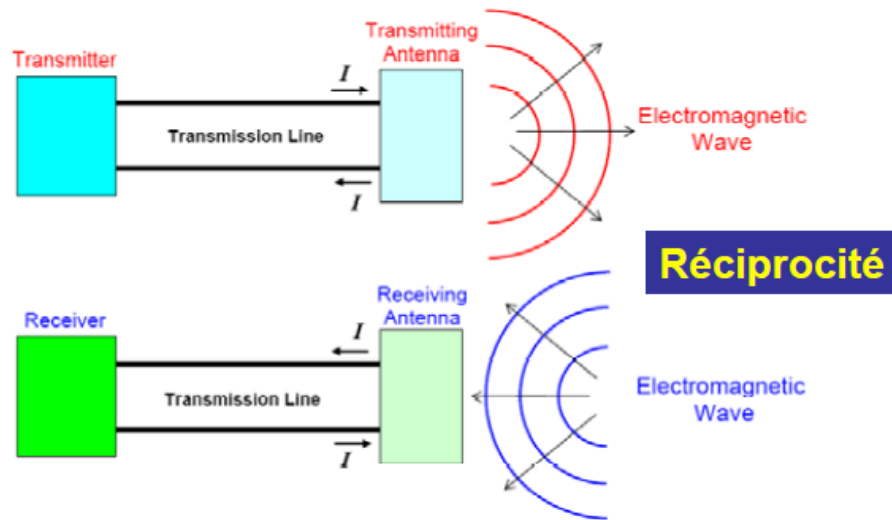


Figure 1.2. Système comportant une antenne émettrice et une antenne réceptrice [4].

Les formes d'antennes sont multiples, on va présenter quelques-uns dans la figure 1.3.

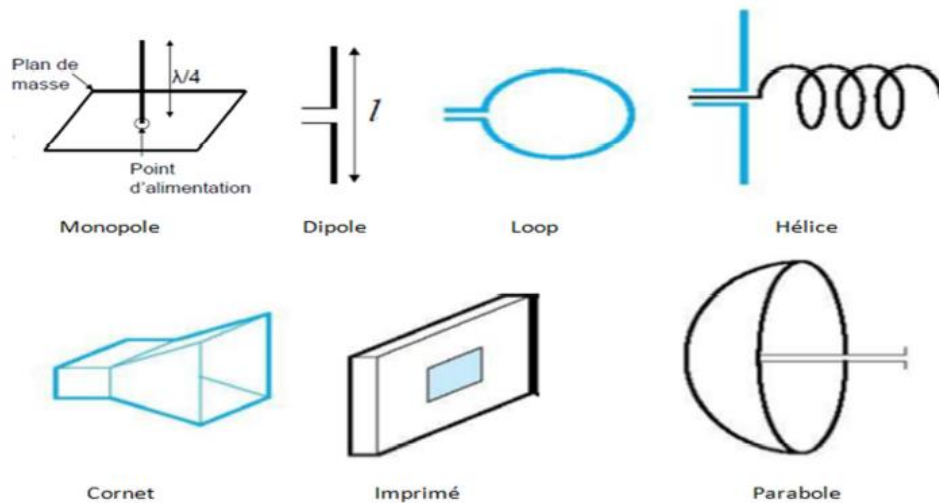


Figure 1.3. Quelques types d'antennes [2].

1.2.2. Bref historique [1]

Le développement des radiocommunications est basé sur la théorie de l'électromagnétisme, mise au point au XIXe siècle et améliorée au XXe siècle.

Les ondes électromagnétiques, support des radiocommunications, ont été prévues de manière théorique dans le cadre des équations de Maxwell et mises en évidence expérimentalement par Hertz à la fin du XIXe siècle. Peu de temps après, les premières applications de transmission radio sont apparues. Leur développement s'est fait en parallèle avec celui de l'électronique au début du siècle. Le XXe siècle est ensuite ponctué d'innovations majeures, qui répondaient à des besoins précis. La figure 1.4 dresse un rapide historique des découvertes et inventions liées aux radiocommunications et aux antennes.

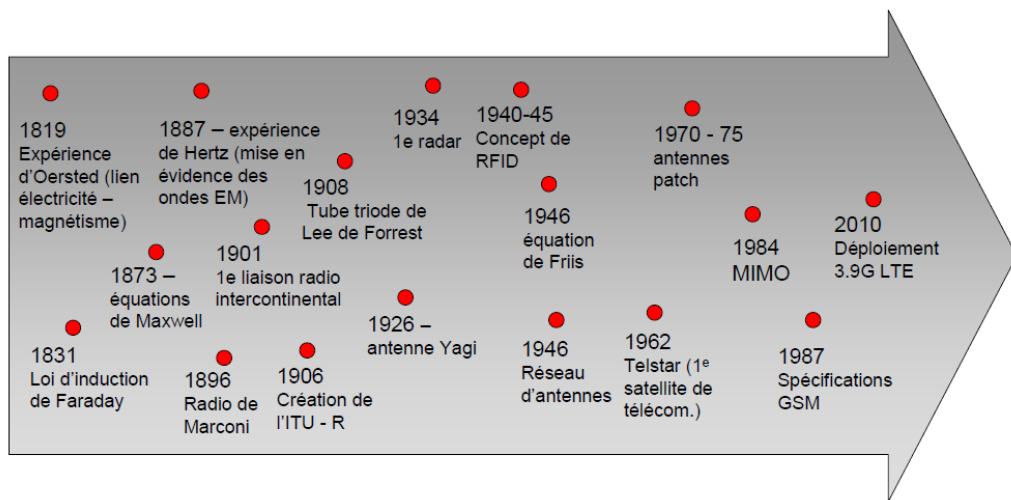


Figure 1.4. Historique des radiocommunications [1].

1.2.3. Applications des antennes

Les antennes sont utilisées sur une large gamme de fréquence pour un grand nombre d'applications différentes comme la montre la figure 1.5 [1], dont nous citons quelques exemples :

- Ondes kilométriques (LF : 30 à 300 kHz) et hectométriques (MF : 300 à 3 000 kHz) : pour la radiodiffusion à modulation d'amplitude, les liaisons avec les sous-marins, navigation, radio de la garde côtière, etc.
- Ondes décamétriques (HF : 3 à 30 MHz) : pour les liaisons intercontinentales ou maritimes, téléphone, télégraphe, station radioamateur, etc.
- Ondes métriques (VHF : 30 à 300 MHz) : pour la radiodiffusion à modulation de fréquence, la télévision et les communications et radionavigation aéronautiques, etc.
- Ondes décimétriques (UHF : 300 à 3 000 MHz) : pour la télévision, le radar et les liaisons avec les mobiles.

- Ondes centimétriques (SHF : 3 à 30 GHz) : pour les liaisons terrestres par faisceaux hertziens et les liaisons spatiales, radars d'avions embarqués militaires, liaisons micro-ondes, téléphone mobile, etc.
- Ondes millimétriques (EHF : 30 à 300 GHz) : pour les radars, l'expérimental, etc. [5]

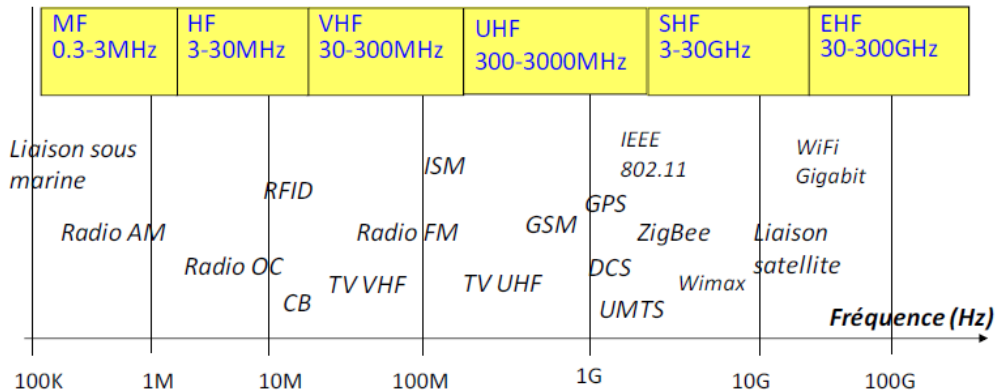


Figure 1.5. Occupation du spectre radiofréquence [1].

1.3 Caractéristiques principales d'une antenne

Une antenne est caractérisée par des propriétés et des paramètres communs. Ces paramètres sont classés en deux catégories. La première catégorie définit l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. La seconde catégorie s'intéresse aux propriétés de rayonnement de l'antenne.

Les principaux paramètres de l'antenne qui traduisent son comportement comme circuit sont l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et la bande passante. Les paramètres de rayonnement sont principalement le diagramme de rayonnement, la directivité, le gain et rendement [6]. Ces paramètres seront détaillés par la suite.

1.3.1 Paramètres radioélectriques

a. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée (Z_e) est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes. Elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présent à l'entrée de l'antenne (figure 1.6) et peut s'écrire comme suit [2] :

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX[\Omega] \tag{1.1}$$

Ou : R= Résistance de l'antenne [Ω].

X= Réactance de l'antenne [Ω].

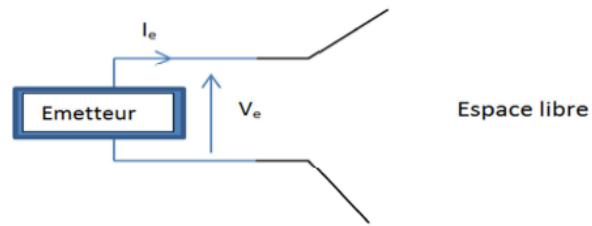


Figure 1.6. Antenne en mode émetteur [2].

b. Coefficient de réflexion Γ

L'adaptation d'impédance de l'antenne est vérifiée en exprimant le coefficient de réflexion en tension à l'entrée de l'antenne.

Le coefficient de réflexion Γ est donc un nombre potentiellement complexe (car Z_e peut être complexe) dont le module varie entre 0 et 1. L'adaptation d'impédance est optimale lorsque $\Gamma=0$, soit $Z_e=Z_c$. Donc le coefficient de réflexion est donné par [3] :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (1.2)$$

Où : Z_c = représente l'impédance caractéristique de la ligne.

Z_e = représente l'impédance d'entrée de la ligne.

c. Bande passante

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante.

La figure 1.7 montre un exemple d'un coefficient de réflexion ainsi que la bande passante déterminée pour $|S_{11}| < -10$ dB [1].

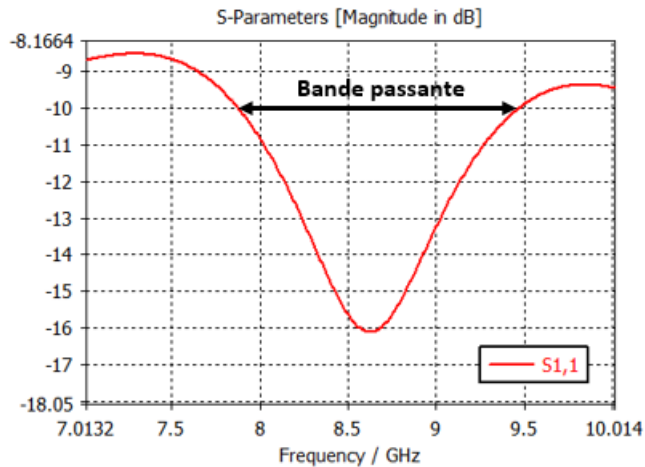


Figure 1.7. Exemple d'une bande passante.

1.3.2 Paramètres de rayonnement [1]

a. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$ (fonction normalisée), qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Cette fonction est donnée par :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \tag{1.3}$$

Où : $P(\theta, \varphi)$ = L'intensité de rayonnement de l'antenne considérée [w/Sr].

$P_0(\theta_0, \varphi_0)$ = L'intensité de rayonnement maximale.

Le diagramme de rayonnement peut être représenté sur un plan en coordonnées cartésiennes, polaire ou bien dans l'espace à trois dimensions, comme montre la figure 1.8.

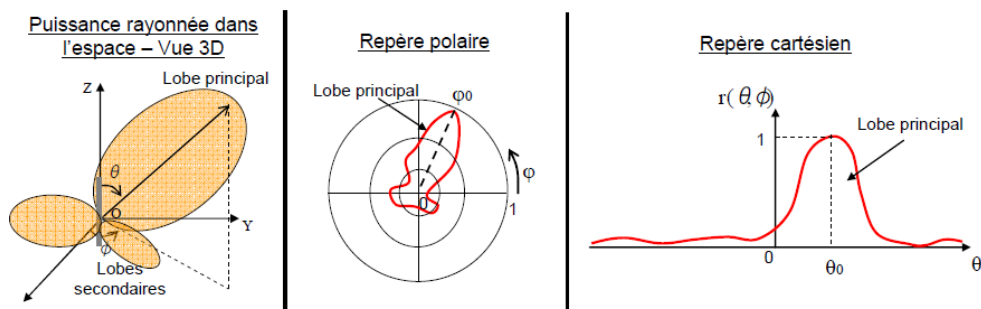


Figure 1.8. Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [1].

b. Directivité

La Directivité est de mesure de combien l'antenne envoie de l'énergie dans une certaine direction.

$$0 < D < D_{\max} \quad (1.4)$$

La directivité D d'une antenne est le rapport entre l'intensité de rayonnement maximale $P_0(\theta_0, \varphi_0)$ et l'intensité de rayonnement de l'antenne isotrope. La directivité est définie comme suit :

$$D = \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \frac{P_0(\theta_0, \varphi_0)}{P_R} \quad (1.5)$$

Ou : $P_0(\theta_0, \varphi_0)$ = L'intensité de rayonnement maximale.

P_R = Puissance rayonnée de l'antenne.

c. Gain

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) , il est donné par :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \quad (1.6)$$

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.

d. 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 (1.5) et (1.6), on voit que le rendement relie le gain et la directivité.

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow G = \eta \cdot D \quad (1.7)$$

1.4 Antennes Imprimées

Le concept d'antennes imprimées est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 70. Les antennes imprimées ou microruban, dont le nom anglais est « patch », sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. De part leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes patch sont utilisées dans de nombreuses applications à partir des bandes VHF (figure 1.9) [1].



Figure 1.9. Exemple d'antennes patch [1].

1.4.1 Structure d'une antenne imprimée

Une antenne patch consiste en un élément métallique appelé élément rayonnant de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, etc.), ce dernier est déposé sur une 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 dans la figure 1.10 [1].

L'élément rayonnant de l'antenne patch peut prendre plusieurs formes (carré, rectangulaire, circulaire, etc.), Les formes les plus utilisées sont montrées dans la figure 1.11.

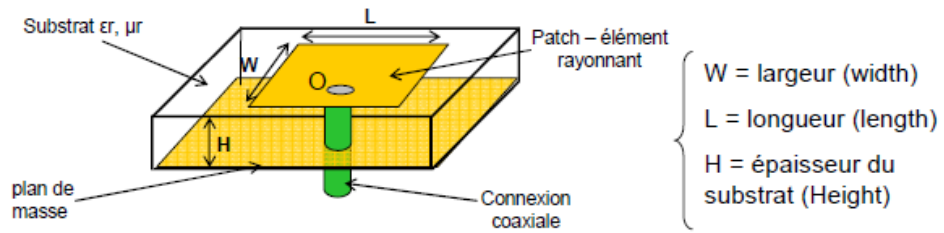


Figure 1.10. Structure d'une antenne patch rectangulaire [1].

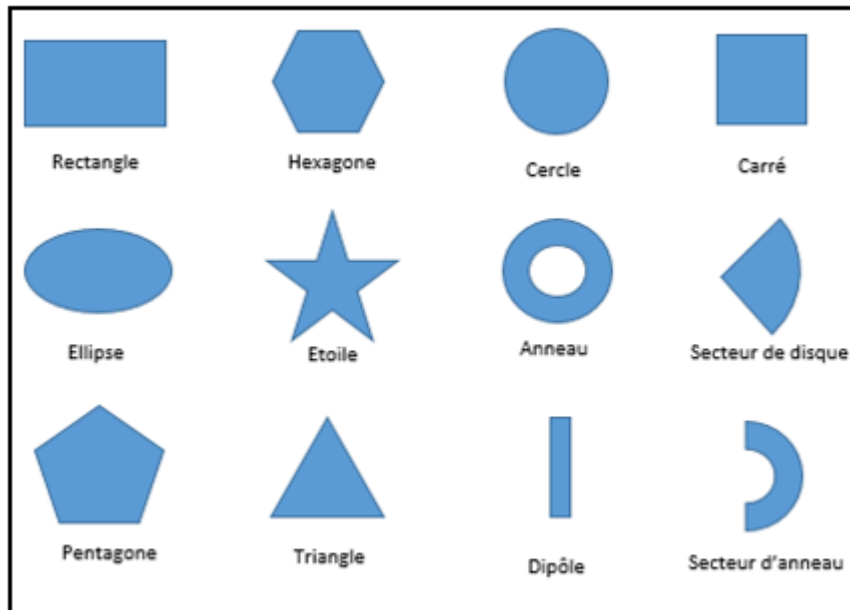


Figure 1.11. Différentes géométries de l'élément rayonnant d'une antenne imprimée.

1.4.2 Techniques d'alimentation des antennes imprimées

La méthode d'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Elle peut être classée en 2 catégories :

a. Alimentation par contact

On peut classer deux principales catégories :

- Alimentation par ligne imprimée (ou alimentation par ligne microruban)

L'alimentation la plus simple consiste à utiliser une ligne microruban sur le même plan que le patch rayonnant comme la montre la figure 1.12, cette technique très utilisée, présente le grand avantage de la simplicité de réalisation [7].



Figure 1.12. Alimentation par ligne imprimée (technologie microruban) [7].

- Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation, pour le cas présenté sur la figure 1.13, est assurée par un coaxial. Pour cela, une cavité est usinée dans le diélectrique et le plan de masse, de façon à faire passer l'âme du coaxial qui est soudée sur le plan métallique rayonnant (patch) [7].

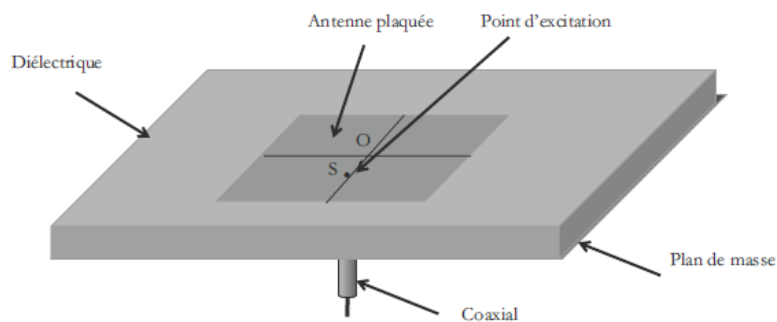


Figure 1.13. Alimentation par sonde coaxiale [7].

b. Alimentation par proximité

On peut classer trois principales catégories :

- Alimentation par guide d'ondes coplanaire (figure 1.14)

Le guide d'onde coplanaire est une ligne de transmission efficace qui présente l'avantage de placer la ligne d'alimentation au même niveau que le plan de masse. Il est constitué d'un ruban central métallique placé entre deux plans de masse parallèle entre eux. Déposé sur la même face d'un substrat diélectrique. Cette technique n'est pas adaptée pour alimenter une structure d'antenne symétrique [2].

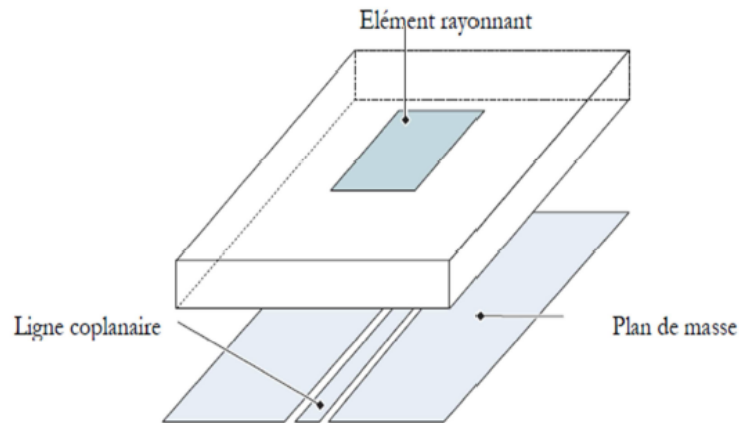


Figure 1.14. Alimentation par guide d'ondes coplanaire (CPW) [2].

- Alimentation par fente (figure 1.15)

Une ligne est disposée au dos du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous l'élément rayonnant afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne [2].

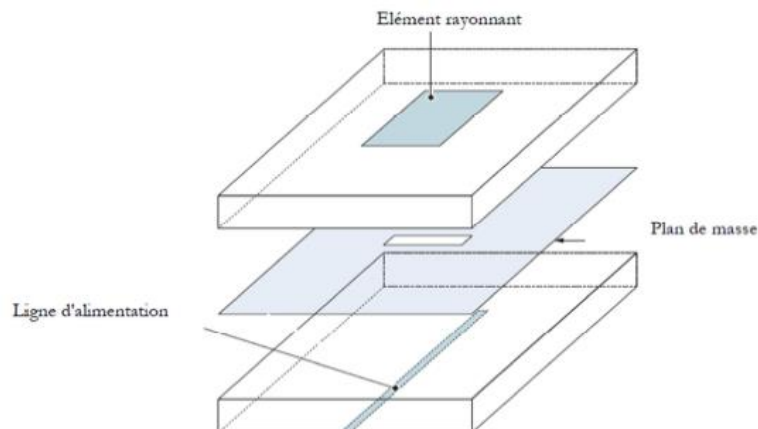


Figure 1.15. Alimentation par ligne micro ruban et fente [2].

- Alimentation par couplage électromagnétique (figure 1.16)

L'alimentation se trouve prise en sandwich entre deux diélectriques. Un couplage électromagnétique entre l'extrémité de la ligne micro ruban et le patch, qui se trouve au-dessus du dispositif, permet d'exciter l'antenne. Le diélectrique supérieur joue alors un rôle d'écran pour la ligne d'alimentation, qui sinon pourrait éventuellement perturber le

rayonnement. Il est alors intéressant de placer l'électronique au niveau de ce second diélectrique pour les antennes actives [7].

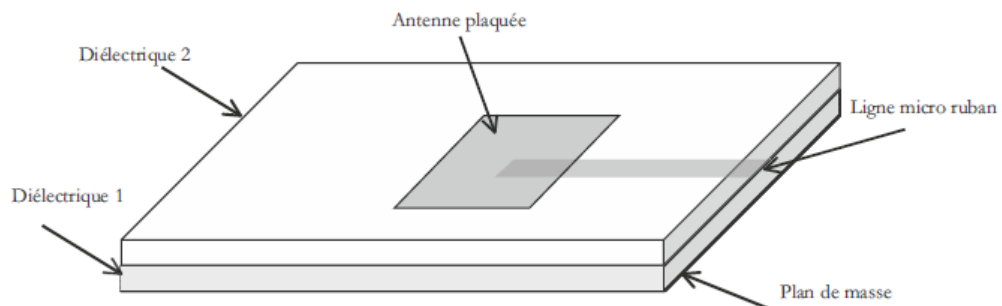


Figure 1.16. Alimentation par couplage électromagnétique [7].

1.4.3 Avantages et inconvénients des antennes imprimées [8]

a. Avantages

Les antennes imprimées (ou antennes patch) présente un certain nombre d'avantages parmi lesquels :

- Faible masse, faible volume, faible épaisseur.
- Possibilité d'imprimer sur des substrats souples.
- Simple intégration.
- Facilités de fabrication.
- Faible coût de fabrication.

b. Inconvénients

Malheureusement, ces antennes présentent également un certain nombre d'inconvénients qui peuvent limiter leur domaine d'applications. On peut noter :

- Bande passante étroite.
- Faible gain.
- Faible tenue en puissance (quelques watts à quelques dizaines de watts).
- Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits.

Un inconvénient majeur de l'antenne patch reste sa très faible bande passante. Des techniques d'élargissement de la bande passante de ce type d'antenne seront présentées dans la suite telle que (un plan de masse partiel ou modifier, introduction de fentes, multi-résonateur...).

1.4.4 Techniques d'élargissement de la bande passante d'une antenne patch [6]

Dans la littérature scientifique, plusieurs techniques sont utilisées pour élargir la bande passante d'une antenne patch classique, à savoir : un plan de masse partiel ou modifier, introduction d'une ou de plusieurs fentes et l'introduction de résonateurs supplémentaires. Ces différentes techniques seront présentées par la suite.

a. Plan de masse partiel ou modifié

Cette technique consiste à modifier la forme du plan de masse par l'introduction de fentes comme illustre la figure 1.17, ou d'utiliser un plan de masse partiel non-complet comme montre la figure 1.18.

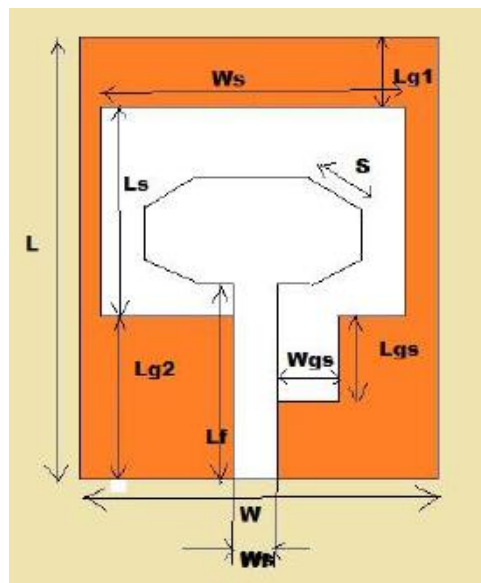


Figure 1.17. Antenne patch avec un plan de masse modifié [9].

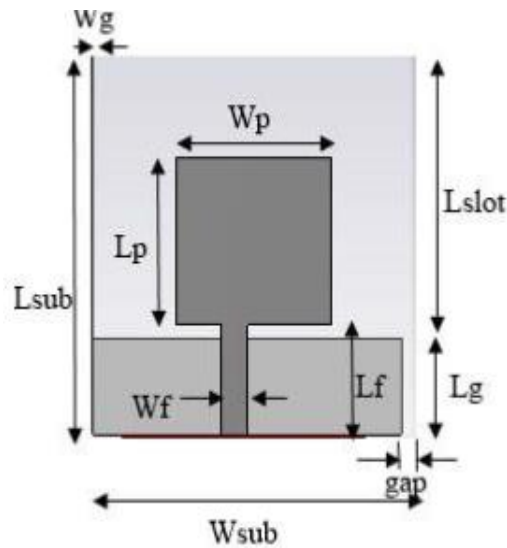


Figure 1.18. Antenne patch rectangulaire avec un plan de masse partiel [10].

b. Introduction de fentes

Cette technique consiste à modifier la forme classique d'un patch introduisant une ou plusieurs fentes. Cette technique est montrée par la figure 1.19.

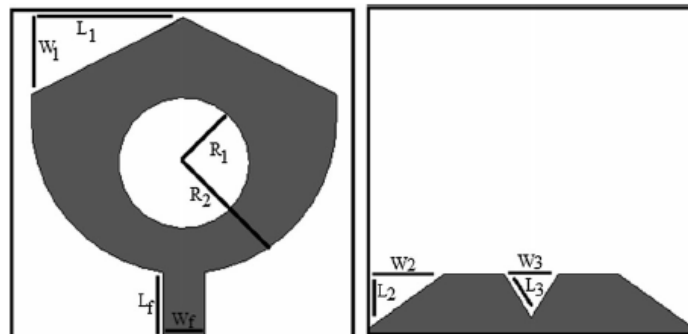


Figure 1.19. Antenne patch avec une fente circulaire [11].

c. Technique multi-résonateurs

Cette technique consiste à ajouter un ou plusieurs résonateurs placés à proximité de l'antenne principale. Le fonctionnement de ces résonateurs à des fréquences proches de celle de l'antenne patch principale permet d'élargir la bande passante globale. Comme illustre la figure 1.20.

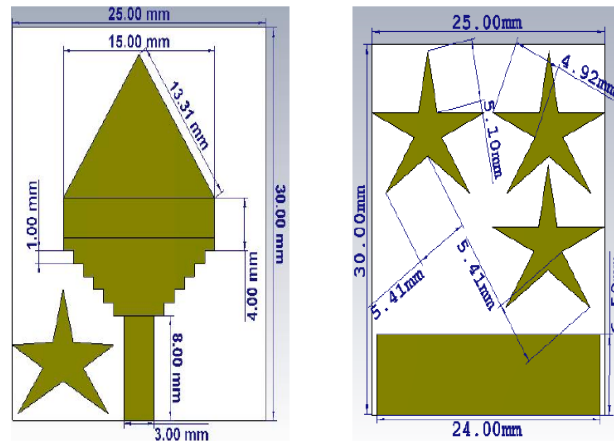


Figure 1.20. Antenne patch avec des résonateurs [12].

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un tour d'horizon sur les antennes a été présenté en donnant leur définition, un bref historique et leurs principales applications et caractéristiques. Ensuite, une attention particulière a été accordée aux antennes imprimées (patch) dû à leurs avantages par rapport aux autres antennes à savoir : faible coût/encombrement leur facilité d'intégration. Ensuite, les différentes techniques d'alimentation des antennes imprimées ont été présentées et expliquées. Enfin des techniques d'élargissement de la bande passante de ce type d'antenne. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de la technologie ULB.

Chapitre 2

**Etat de l'art sur les antennes
ULB en technologie planaire**

2.1 Introduction

La technologie ultra large bande regroupe une grande diversité d'antennes, le développement de toutes ces antennes est apparues en 2002 d'une décision de la commission Fédérale des Communications des Etats-Unis (FCC) autorisant l'émission en dessous d'un certain seuil de signaux dans une bande de fréquence allant de 3.1 à 10.6 GHz. Cette technique de transmission radio consiste à l'utilisation des signaux dont le spectre s'étale sur une large bande de fréquences de l'ordre de 500 MHz à plusieurs GHz. Cette disponibilité spectrale permet d'envisager notamment les communications à haut débit et conduit aussi une résolution spatiale fine pour les radars [13].

La technologie ULB est mise au point à l'origine pour des applications militaires. Après, cette technologie a été transportée aux applications des télécommunications, tels que l'échanges des données entre deux portables, applications médicales [14].

Ce chapitre est consacré pour la technologie ULB, en donnant leur définition, leur bref historique et leurs domaines d'application. Après des avantages et des inconvénients de l'ultra large bande sera présentées, et en terminera ce chapitre par un état de l'art sur les différentes antennes ULB planaires.

2.2 Technologie ULB : définition, historique et domaine d'applications

2.2.1. Définition [2-7]

L'ultra large bande a d'abord eu une première définition donnée par Taylor. Il s'agissait de systèmes qui transmettent et reçoivent des ondes dont la bande passante relative ($BP_{relative}$) est supérieure ou égale à 0,25.

Cette première définition a été modifiée et remplacée par une nouvelle proposée par la FCC en février 2002. Selon cette nouvelle définition, un signal ULB est un signal dont :

- La bande passante est au minimum de 500 MHz (à -10 dB).
- La bande passante relative est supérieure à 20 % avec :

$$BP_{relative} = 2 \cdot \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \cdot 100 > 20\% \quad (2.1)$$

Ou : f_{\max} et f_{\min} , désignent respectivement les fréquences hautes et basses du spectre de signal à -10 dB.

La plupart des concepteurs des systèmes ULB adoptent une autre définition, à savoir une bande passante supérieure à 1.5 GHz à -10 dB (ou une bande passante fractionnelle supérieure à 0.25 par rapport à la fréquence centrale du système) [14].

2.2.2. Bref historique sur la technologie ULB

L'histoire des signaux UWB a été établie à la fin des années 1880. En 1887, Hertz le premier qui a introduit les premiers signaux UWB qui sont transmis à l'aide d'un dipôle à large bande. Cependant, le développement et la contribution des signaux RF à bande ultra large ont commencé à la fin des années 1960 avec les efforts de Harmuth, Ross, Robbins et Paul van etten [15].

Le premier brevet sur l'application de l'ultra large bande aux télécommunications est dû à G. F. Ross en 1973. Jusqu'à 1994, de nombreux travaux ont été financés par le gouvernement américain.

L'étude des systèmes de transmission par impulsions tant dans le monde industriel qu'académique a fait l'objet de nombreuses publications, le premier article décrivant cette solution pour les télécommunications connue sous le nom d'Impulse Radio (IR), est dû à P.Withington et L. Fullerton en 1992, cet article a été suivi par des travaux académiques démarrés par Scholtz en 1993, et ce n'est qu'en 1997 que le terme UWB apparaît dans le titre d'un article consacré à l'IR.

En août 1998, la Fédéral Communications Commission (FCC) a fait paraître un avis d'information publique (Notice of Inquiry) afin d'évaluer la possibilité de permettre l'utilisation des systèmes employant l'ULB. Suite à cette publication, une centaine de réponses et commentaires ont été faits par les divers organismes et partenaires industriels impliqués de près ou de loin dans l'utilisation de l'ULB. Par la suite, la Fédéral Communication Commissions (FCC) aux Etats-Unis a adopté en mai 2000 un avis de proposition de réglementation (Notice of Proposed Rule Making) dans laquelle, elle reconnaissait les avantages que pourraient apporter les systèmes utilisant l'ULB dans de nombreux domaines. En 2002, la FCC a attribué finalement 7.5 GHz de spectre dans de la

bande [3.1 - 10.6 GHz] à l'ULB, et elle a autorisé son utilisation commerciale pour les applications civiles [16].

2.2.3. Domaine d'applications [17-18]

Il existe plusieurs applications pour la technologie UWB. Certains, comme les radars UWB, sont utilisés depuis des années, tandis que d'autres sont de nouvelles applications potentielles, à savoir, réseaux de capteurs UWB, RFID UWB et systèmes de positionnement UWB. Certaines de ces applications comprennent :

- Radars anticollisions pour véhicules.
- systèmes d'imagerie radar, par exemple le radar à pénétration du sol (GPR).
- systèmes de radiocommunication sans fil à courte portée, par exemple les réseaux personnels sans fil (WPAN).
- Transfert de grandes quantités de données à court terme pour le réseautage à domicile ou au bureau.
- Applications voix, données et vidéo de courte portée (un téléviseur et un système informatique sans fil et transfert de données à un taux plus élevé que les connexions filaires).
- Communications militaires à bord d'hélicoptères et d'aéronefs qui, autrement, auraient trop de composants interférents à plusieurs voies.
- systèmes d'imagerie à travers les murs pour les applications de sauvetage, de sécurité et médicale.
- Réduire le temps d'inventaire et accroître l'efficacité de plusieurs façons (apposer des étiquettes RFID UWB à chaque article à l'intérieur d'une boîte ou d'une caisse, un scan pourrait compter et identifier ce qui se trouve dans la boîte sans qu'elle soit ouverte).
- Localiser avec précision une personne ou un objet à moins d'un pouce de sa position dans n'importe quelle structure ; la technologie du système de positionnement mondial (GPS) n'est précise que jusqu'à 1 m et ne fonctionne pas à l'intérieur des bâtiments ; le GPS est coûteux, mais l'UWB sera peu coûteux.
- Localisation des activités de recherche et sauvetage, suivi du bétail et des animaux de compagnie.

- Détection des mines terrestres.
- Évaluer les emplacements ennemis et suivre les troupes.

2.3 Avantages et inconvénients de l'ultra large bande

2.3.1. Avantages [18]

La technologie à bande ultra-large (UWB) possède un certain nombre d'avantages parmi lesquels :

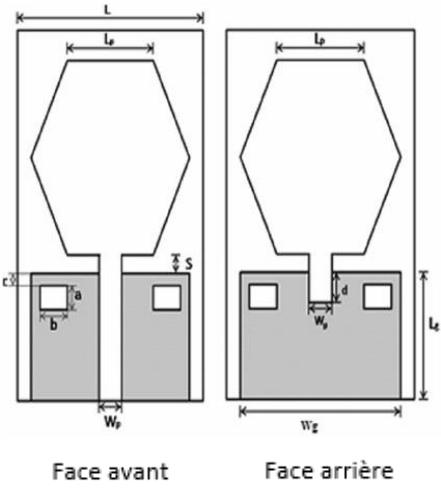
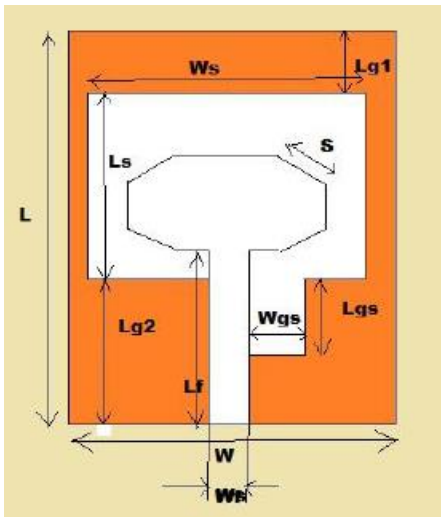
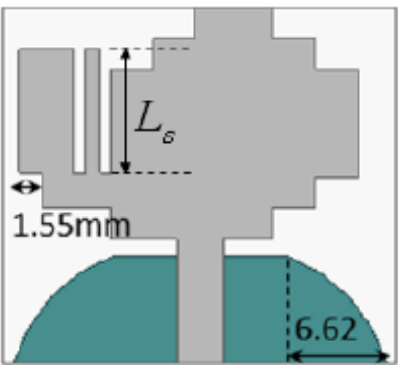
- Faible susceptibilité à l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples.
- Insensibilité au brouillage.
- Communications protégées.
- Simplicité relative des systèmes.
- Propriétés de pénétration.

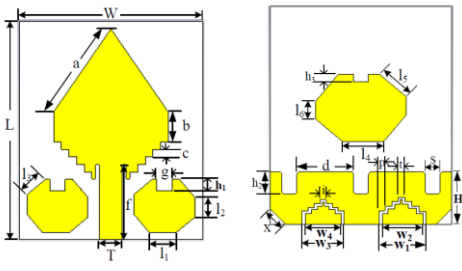
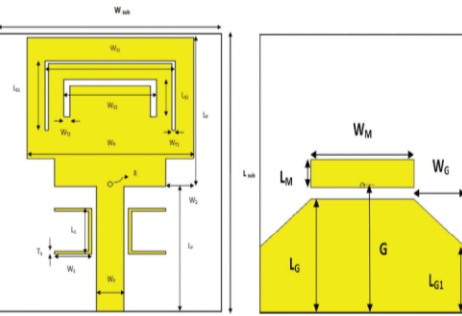
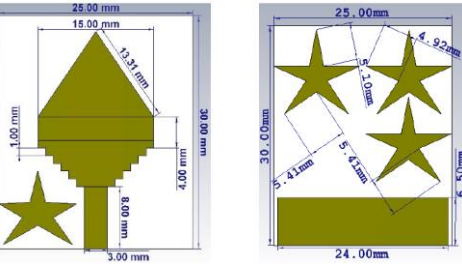
2.3.2. Inconvénients [2]

Le principal inconvénient de cette technologie est l'existence d'interférence dû aux fréquences utilisées qui sont déjà employées par d'autres systèmes.

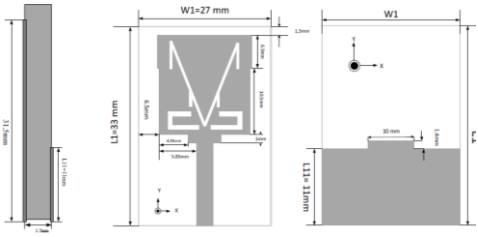
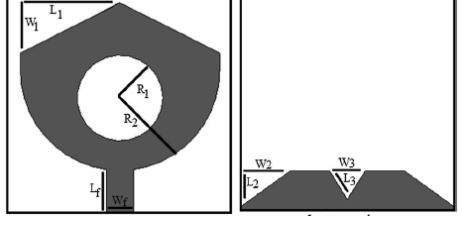
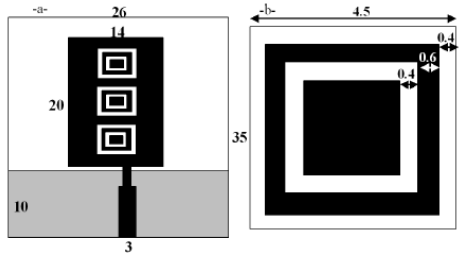
2.4 Etat de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire

Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs travaux de recherche sur la conception d'antennes imprimées ULB, car ces deux technologies combinées sont un bon candidat pour le futur des télécommunications. Les antennes concernées sont présentées dans le tableau 2.1, disposées progressivement du plus petit au plus grand.

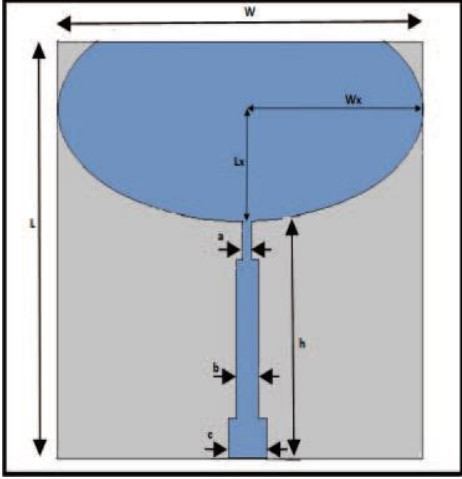
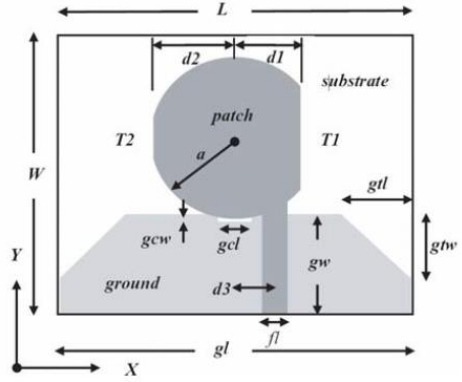
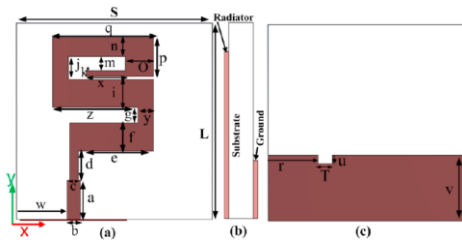
Type d'antenne	Aperçu de l'antenne	Dimensions	caractéristiques	Réf
Antenne hexagonale	 <p>Face avant Face arrière</p>	25x20mm ²	$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.1-12.18] GHz	[19]
Antenne octogonale		24x26mm ²	$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.45-14.51] GHz	[9]
Antenne de forme quelconque		25x25mm ²	$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.8-15.4] GHz	[20]

<p>Antenne diamant</p>	 <p>Face avant</p> <p>Face arrière</p>	<p>24x29mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.80-11.50] GHz</p>	<p>[21]</p>
<p>Antenne rectangulaire</p>	 <p>Face avant</p> <p>Face arrière</p>	<p>24x30mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.86-12.2] GHz</p>	<p>[22]</p>
<p>Antenne diamant</p>	 <p>Face avant</p> <p>Face arrière</p>	<p>25x30mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.7-10.3] GHz</p>	<p>[12]</p>

<p>Antenne quasi elliptique</p>		<p>26x31mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [1.25-40] GHz</p>	<p>[23]</p>
<p>Antenne circulaire modifiée</p>	<p>Face avant Face arrière Vue de coté</p>	<p>24x36mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.1-14.6] GHz</p>	<p>[24]</p>
<p>Antenne rectangulaire</p>	<p>Face avant Face arrière</p>	<p>27.6x32mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.2-23.9] GHz</p>	<p>[25]</p>

<p>Antenne rectangulaire</p>	 <p>Vue de coté Face avant Face arrière</p>	<p>27x33mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.2-14] GHz</p>	<p>[26]</p>
<p>antenne modifiée en forme de U</p>	 <p>Face avant Face arrière</p>	<p>30x30mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3-20] GHz</p>	<p>[11]</p>
<p>Antenne rectangulaire</p>		<p>26x35mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.33-16.96] GHz</p>	<p>[27]</p>

<p>Antenne octogonale</p>	<p>Face avant Face arrière</p>	<p>27.1x37.8mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.17-11.61] GHz</p>	<p>[28]</p>
<p>Antenne rectangulaire</p>		<p>33x35mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2 -10.7] GHz</p>	<p>[10]</p>
<p>Antenne rectangulaire</p>		<p>34x34mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.63-12] GHz</p>	<p>[29]</p>

<p>Antenne elliptique</p>		<p>38x32mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [2.86-14.9] GHz</p>	<p>[30]</p>
<p>Antenne Circulaire</p>		<p>33x37mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.3-12] GHz</p>	<p>[31]</p>
<p>antenne modifiée en forme de S</p>	 <p>Face avant Vue de côté Face arrière</p>	<p>35x35mm²</p>	<p>$S_{11} < -23\text{dB}$ BP= [3.09-40.2] GHz</p>	<p>[32]</p>

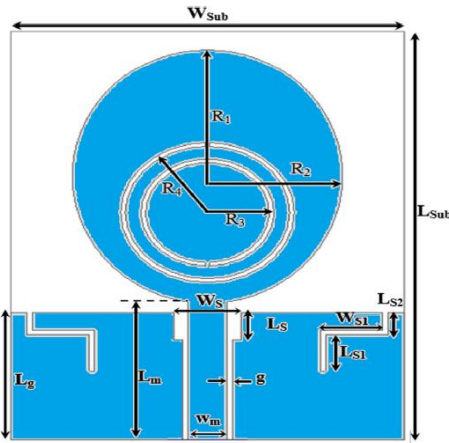
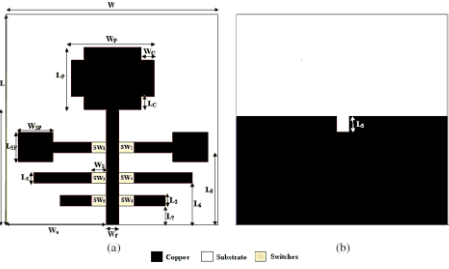
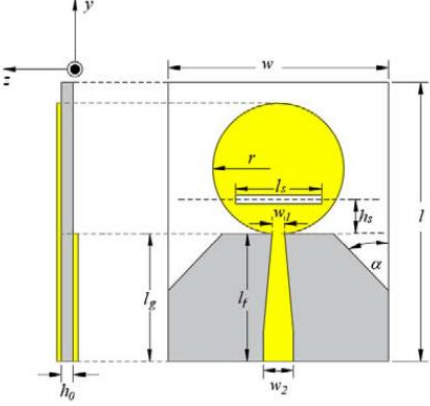
<p>Antenne elliptique</p>		<p>35x45mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [1.05-13] GHz</p>	<p>[36]</p>
<p>Antenne rectangulaire modifiée</p>	 <p>Face avant Face arrière</p>	<p>40x40mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3-12] GHz</p>	<p>[37]</p>
<p>Antenne circulaire</p>	 <p>Vue de coté Face avant</p>	<p>37x47mm²</p>	<p>$S_{11} < -10\text{dB}$ BP= [3.1-10.6] GHz</p>	<p>[38]</p>

Tableau 2.1. Quelques antennes ULB en technologie planaire.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, après un aperçu sur la technologie ULB en donnant leur définition, historique et quelques applications, un état de l'art sur les antennes planaire ULB a été présenté. Le chapitre suivant concerne la conception et la simulation d'antennes ULB miniatures.

Chapitre 3

Conception et simulation d'antennes ULB compactes

3.1 Introduction

La conception d'antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape essentielle afin de gagner du temps et d'optimiser la structure aux paramètres souhaités. Pour cela, nous avons choisi l'outil de simulation électromagnétique CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio). Plus de détails sur ce logiciel sont donnés en Annexe.

Dans ce chapitre, trois nouvelles antennes imprimées ont été dimensionnées, simulées et optimisées. Les résultats de simulations obtenues montrent le bon fonctionnement de ces antennes.

Ce chapitre est organisé comme suit. Après la présentation du cahier des charges, les performances en simulation des trois antennes proposées seront présentées et discutées. Ensuite, des études paramétriques pour chaque antenne seront présentées afin de comprendre le fonctionnement de ces antennes. Enfin, un tableau résume les résultats de simulations des trois antennes proposées.

3.2 Spécifications techniques (cahier des charges)

Les antennes à concevoir doivent être en technologie imprimée et doivent satisfaire les spécifications techniques résumées dans le tableau 3.1. Le substrat utilisé est le FR-4 avec une permittivité relative (ϵ_r) de 4.3 et un tangent delta des pertes ($\tan\delta$) de 0.025 et d'épaisseur (h) de 1.6 mm. Nous avons choisi FR-4 en raison de sa disponibilité.

Performance	Spécification
Bande passante	[3.1 - 10.6] GHz
Taille	La plus compacte possible
Adaptation	$ S_{11} < -10$ dB
Diagramme de rayonnement	Relativement stable

Tableau 3.1. Cahier des charges.

3.3 Antenne 1

3.3.1. Description de l'antenne

La structure de l'antenne 1 étudiée est constituée d'un patch en forme rectangulaire modifiée de longueur L_{rec} et de largeur W_{rec} , ce patch est conçu par soustraction de deux triangles dans chaque coin, comme illustrée dans la figure 3.1. L'élément rayonnant est alimenté par une ligne microruban en utilisant un transformateur d'impédance.

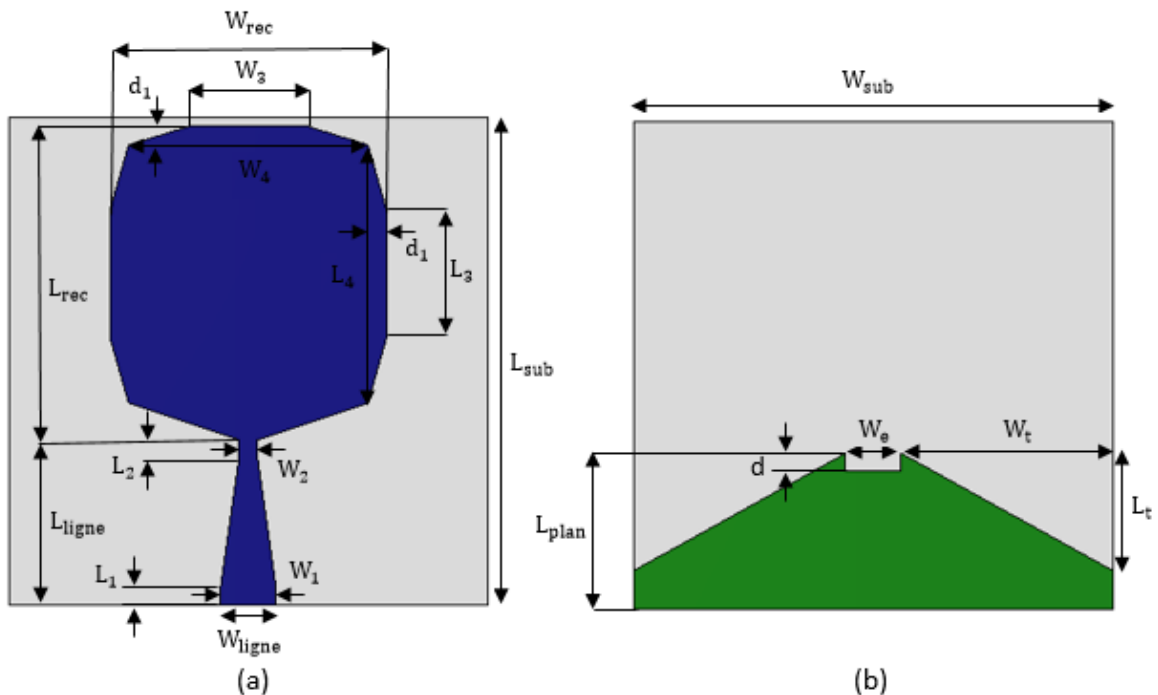


Figure 3.1. Géométrie de l'antenne 1 étudiée, (a) face avant de l'antenne 1
(b) face arrière de l'antenne 1.

Les paramètres géométriques de cette antenne sont regroupés dans le tableau 3.2 avec une dimension totale de $26 \times 26.5 \times 1.6 \text{ mm}^3$. Les valeurs de ces paramètres sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	L_{sub}	W_{sub}	L_{ligne}	W_{ligne}	L_{plan}	W_{rec}	L_{rec}	W_1	L_1	W_2
Valeur (mm)	26.5	26	9	3	8.5	15	17	3	1	1
Paramètre	L_2	W_3	L_3	W_4	L_4	W_e	d	d_1	W_t	L_t
Valeur (mm)	1	6.5	7	13	14	3	1	1	11.5	6.375

Tableau 3.2. Dimensions de l'antenne 1 étudiée.

3.3.2. Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sont discutés en termes de coefficient de réflexion, les diagrammes de rayonnement, efficacité et gain.

- **Coefficient de réflexion :**

Nous allons représenter pour cette antenne le coefficient de réflexion, qui va nous permettre de visualiser la bande passante désirée. La figure 3.2 représente l'évolution du module du coefficient de réflexion simulé (en dB) en fonction de la fréquence de l'antenne de la figure 3.1.

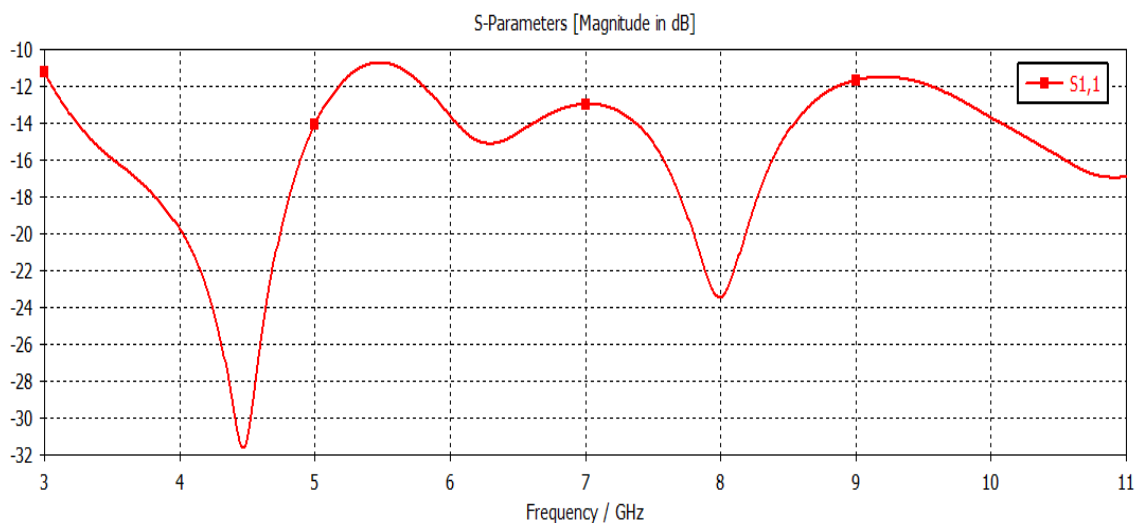


Figure 3.2. Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 1.

D'après la figure 3.2, l'évolution du module du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence, montre que la réponse en fréquence à -10 dB peut couvrir une bande large qui varie de 3 à 11 GHz ($BP_{relative} > 114\%$).

- **Diagrammes de rayonnement :**

Le tableau 3.3 illustre les diagrammes de rayonnements simulés en 2D de l'antenne 1 pour différentes fréquences : 3 GHz, 5 GHz, 7 GHz, 9 GHz et 11 GHz, dans le plan E ($\varphi=0^\circ$) et le plan H ($\varphi=90^\circ$).

Fréquence	Plan E	Plan H
f=3 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>
f=5 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>
f=7 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>
f=9 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>

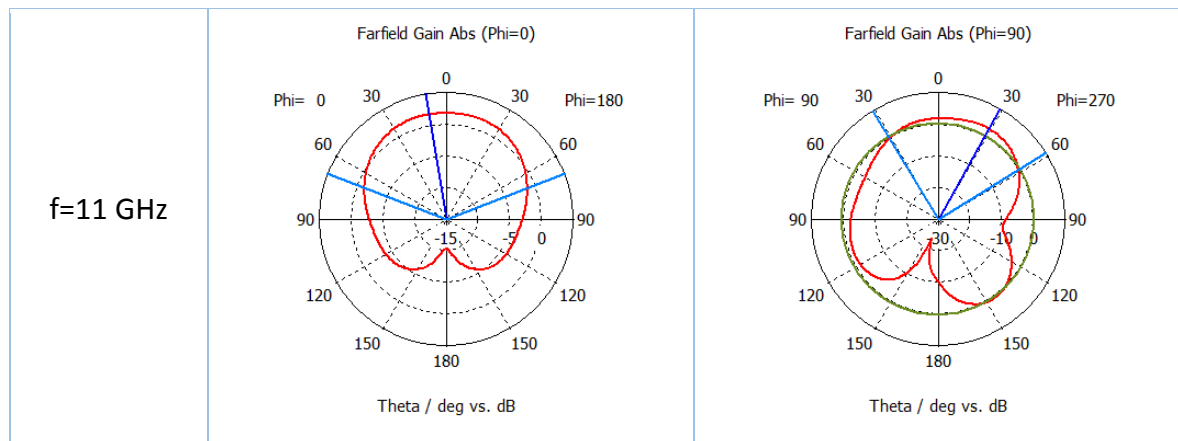


Tableau 3.3. Diagramme de rayonnement aux cinq fréquences de l'antenne 1 dans le plan E et H.

• **Efficacité totale :**

La figure 3.3 représente l'efficacité de l'antenne 1 en fonction de la fréquence. On remarque qu'à la fréquence 3 GHz, le maximum d'efficacité observé est de 0.9, donc l'efficacité totale de cette antenne est 90%.

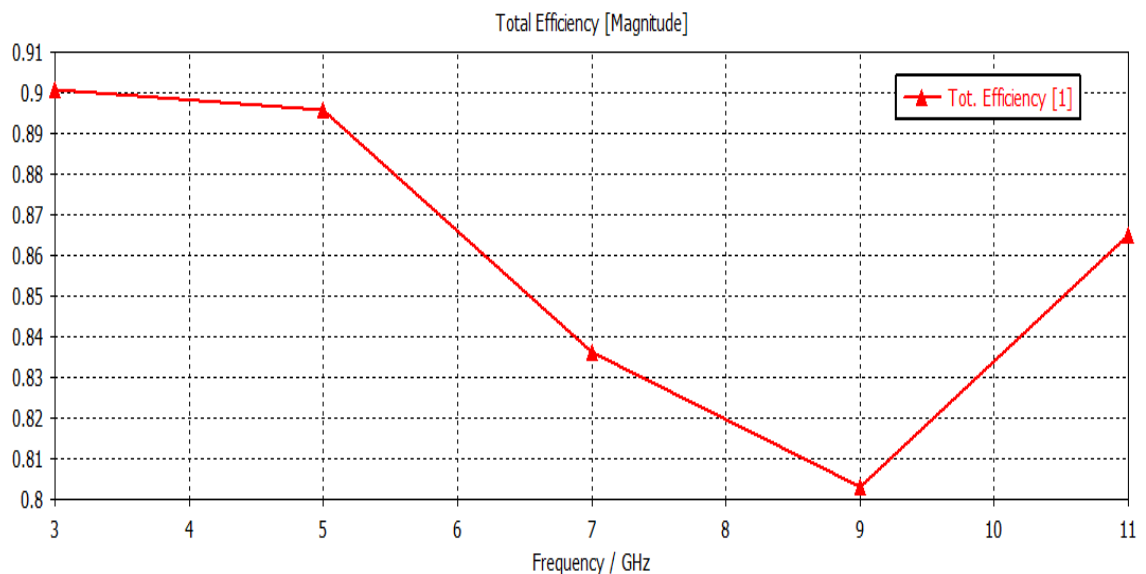


Figure 3.3. L'efficacité totale de l'antenne 1.

• **Gain :**

La figure 3.4 représente le gain de l'antenne 1 en fonction de la fréquence. On observe que le gain varie entre 2 et 3.4 sur toute la bande [3 à 11GHz]. Et on remarque que le gain maximal de l'antenne égal à 3.38 à la fréquence 5 GHz.

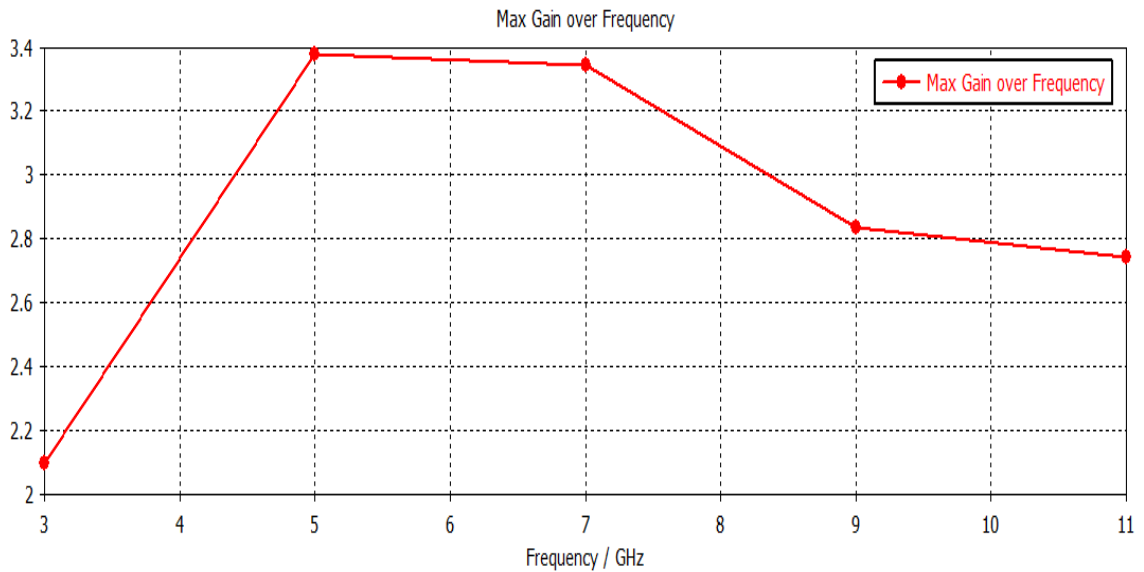


Figure 3.4. Gain de l'antenne 1.

3.3.3. Etudes paramétriques

Dans le but d'améliorer et d'optimiser les performances de la structure, notamment en termes d'adaptation sur une large bande de fréquences, des études paramétriques sur l'antenne conçue précédemment seront présentées et discutées. L'étude portera sur trois paramètres :

- W_{sub} (largeur du substrat).
- d (profondeur de l'encoche).
- W_e (largeur de l'encoche).

Un seul paramètre sera changé à la fois, les autres dimensions seront fixées (tableau 3.2).

a. Paramètre W_{sub}

La figure ci-dessous représente le changement du coefficient S_{11} , pour des différentes valeurs du largeur du substrat ($W_{sub}=18, 22, 26, 28, 30$ mm), en fonction de fréquence.

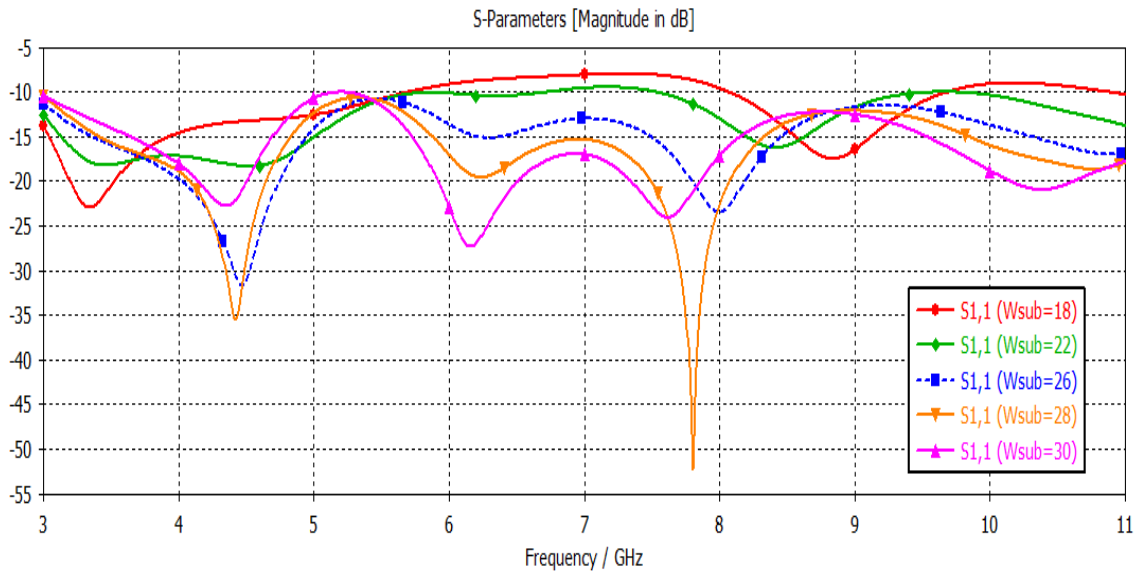


Figure 3.5. Coefficient de réflexion de l'antenne 1 pour différentes valeurs de W_{sub} .

D'après les résultats présents dans la figure 3.5, une bonne adaptation est assurée sur une très large bande pour les valeurs de $W_{sub} = 26, 28$ mm, et on peut observer que la meilleure largeur de substrat parmi les deux est 26 mm.

b. Paramètre d

La variation du paramètre d (profondeur de l'encoche) sur le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 1 est illustrée par la figure 3.6, pour les valeurs de (d) de 0.5 mm à 2.5 mm avec un pas de 0.5 mm.

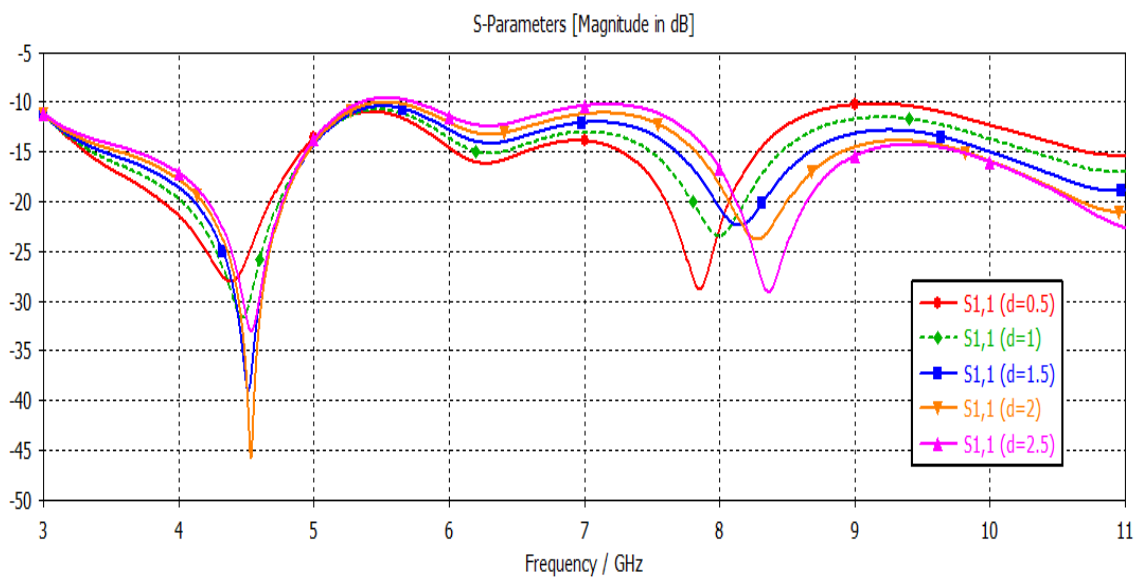


Figure 3.6. Coefficient de réflexion de l'antenne 1 pour différentes valeurs de d.

On remarque que le paramètre $d=1$ a donné de bons résultats en termes d'adaptation et de bande passante.

c. Paramètre W_e

La figure 3.7 montre les variations du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur de l'encoche (W_e) de 2 mm à 4 mm avec un pas de 0.5 mm.

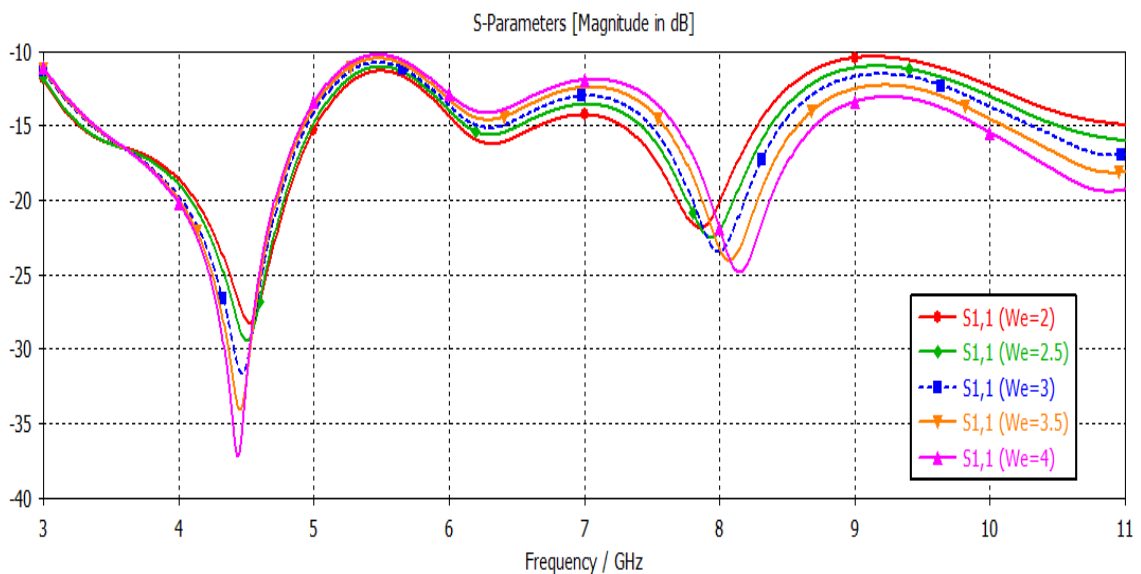


Figure 3.7. Coefficient de réflexion de l'antenne 1 pour différentes valeurs de W_e .

On remarque que toutes les valeurs de W_e ont donné de bons résultats en termes d'adaptation et de bande passante, mais la meilleure largeur de l'encoche est 3 mm.

À partir des études paramétriques menées précédemment, les dimensions optimales relatives à l'antenne sont : $W_{sub}=26$ mm, $d=1$ mm, $W_e=3$ mm. Ces dimensions nous permettent d'avoir une antenne possédant les meilleurs résultats en termes de taille, adaptation et bande passante.

Et d'après les études paramétriques de l'antenne 1, on constate qu'elle répond au cahier des charges (tableau 3.1).

3.4 Antenne 2

3.4.1. Description de l'antenne

L'antenne 2 étudiée est de forme rectangulaire alimentée par une ligne microruban d'une impédance caractéristique 50Ω . La géométrie de cette antenne est illustrée sur la figure 3.8. Cette antenne est constituée d'un patch rectangulaire de longueur L_{rec} et de largeur W_{rec} , ce patch est conçu par soustraction de quatre fentes rectangulaires.

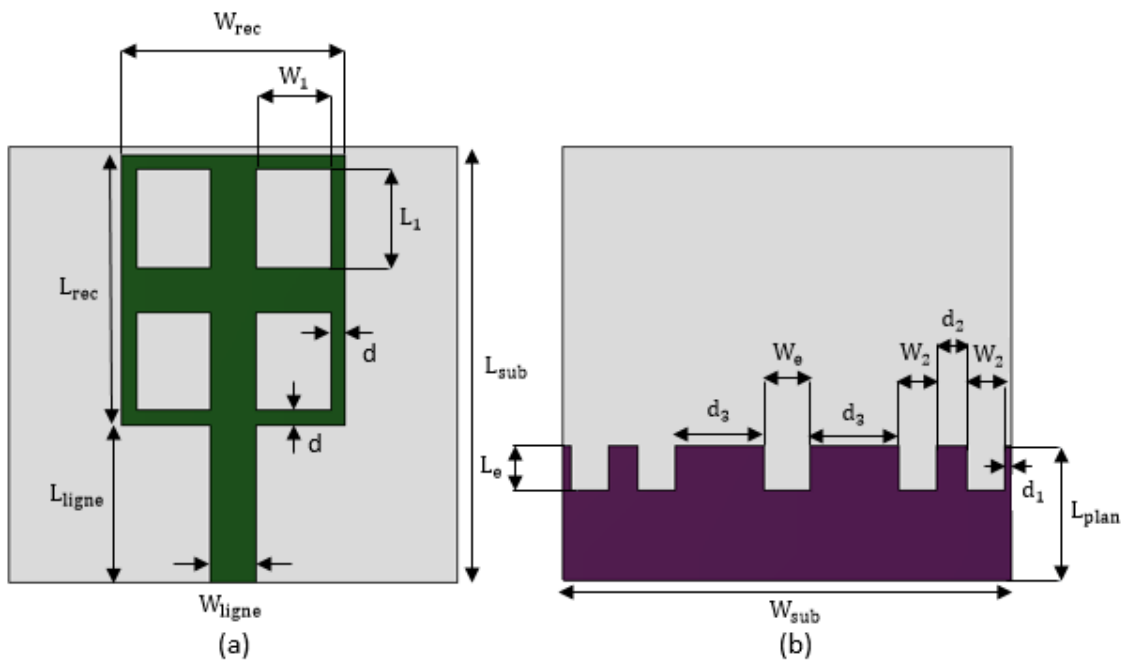


Figure 3.8. Géométrie de l'antenne 2 étudiée, (a) face avant de l'antenne 2
(b) face arrière de l'antenne 2.

Les paramètres géométriques de cette antenne sont représentés dans le tableau 3.4 avec une dimension totale de $30 \times 29 \times 1.6 \text{ mm}^3$.

Paramètre	L_{sub}	W_{sub}	L_{ligne}	W_{ligne}	L_{plan}	W_{rec}	L_{rec}	W_1
Valeur (mm)	29	30	10.5	3	9	15	18	5
Paramètre	L_1	W_2	W_e	L_e	d	d_1	d_2	d_3
Valeur (mm)	6.5	2.5	3	3	1	0.5	2	6

Tableau 3.4. Dimensions de l'antenne 2 étudiée.

3.4.2. Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sont discutés en termes de coefficient de réflexion, les diagrammes de rayonnement, efficacité et gain.

- **Coefficient de réflexion :**

La figure 3.9 représente l'évolution du module du coefficient de réflexion simulé (en dB) en fonction de la fréquence de l'antenne de la figure 3.8.

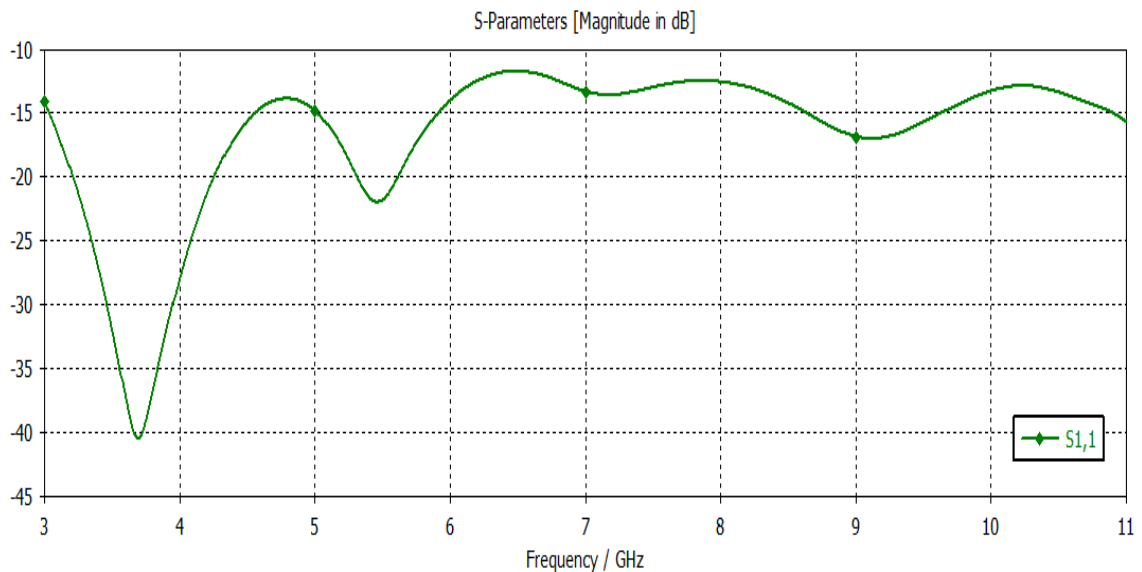
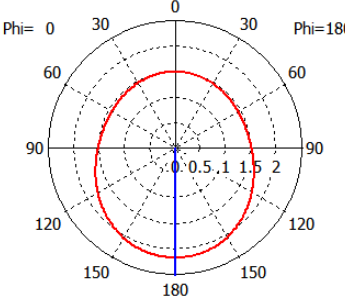
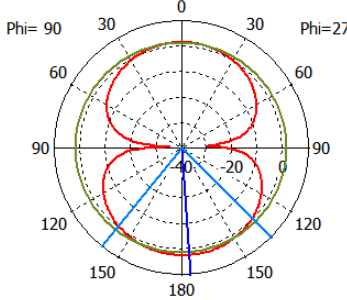
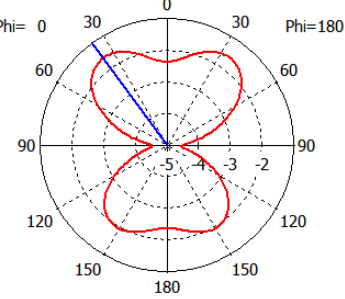
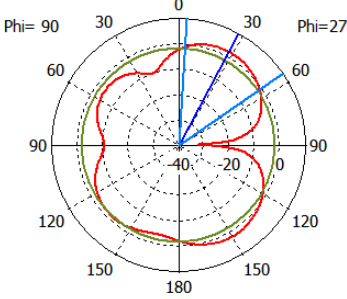
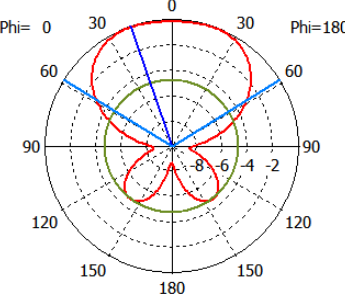
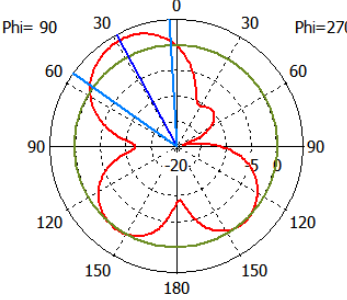
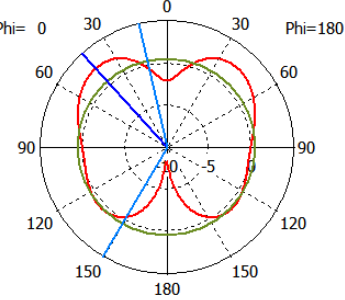
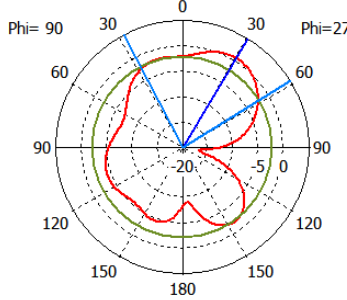


Figure 3.9. Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 2.

La variation du module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de cette structure, représentée sur la figure 3.9, montre que cette antenne peut couvrir la bande suivante [3 - 11] GHz ($BP_{relative} > 114\%$).

- **Diagrammes de rayonnement :**

Le tableau 3.5 montre les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne 2 pour les fréquences : 3 GHz, 5 GHz, 7 GHz, 9 GHz et 11 GHz, et pour les deux plans : le plan E ($\varphi=0^\circ$) et le plan H ($\varphi=90^\circ$).

Fréquence	Plan E	Plan H
f=3 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>
f=5 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>
f=7 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>
f=9 GHz	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>	<p style="text-align: center;">Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p style="text-align: center;">Theta / deg vs. dB</p>

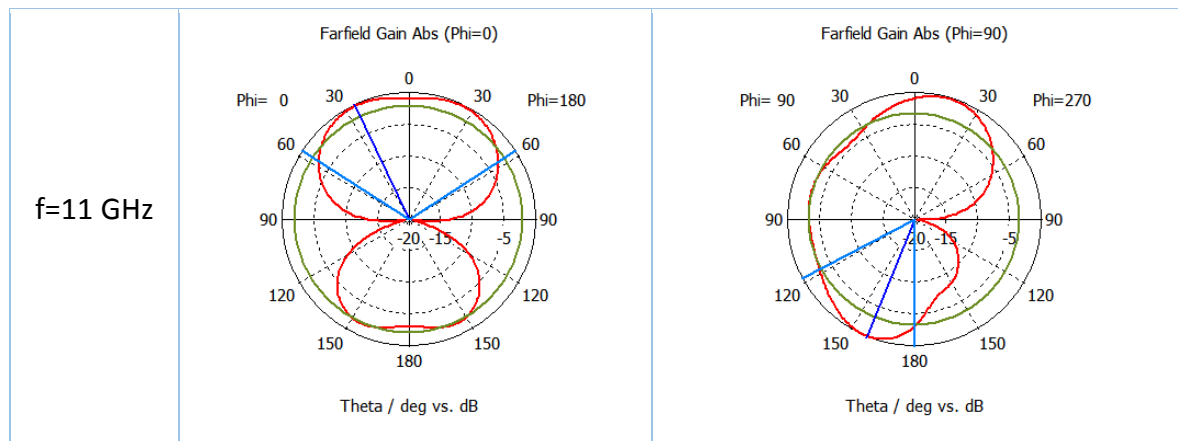


Tableau 3.5. Diagramme de rayonnement aux cinq fréquences de l'antenne 2 dans le plan E et H.

• **Efficacité totale :**

La figure 3.10 représente l'efficacité de l'antenne 2 en fonction de la fréquence. On remarque que l'efficacité maximale de l'antenne 2 égal 91% à la fréquence 3 GHz.

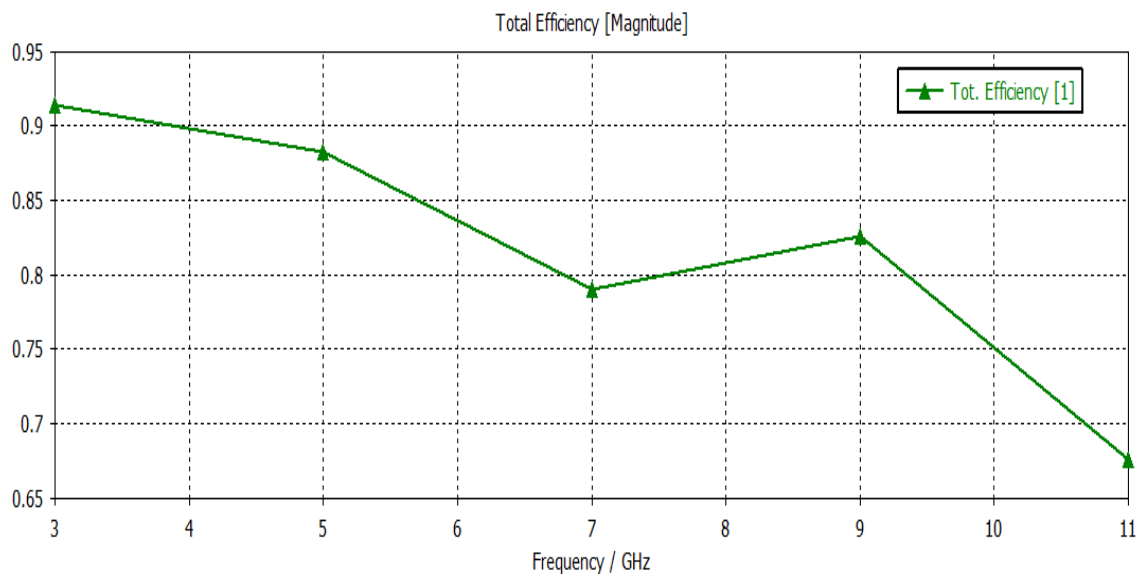


Figure 3.10. L'efficacité totale de l'antenne 2.

• **Gain :**

La figure 3.11 représente le gain de l'antenne 2 en fonction de la fréquence. On remarque que le gain maximal de l'antenne égal à 4 à la fréquence 7 GHz.

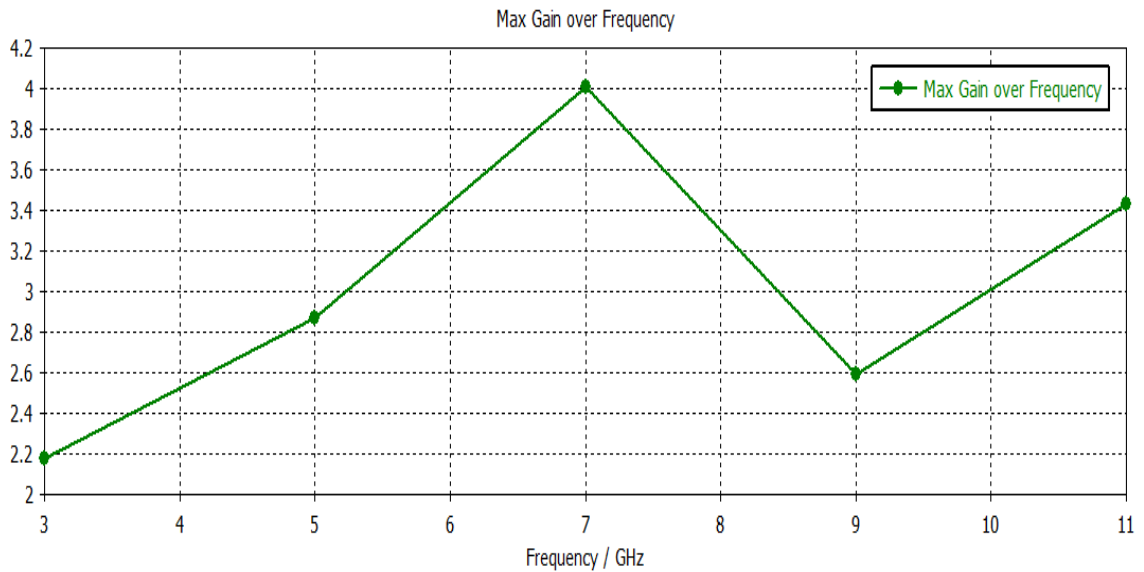


Figure 3.11. Gain de l'antenne 2.

3.4.3. Etudes paramétriques

Dans le but d'étudier l'influence de chaque paramètre sur les performances de la structure en termes d'adaptation et de bande passante, plusieurs études paramétriques sur l'antenne conçue précédemment seront présentées et discutées. Cette étude est réalisée en variant à chaque fois un paramètre et en gardant les autres paramètres constants, les paramètres sont :

- W_{rec} (largeur du patch).
- L_{plan} (longueur du plan de masse).
- L_1 (longueur de la fente).

a. Paramètre W_{rec}

Les résultats de simulation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs du largeur du patch ($W_{rec} = 13, 15, 17, 19$ mm) sont donnés dans la figure 3.12.

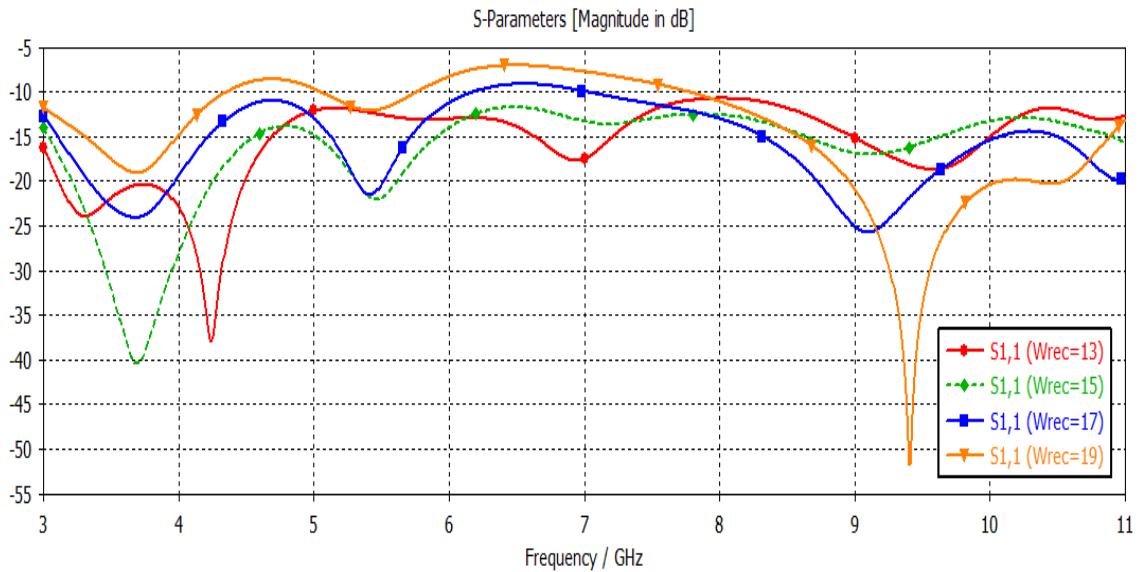


Figure 3.12. Coefficient de réflexion de l'antenne 2 pour différentes valeurs de W_{rec} .

On peut voir d'après la figure 3.12 que l'adaptation se détériore pour les valeurs $W_{rec} > 15$ mm, et on constate que la meilleure largeur du patch c'est $W_{rec} = 15$ mm puisqu'elle joue un rôle déterminant sur l'adaptation et la bande passante de l'antenne.

b. Paramètre L_{plan}

Dans cette partie d'étude, on va varier la longueur du plan de masse (L_{plan}). Les coefficients de réflexion en fonction de la fréquence pour les valeurs de $L_{plan} = 5, 7, 9$ et 11 mm sont montrées dans la figure 3.13.

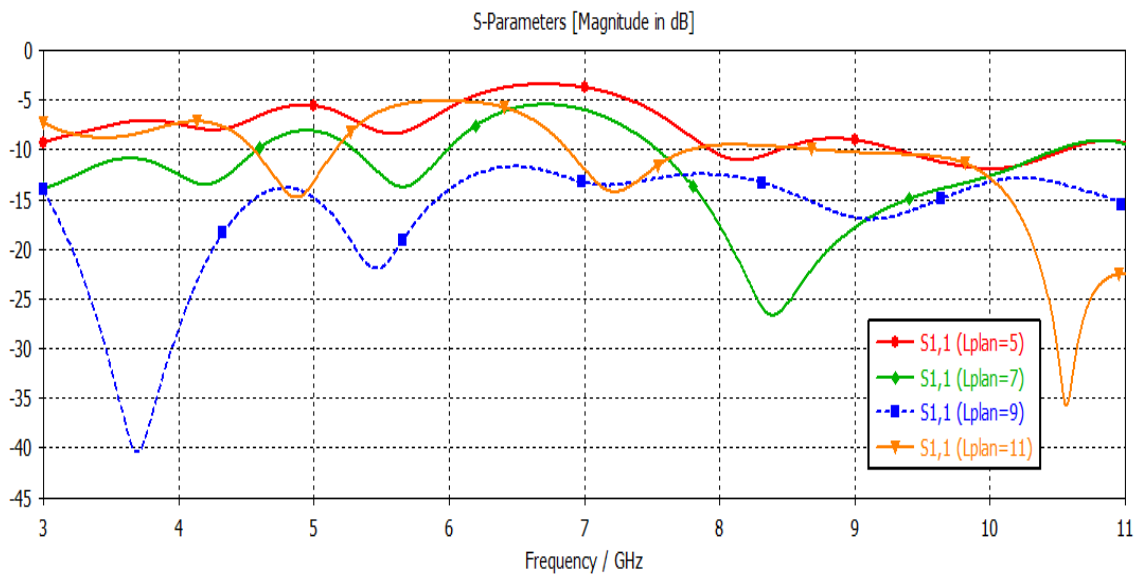


Figure 3.13. Coefficient de réflexion de l'antenne 2 pour différentes valeurs de L_{plan} .

L'analyse de la figure 3.13 indique que les changements dans la longueur du plan de masse (L_{plan}) donnés un grand changement dans le coefficient de réflexion, on remarque que la valeur $L_{\text{plan}}=9$ mm est la seule parmi les autres valeurs qui a donné de bons résultats en termes d'adaptation et de bande passante.

c. Paramètre L_1

Pour étudier l'effet de longueur de la fente sur l'adaptation de l'antenne, on va varier la valeur de L_1 (longueur de la fente), afin de trouver la meilleure longueur, cette variation du paramètre L_1 sur le coefficient de réflexion de l'antenne est montrée par la figure 3.14.

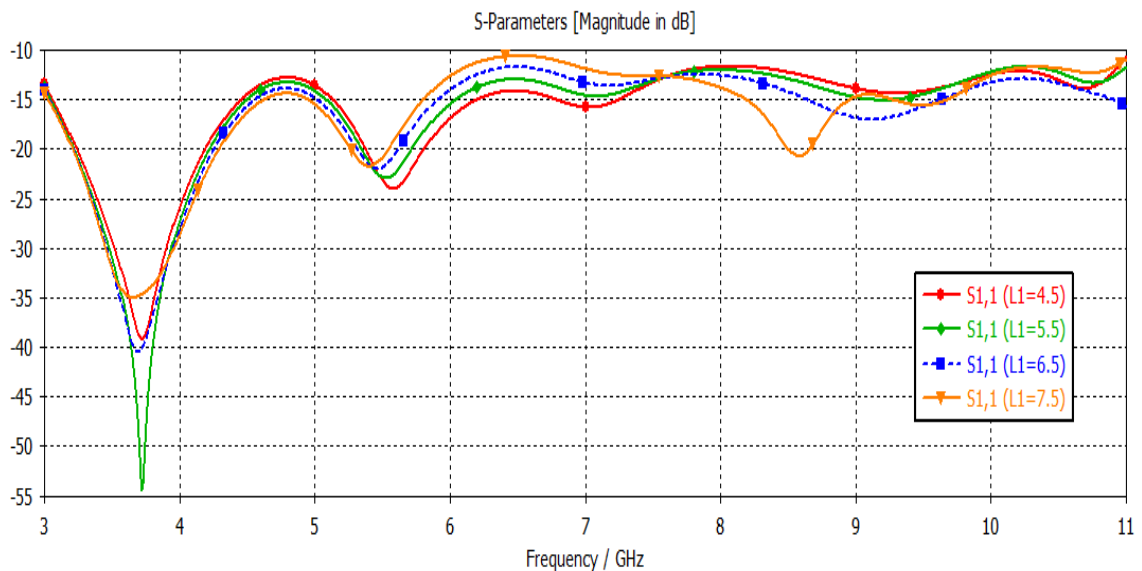


Figure 3.14. Coefficient de réflexion de l'antenne 2 pour différentes valeurs de L_1 .

D'après les résultats de la figure 3.14, on constate que le coefficient de réflexion pour les trois valeurs de la longueur de la fente ($L_1=4.5$, 5.5 et 6.5 mm) sont à peu près équivalents en performances en termes d'adaptation et de bande passante et pour $L_1=7.5$ mm l'adaptation commence à se détériorer à partir de 6 GHz. La meilleure valeur de L_1 est 6.5 mm.

D'après l'étude paramétrique de l'antenne 2, on constate qu'elle répond au cahier des charges (tableau 3.4).

3.5 Antenne 3

3.5.1 Description de l'antenne

La structure de l'antenne 3 étudiée est constituée d'un patch en forme rectangulaire de longueur L_{rec} et de largeur W_{rec} , ce patch est conçu par soustraction de sept carrés sous forme d'escaliers au niveau de chaque coin de patch, et un seul carré au milieu. Le plan de masse est un plan partiel imprimé sur la surface de dessous du substrat. La géométrie de cette antenne est illustrée sur la figure 3.15. L'élément rayonnant est alimenté par une ligne microruban en utilisant un transformateur d'impédance.

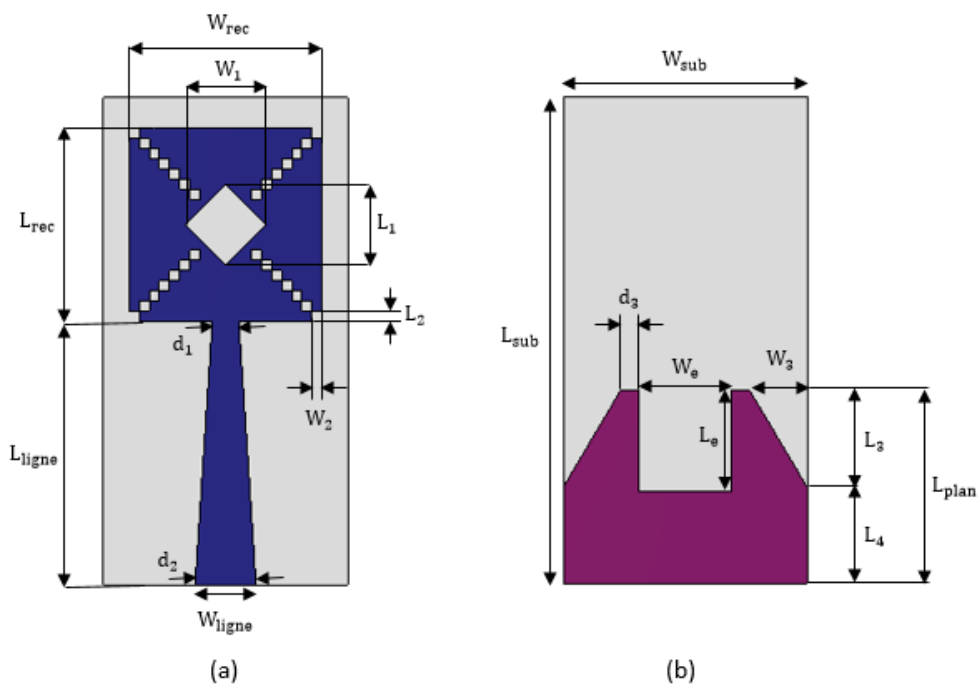


Figure 3.15. Géométrie de l'antenne 3 étudiée, (a) face avant de l'antenne 3
(b) face arrière de l'antenne 3.

Les valeurs des paramètres géométriques de cette antenne sont mentionnées dans le tableau 3.6 avec une dimension totale de $12 \times 24 \times 1.6 \text{ mm}^3$.

Paramètre	L_{sub}	W_{sub}	L_{ligne}	W_{ligne}	L_{plan}	W_{rec}	L_{rec}	W_1	L_1	W_2
Valeur (mm)	24	12	13	3	9.5	9.5	9.5	4	4	0.5
Paramètre	L_2	W_3	L_3	L_4	W_e	L_e	d_1	d_2	d_3	
Valeur (mm)	0.5	2.8125	4.75	4.75	4.5	5	1.3	3	0.9375	

Tableau 3.6. Dimensions de l'antenne 3 étudiée.

3.5.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sont discutés en termes de coefficient de réflexion, les diagrammes de rayonnement, efficacité et gain.

- **Coefficient de réflexion :**

Le résultat de simulation du coefficient de réflexion S_{11} (en dB) en fonction de la fréquence de l'antenne de la figure 3.15 est donné dans la figure 3.16. Ce résultat montre que l'antenne présente une bonne adaptation dans la bande [3 - 11] GHz, avec un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB, et une bande passante relative de 114%.

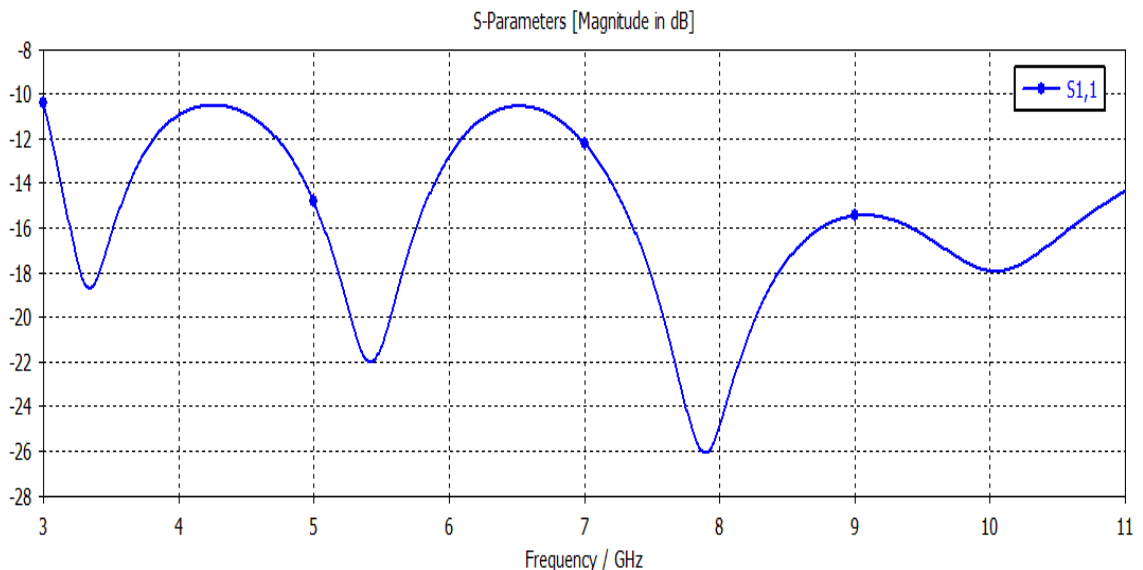
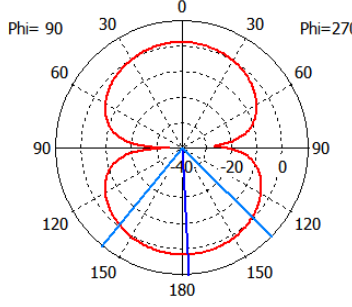
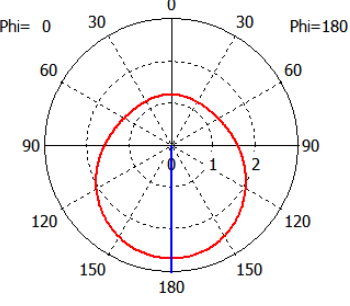
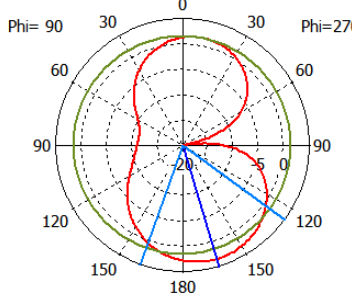
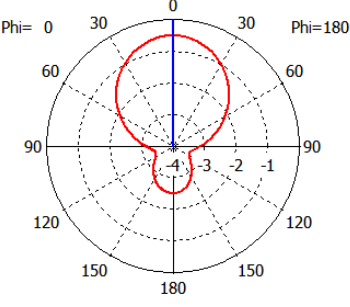
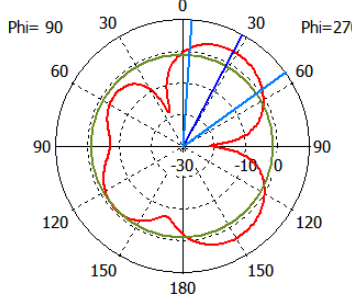
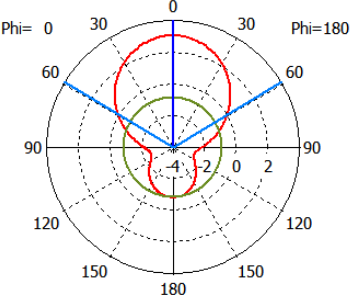
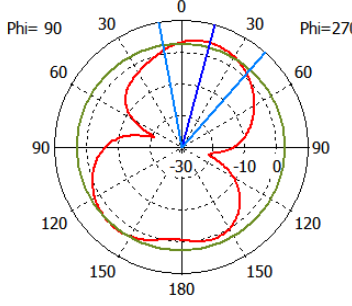


Figure 3.16. Le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 3.

- **Diagrammes de rayonnement :**

Le tableau ci-dessous représente les diagrammes de rayonnement en 2D de l'antenne 3 pour les fréquences 3 GHz, 5 GHz, 7 GHz, 9 GHz et 11 GHz. On a tracé les diagrammes dans les deux principaux plans de l'antenne : dans le plan E ($\varphi=0^\circ$) et dans le plan H ($\varphi=90^\circ$).

Fréquence	Plan E	Plan H
f=3 GHz	<p>Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>	<p>Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>
f=5 GHz	<p>Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>	<p>Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>
f=7 GHz	<p>Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>	<p>Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>
f=9 GHz	<p>Farfield Gain Abs (Phi=0)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>	<p>Farfield Gain Abs (Phi=90)</p>  <p>Theta / deg vs. dB</p>

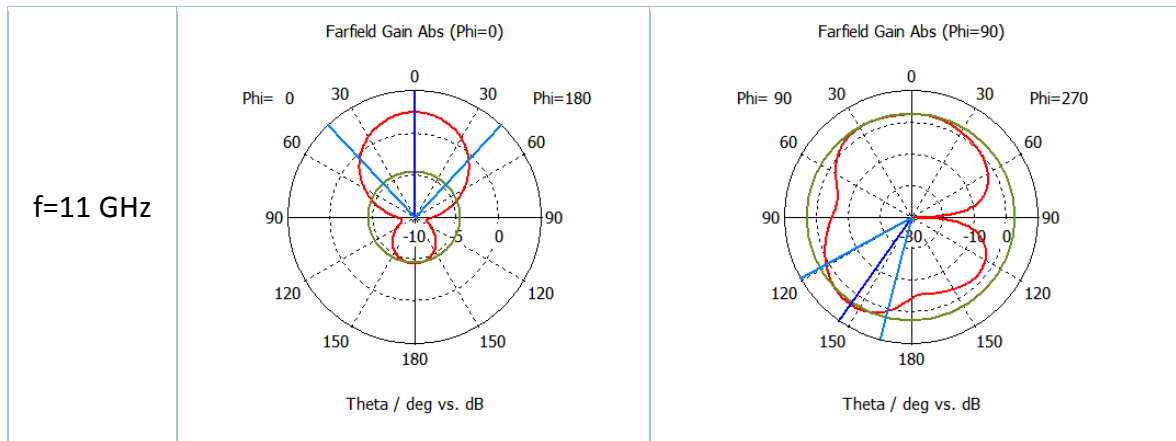


Tableau 3.7. Diagramme de rayonnement aux cinq fréquences de l'antenne 3 dans le plan E et H.

• **Efficacité totale :**

L'efficacité totale de l'antenne 3 en fonction de la fréquence est représentée dans la figure 3.17. On remarque que l'efficacité maximale de l'antenne 3 égal 89% à la fréquence 5 GHz.

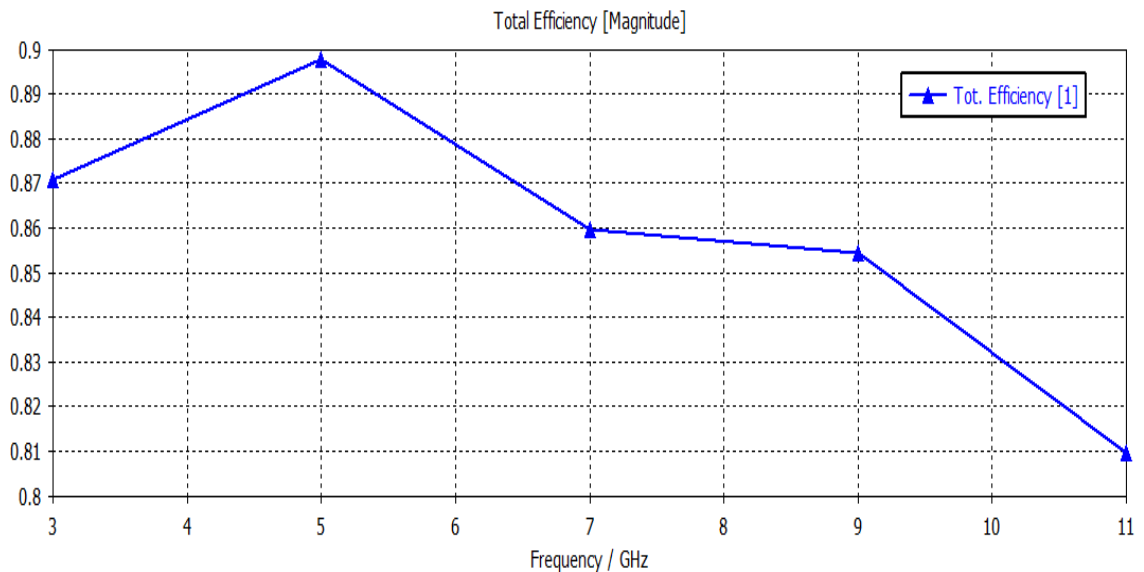


Figure 3.17. L'efficacité totale de l'antenne 3.

• **Gain :**

La figure 3.18 représente le gain de l'antenne 3 en fonction de la fréquence. Ce gain varie entre 1.7 et 4.2 dB sur la bande d'adaptation de l'antenne. Un maximum de gain de 4.13 est obtenu à la fréquence 9 GHz.

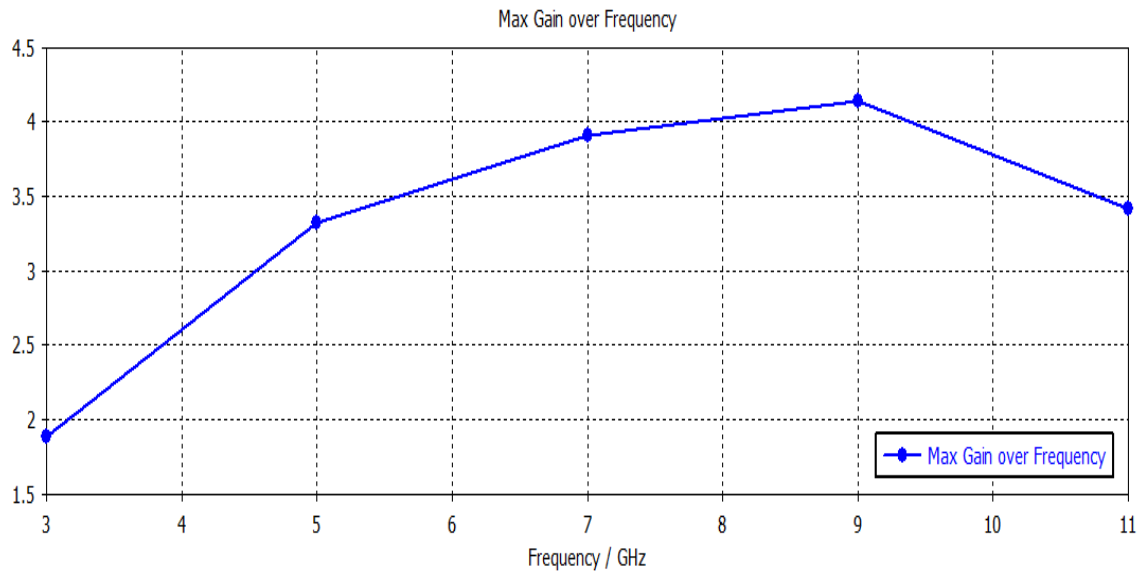


Figure 3.18. Gain de l'antenne 3.

3.5.3 Etudes paramétriques

Des études paramétriques ont été réalisées, afin d'analyser l'effet de certains paramètres géométriques de l'antenne (tableau 3.6) sur les performances de l'antenne et en particulier en termes d'adaptation et de bande passante. Pour les études paramétriques de cette partie, en changeant à la fois un seul paramètre et en gardant les autres dimensions inchangées, les paramètres sont :

- L_{plan} (longueur du plan de masse).
- L_{ligne} (longueur de la ligne microruban).
- W_e (largeur de l'encoche).
- L_e (profondeur de l'encoche).

a. Paramètre L_{plan}

Dans cette partie d'étude, en variant la longueur du plan de masse (L_{plan}) et en gardant les autres paramètres inchangés, la figure 3.19 montre l'influence de cette longueur sur le coefficient de réflexion de l'antenne.

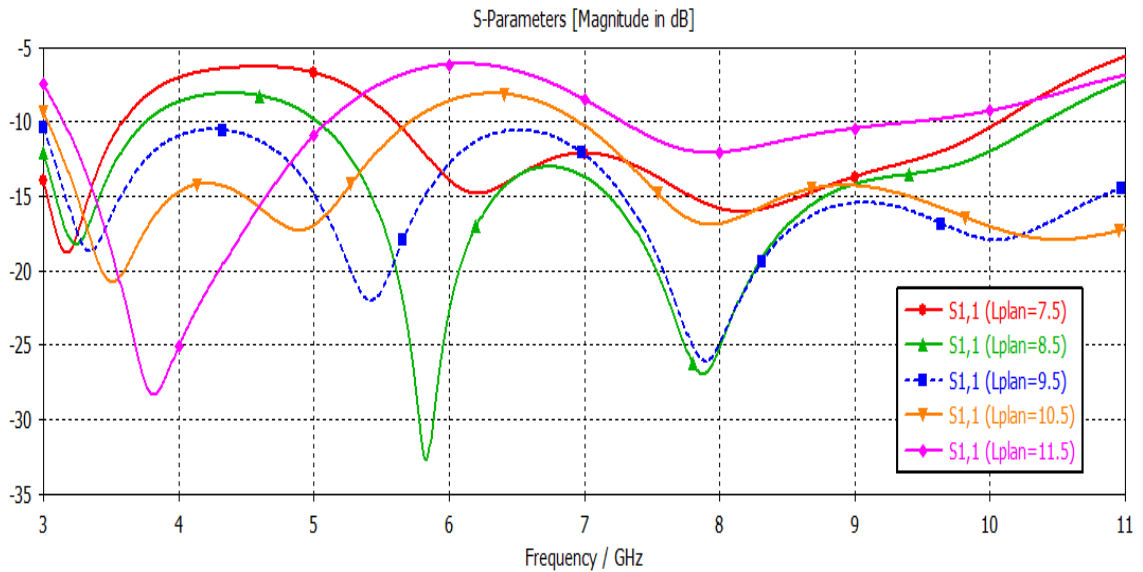


Figure 3.19. Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de L_{plan} .

D'après les résultats présents dans la figure 3.19, une bonne adaptation est assurée dans la bande [3 - 11] GHz pour la valeur de $L_{plan}=9.5$ mm.

b. Paramètre L_{ligne}

La variation du paramètre L_{ligne} (longueur de la ligne microruban) sur le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne 3 est illustrée par la figure 3.20, pour des différentes valeurs de la longueur de la ligne microruban ($L_{ligne}=10, 11, 12, 13$ et 14 mm).

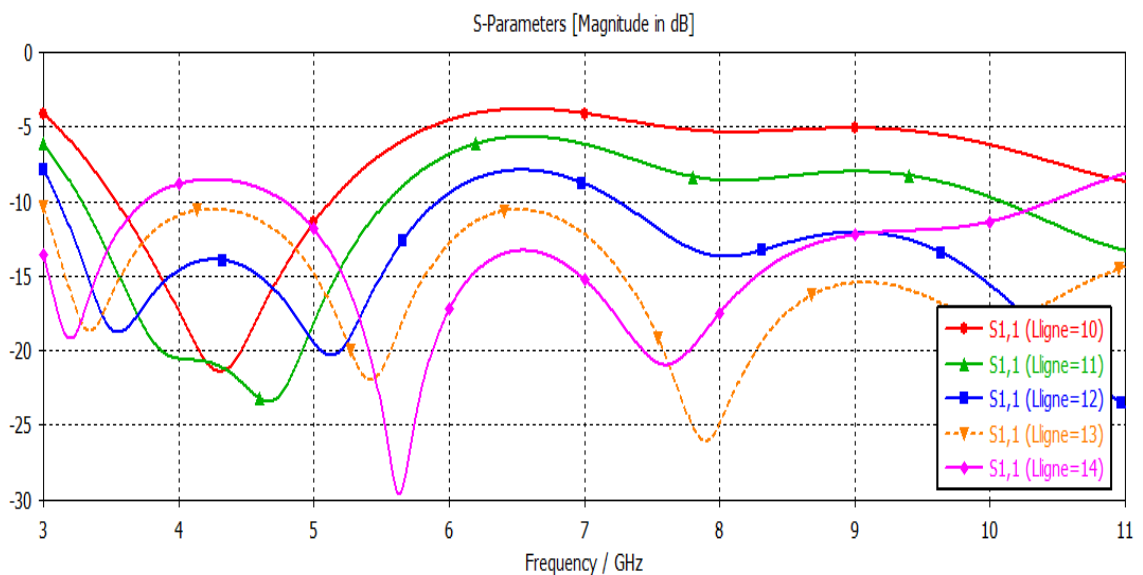


Figure 3.20. Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de L_{ligne} .

L'analyse de la figure 3.20 montre que la longueur de la ligne microruban (L_{ligne}) joue un rôle déterminant sur l'adaptation et la bande passante de l'antenne. Et on remarque que le paramètre $L_{\text{ligne}}=13$ mm la seule qui nous donne de bons résultats au niveau du coefficient de réflexion.

c. Paramètre W_e

La figure 3.21 représente le changement du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la largeur de l'encoche (W_e) de 3.5 mm à 5.5 mm avec un pas de 0.5 mm.

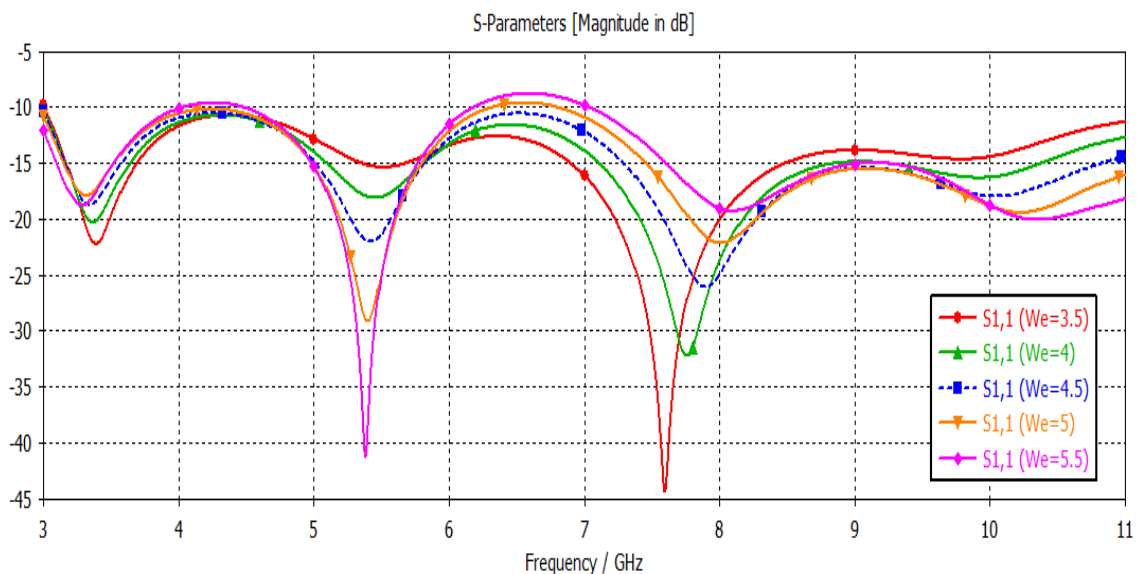


Figure 3.21. Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de W_e .

On peut voir d'après la figure 3.5 qu'une bonne adaptation est assurée sur une large bande passante qui s'étale de 3 GHz à 11 GHz, pour les valeurs de $W_e=4, 4.5$ mm, et on peut observer que la meilleure largeur de l'encoche parmi les deux est 4.5 mm.

d. Paramètre L_e

La figure 3.22 montre l'effet de la variation du paramètre L_e qui est la longueur de l'encoche sur le coefficient de réflexion de l'antenne.

D'après cette figure, on remarque que la valeur $L_e=5$ mm est la seule parmi les autres valeurs qui a donné de bons résultats en termes d'adaptation et de bande passante.

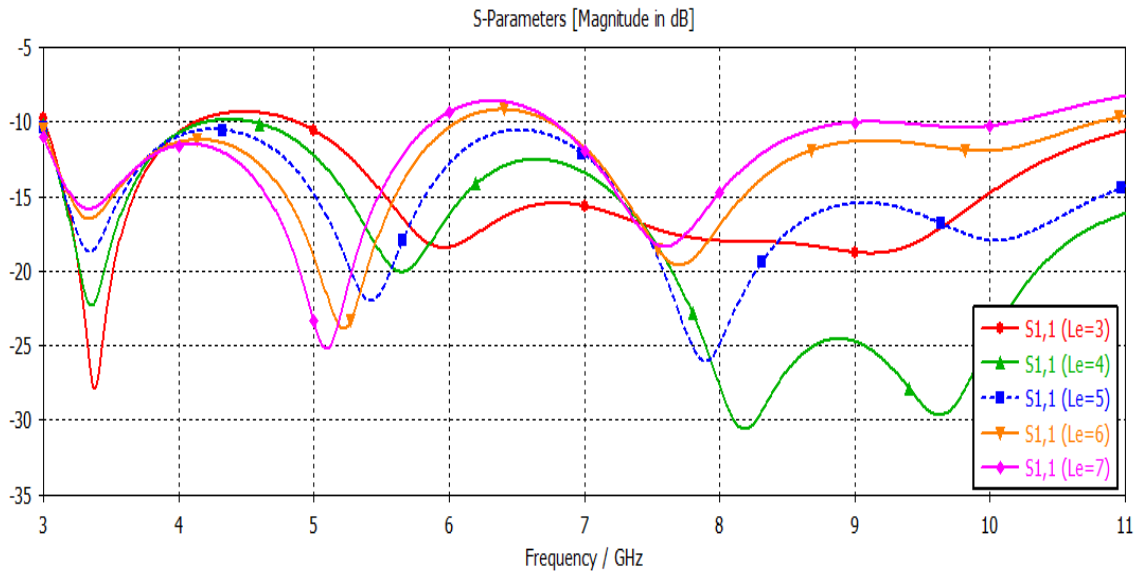


Figure 3.22. Coefficient de réflexion de l'antenne 3 pour différentes valeurs de L_e .

D'après les études paramétriques effectuées précédemment, les valeurs retenues pour notre antenne sont : $L_{\text{plan}}=9.5$ mm, $L_{\text{ligne}}=13$ mm, $W_e=4.5$ mm et $L_e=5$ mm. Ces valeurs nous permettent d'avoir des bons résultats en termes du coefficient de réflexion et de la bande passante pour notre antenne.

D'après ces études paramétriques, on constate que l'antenne 3 répond au cahier des charges (tableau 3.6).

3.6 Comparaison entre les trois antennes

Les figures 3.23, 3.24 et 3.25 représentent la comparaison entre les trois types d'antenne conçues précédemment (antenne 1, 2 et 3), cette comparaison a été faite en termes de coefficient de réflexion, efficacité et gain, respectivement.

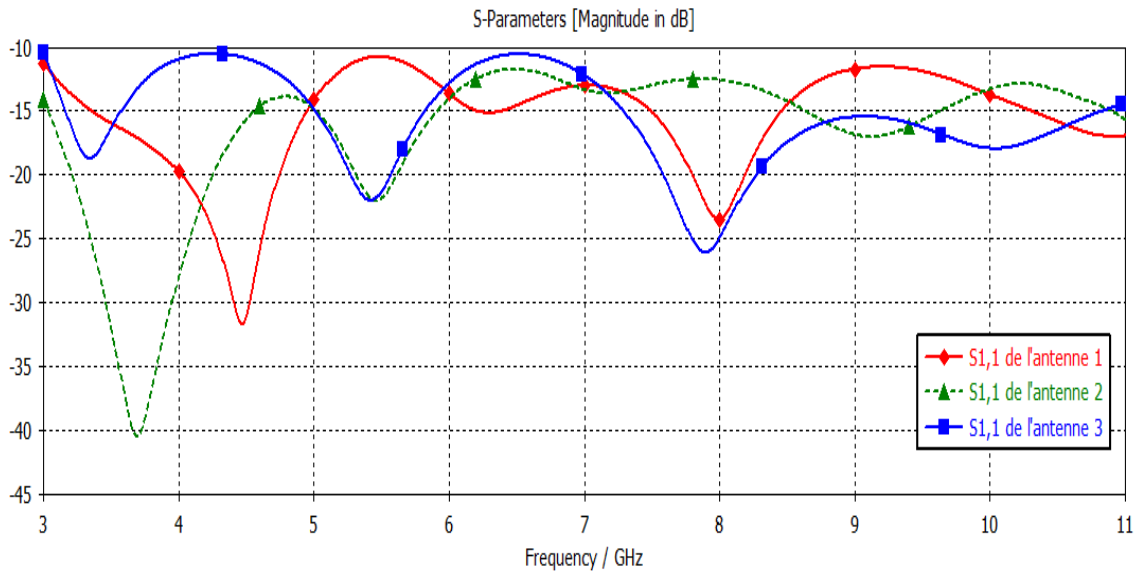


Figure 3.23. Comparaison entre les coefficients de réflexion des trois différentes structures d'antennes.

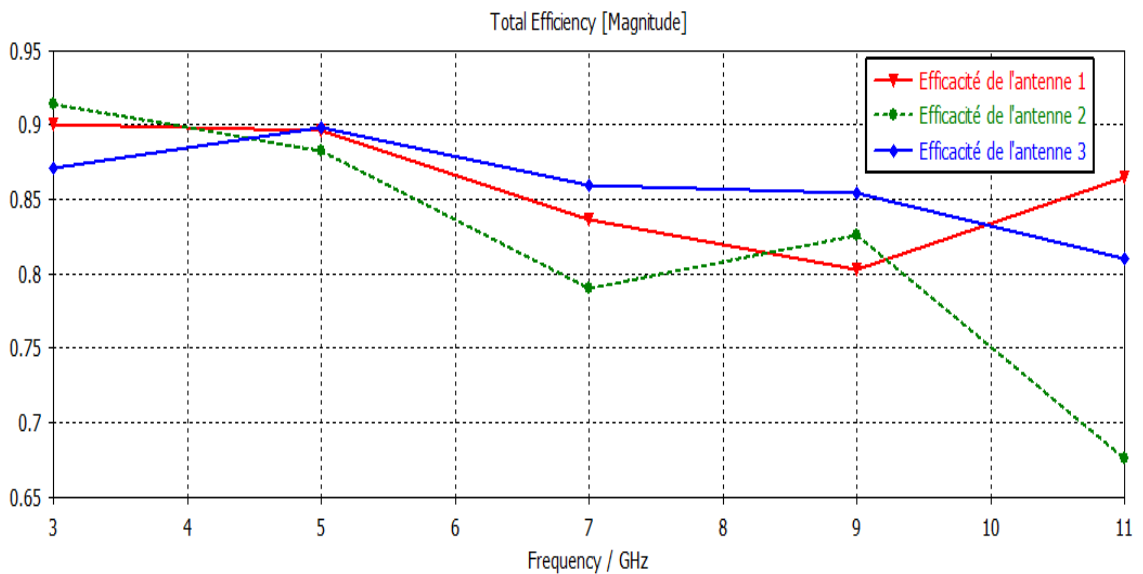


Figure 3.24. Comparaison entre les efficacités des trois différentes structures d'antennes.

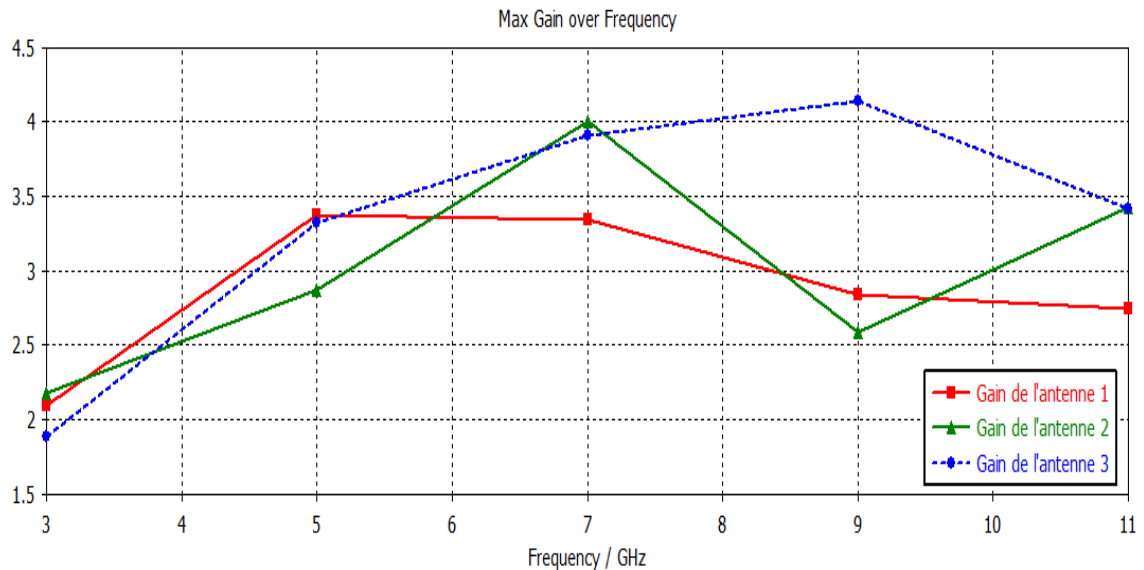


Figure 3.25. Comparaison entre les gains des trois différentes structures d'antennes.

Le tableau 3.8 résume les résultats de simulations des trois structures d'antennes (antenne 1, 2 et 3).

Caractéristiques	Antenne 1	Antenne 2	Antenne 3
Dimensions (mm)	26x26.5x1.6	30x29x1.6	12x24x1.6
Bande passante (GHz)	[3-11] GHz	[3-11] GHz	[3-11] GHz
Coefficient de réflexion (dB)	$S_{11} < -10.75$	$S_{11} < -11.7$	$S_{11} < -10.4$
Efficacité (max en %)	90%	91%	89%
Gain (max)	3.38	4	4.14

Tableau 3.8. Tableau Comparatif entre les trois différentes structures d'antennes.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la simulation électromagnétique et à la conception d'antennes imprimées ULB. Après avoir présenté le cahier des charges, trois nouvelles antennes ULB compactes alimentées par une ligne microruban ont été dimensionnées et simulées. Ensuite, des études paramétriques ont été présentées et discutées pour ces trois antennes. Une comparaison a été également faite entre les trois antennes. La réalisation et la validation expérimentale de ces antennes seront présentées dans le prochain chapitre.

Chapitre 4
Réalisation et mesure
d'antennes ULB compactes

4.1 Introduction

La conception d'une antenne commence généralement par une simulation électromagnétique afin de prédire ses performances et de l'optimiser. Une fois que l'antenne est conforme aux spécifications imposées, une phase expérimentale est nécessaire afin de valider les résultats issus de la simulation.

Dans ce chapitre, nous présenterons la réalisation et la validation expérimentale des trois antennes ULB compactes conçues et simulées dans le chapitre précédent.

Ce chapitre est organisé comme suit. Après la description des étapes de réalisation des trois antennes, les résultats de leur validation expérimentale seront présentés. Cette validation consiste dans la mesure du coefficient de réflexion à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel et de le comparer aux résultats de la simulation électromagnétique. Enfin, les performances en termes de coefficients de réflexion des trois antennes seront comparées et discutées.

4.2 Réalisation des antennes

Les antennes à réaliser sont celles présentées dans les figures 3.1, 3.8 et 3.15, dont les dimensions sont données dans les tableaux 3.2, 3.4 et 3.6 respectivement.

Le substrat utilisé pour cette réalisation est le FR-4 avec une permittivité relative (ϵ_r) de 4.3 et un tangent delta des pertes ($\tan\delta$) de 0.025 et d'épaisseur (h) de 1.6 mm. Les masques générés des trois antennes à réaliser sont illustrés par les figures 4.1, 4.2 et 4.3.



Figure 4.1. Typons de l'antenne 1 à réaliser, (a) Face avant (Elément rayonnant), (b) Face arrière (Plan de masse).

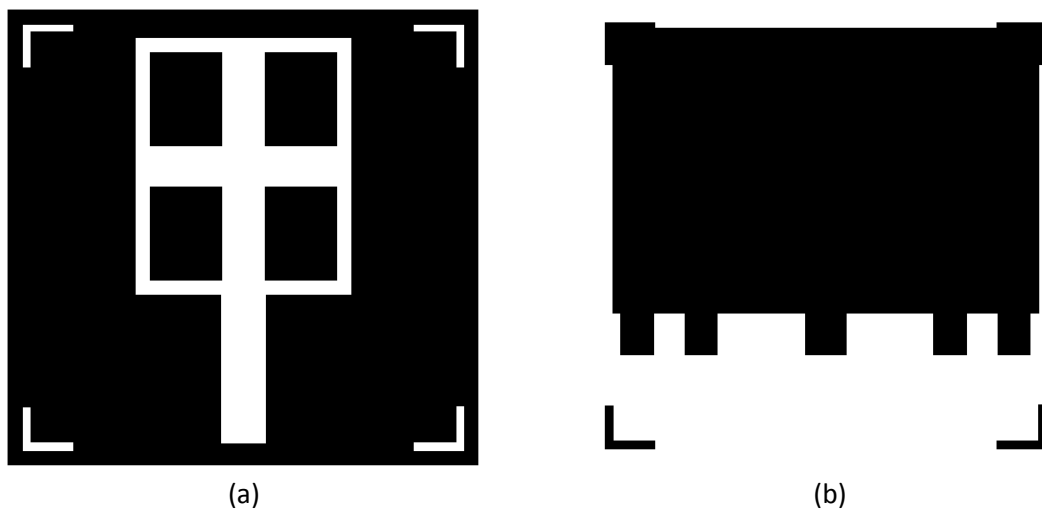


Figure 4.2. Typons de l'antenne 2 à réaliser, (a) Face avant (Elément rayonnant), (b) Face arrière (Plan de masse).



Figure 4.3. Typons de l'antenne 3 à réaliser, (a) Face avant (Elément rayonnant), (b) Face arrière (Plan de masse).

Après la réalisation des trois antennes par l'entreprise ALMITECH située à Kouba, nous avons soudé les connecteurs de type SMA aux endroits d'excitation des antennes, comme le montrent les figures 4.4, 4.5 et 4.6, qui représentent les photographies des antennes 1, 2 et 3 respectivement.

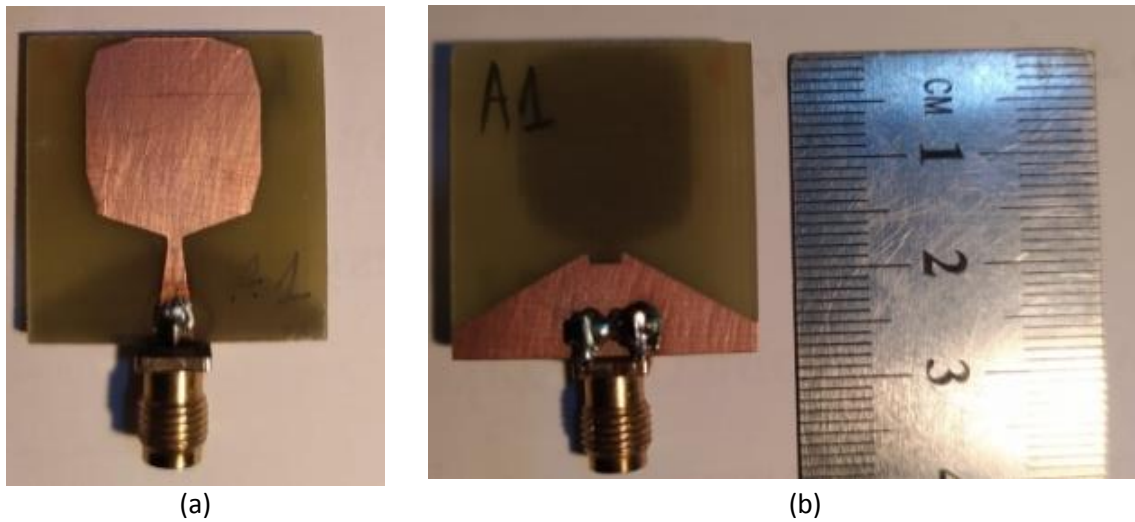


Figure 4.4. Photographie de l'antenne 1 réalisée, (a) Face avant, (b) Face arrière.

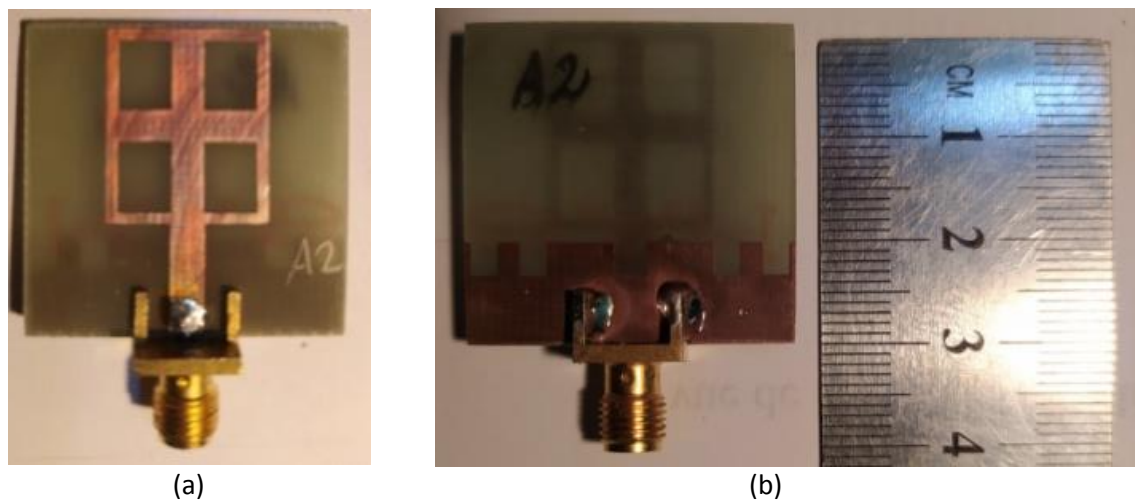


Figure 4.5. Photographie de l'antenne 2 réalisée, (a) Face avant, (b) Face arrière.

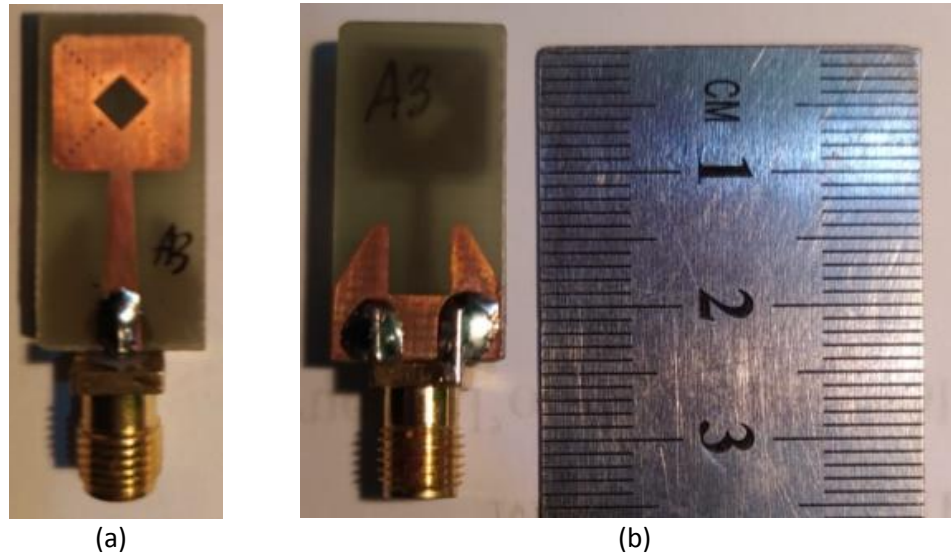


Figure 4.6. Photographie de l'antenne 3 réalisée, (a) Face avant, (b) Face arrière.

4.3 Résultats de mesure

Les mesures des coefficients de réflexion des trois antennes ont été réalisées à l'aide de l'analyseur de réseau Agilent N5230C PNA-L fonctionnant dans la bande 300 KHz jusqu'à 20 GHz. Après la calibration de l'analyseur de réseau dans la bande [3 - 11] GHz, les trois antennes ont été connectées avec un câble coaxial de type SMA, au port 1 de cet analyseur, l'une après l'autre.

Après avoir exporté les résultats de mesure des coefficients de réflexion de l'analyseur sous format de fichiers « S1P » vers l'outil de simulation électromagnétique CST MWS, nous les avons confrontés avec les résultats de simulation électromagnétique. La comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré pour les trois antennes (antenne 1, 2 et 3) est donnée par la suite.

4.3.1. Antenne 1

La comparaison simulation/mesure pour l'antenne 1 est donnée par la figure 4.7.

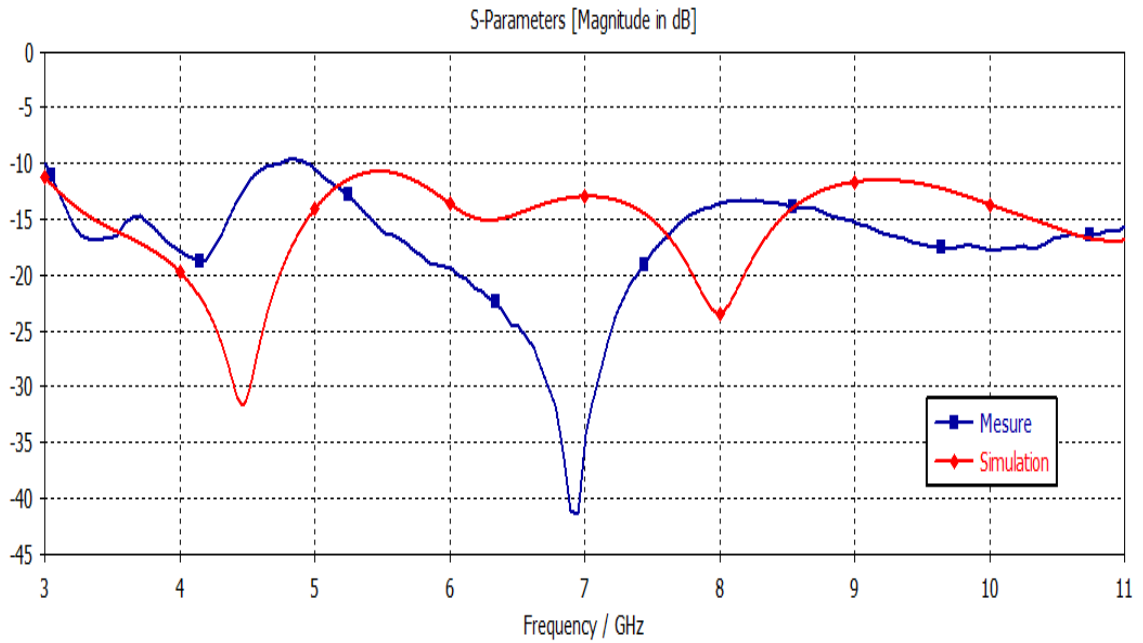


Figure 4.7. Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne 1.

Pour la première antenne, on a enregistré relativement un bon accord entre simulation et mesure. Les résultats de mesure ont montré que l'antenne respecte le cahier des charges, à l'exception de la fréquence $f=4.85$ GHz où on a une très légère désadaptation ($S_{11} = -9.6$ dB), ceci peut être expliqué par les incertitudes de réalisation et de la mesure.

4.3.2. Antenne 2

La comparaison simulation/mesure pour l'antenne 2 est montrée par la figure 4.8.

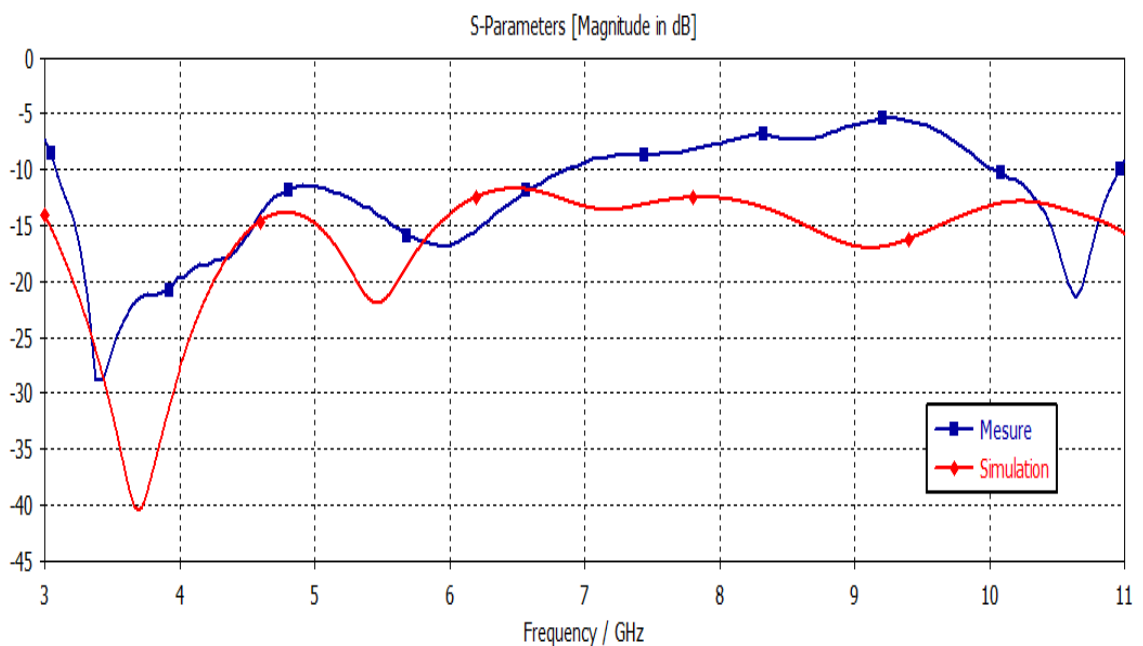


Figure 4.8. Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne 2.

Pour la deuxième antenne, on a remarqué que dans la bande [3 – 6.9] GHz, on a un bon accord entre simulation et mesure et que l'antenne respecte le cahier des charges ($S_{11} < -10$ dB). Cependant, dans la bande [6.9 – 11] GHz la simulation avec la mesure ne présente pas un bon accord et le cahier des charges ni plus respecter avec une désadaptation au pire des cas à $S_{11} = -5.4$ dB. Ceci est dû aux défauts de fabrication et/ou aux incertitudes de mesure.

4.3.3. Antenne 3

La comparaison simulation/mesure pour l'antenne 3 est montrée par la figure 4.9.

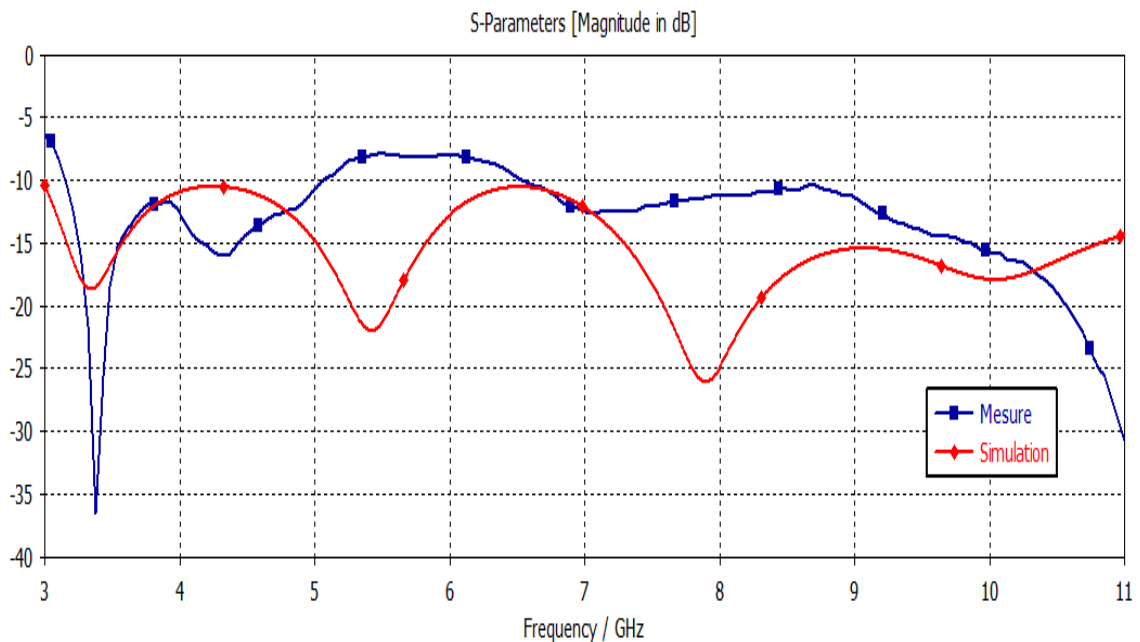


Figure 4.9. Comparaison entre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne 3.

D'après les résultats des mesures du coefficient de réflexion, on a remarqué que la troisième antenne respecte le cahier des charges en terme adaptation ($S_{11} < -10$ dB) à l'exception de la bande [5 – 6.5] GHz ou on a une légère désadaptation entre simulation et mesure avec le pire cas à $S_{11} = -8$ dB, en raison de certains facteurs tels que les défauts de fabrication (le placement des connecteurs, la qualité des soudures) et/ou aux incertitudes de mesure.

4.4 Comparaison des performances mesurées

Dans cette partie, on va comparer les performances mesurées des trois antennes présentées précédemment. La figure 4.10 représente la comparaison entre les coefficients de réflexion mesurés des trois antennes réalisées.

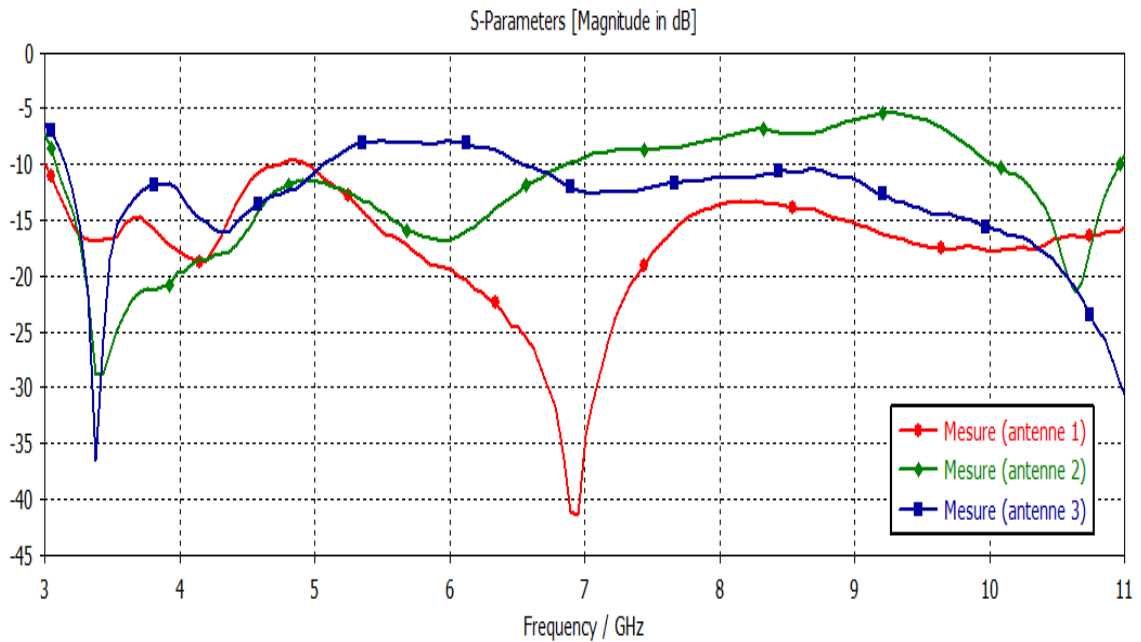


Figure 4.10. Comparaison entre les coefficients de réflexion mesurés des trois différentes structures d'antennes réalisées.

Le tableau 4.1 résume les performances mesurées des trois structures d'antennes réalisées.

Caractéristiques	Antenne 1	Antenne 2	Antenne 3
Dimensions (mm)	26x26.5x1.6	30x29x1.6	12x24x1.6
Le max de coefficient de réflexion mesuré (dB)	$S_{11} = -9.6$	$S_{11} = -5.4$	$S_{11} = -7.8$

Tableau 4.1. Tableau Comparatif des performances mesurées entre les trois d'antennes réalisées.

Certainement, en terme de taille, la troisième antenne est la plus compacte. Cependant, en termes de coefficient de réflexion, la première antenne est celle qui respecte mieux le cahier des charges par rapport aux deux autres antennes.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la réalisation et la validation expérimentale des trois antennes ULB compactes dimensionnées dans le chapitre 3. Afin d'y parvenir, nous avons tout d'abord réalisé les trois prototypes d'antennes en décrivant les différentes étapes nécessaires. Ensuite, nous avons validé expérimentalement à l'aide d'un analyseur de réseau les coefficients de réflexion de ces antennes. Dans un premier temps, une comparaison entre les résultats de mesure avec ceux obtenus par simulation a été réalisée pour les trois antennes. Dans un second temps, les coefficients de réflexion mesurés des trois antennes réalisées ont été confrontés et comparés. Cette dernière comparaison a montré que l'antenne 1 présente les meilleures performances mesurées en termes de coefficient de réflexion et de bande passante par rapport aux deux autres antennes.

L'essor récent des communications ultra large bande a nécessité des antennes spécialement adaptées à cette technologie. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail de mémoire. Il s'agit de concevoir, simuler et réaliser des antennes imprimées compactes adaptées aux systèmes ULB.

Dans un premier temps, nous avons présenté les antennes d'une manière générale en donnant leur définition, leurs applications et surtout leurs principales caractéristiques. Après, nous avons mis l'accent sur les antennes imprimées et exposé les différentes techniques d'alimentations ainsi qu'aux techniques d'élargissement de leurs bandes passantes.

Ensuite, nous avons présenté une brève description de la technologie ULB en donnant sa définition, un bref historique et ses domaines d'application, en donnant à la fin un état de l'art sur les antennes ULB en technologie planaire.

L'étape de conception et la simulation électromagnétique d'antennes ULB compactes a débuté par la présentation du cahier des charges. Ensuite, nous avons proposé trois antennes ULB originales et compactes dont les résultats de simulation respectent ce cahier des charges. Des études paramétriques ont été également conduites sur ces trois antennes dans le but de les optimiser d'avantage. Les trois antennes ainsi conçues ont été fabriquées et validées expérimentalement à l'aide d'un analyseur de réseau. En général, la comparaison entre les résultats de mesure et simulation a montré un bon accord. Ces résultats valident le bon fonctionnement des trois antennes ULB proposées.

Comme perspectives de ce travail, des rétro simulations/mesure sont nécessaires afin de comprendre les écarts enregistrés entre simulation et mesure à quelques fréquences notamment pour les antennes 2 et 3. La mesure des diagrammes de rayonnement en chambre anéchoïque est également à prévoir afin de valider les performances en rayonnement des trois antennes réalisées.

- [1] A. Boyer : 'Antennes', support de cours de 5ème Année Réseau et Télécom, INSA TOULOUSE.
URL : http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/cours_antennes_ouils_modeles_transmission_oct14_v3.pdf, 22 septembre 2020.
- [2] M. N. Feghoul, A. Zaair : 'Conception et simulation d'un système antenne ULB pour application MIMO', Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, 2017.
- [3] D. Abed, A. Boualleg : 'Travaux Pratiques d'Antennes', Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2016.
URL : http://dspace.univ-guelma.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/612/Polycopie_Antennes.pdf?sequence=1&isAllowed=y, 22 septembre 2020.
- [4] S. Hebib : 'Antennes & Propagations', support de cours, Master Réseaux et Télécoms, Université Saad Dahlab de Blida.
- [5] A. Khelladi : 'Contribution à l'étude des caractéristiques de rayonnement et performances d'antennes diélectriques microruban à ondes de fuite non uniformes. Application au balayage électronique', Mémoire de Magister, Université Abou Belkaid de Tlemcen, 2009.
- [6] S. Zerfa, K. Boumaaza : 'Conception, simulation et réalisation d'antennes pour lecteur RFID UHF', Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, 2018.
- [7] O. Picon et al : 'Les Antennes : Théorie, conception et applications ', Dunod, 2009.
- [8] C. Luxey, R. Staraj, G. Kossiavas, A. Papiernik : 'Antennes imprimées-Bases et principes', E3310, Techniques de l'ingénieur, Mai 2007.
- [9] M. S. A. Niharika, G. Sreenivasulu : 'A Novel Hexagonal Microstrip Antenna for UWB Applications', International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 8 Issue 12, December 2019.
- [10] S. K. Singh, T. Sharan, A. K. Singh : 'A Compact Multiband Rectangular Microstrip Antenna for UWB Applications', IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 594, 2019.

- [11] M. Elhabchi, M. N. Srfi, R. Touahni : 'A novel modified U-shaped microstrip antenna for super wide band (SWB) applications', *Analog Integr Circ Sig Process* 102, 571–578, 2020.
- [12] M. Z. Mahmud, M. T. Islam, A. F. Almutairi, M. Samsuzzaman, U. K. Acharjee, M.T. Islam : 'A Parasitic Resonator-Based Diamond-Shaped Microstrip Antenna for Microwave Imaging Applications', *Electronics*, 8, 434, 2019.
- [13] J. M. Laheurte : 'Petites antennes-communications sans fil et terminaux', Institut télécom et Lavoisier, Paris, 2011.
- [14] S. Soltane : 'Etude et caractérisation d'antennes imprimées pour système Ultra-Large Bande ', Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2015.
- [15] N. Anveshkumar, A. S. Gandhi, V. Dhasarathan : 'Cognitive radio paradigm and recent trends of antenna systems in the UWB 3.1–10.6 GHz', *Wireless Networks* 26, 3257–3274, 2020.
- [16] M. Terré : 'UWB-Version 1.0', Cours du conservatoire national des arts et métiers, Novembre 2006.
- [17] R. S. Kshetrimayum : 'An introduction to UWB communication systems', in *IEEE Potentials*, vol. 28, no. 2, pp. 9-13, March-April 2009.
- [18] R. W. McCaughern, L. Shaw : 'Document de consultation sur l'introduction des systèmes sans fil utilisant la technologie à bande ultra-large', SMSE-002-05, 28 janvier 2005.
- [19] B. Roy, S. K. Chowdhury, A. K. Bhattacharjee : 'Symmetrical Hexagonal Monopole Antenna with Bandwidth Enhancement Under UWB Operations', *Wireless Pers Commun* 108, 853–863, 2019.
- [20] A. Dastranj, F. Bahmanzadeh : 'Ground Plane Effect Suppression Method to Design a Low-Profile Printed UWB Antenna', *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 88, 91–100, 2020.
- [21] A. Hossain, M. T. Islam, A. F. Almutairi, M. S. J. Singh, K. Mat, M. Samsuzzaman : 'An Octagonal Ring-shaped Parasitic Resonator Based Compact Ultrawideband Antenna for Microwave Imaging Applications', *Sensors*, 20, 1354, 2020.

- [22] V. N. Koteswara, R. Devana, A. Maheswara Rao : 'Compact UWB monopole antenna with quadruple band notched characteristics', *International Journal of Electronics*, 107:2, 175-196, 2020.
- [23] D. K. Raheja, S. Kumar, B. K. Kanaujia : 'Compact Quasi-Elliptical-Self-Complementary Four-Port Super-Wideband MIMO Antenna with Dual Band Elimination Characteristics', *International Journal of Electronics and Communications*, Volume 114, 2020.
- [24] M. O. Al-Dwairi, A. Y. Hendi, M. S. Soliman, M. A. Nisirat : 'Design of A Compact Ultra-Wideband Antenna for Super-Wideband Technology', *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, pp. 1-4, 2019.
- [25] E. K. I. HAMAD, G. NADY : 'Bandwidth Extension of Ultra-wideband Microstrip Antenna Using Metamaterial Double-side Planar Periodic Geometry', *Radioengineering*, VOL. 28, NO. 1, April 2019.
- [26] A. Khurshid, J. Dong, R. Shi, Y. Kimura : 'A Metamaterial-Based Compact Planar Monopole Antenna for Wi-Fi and UWB Applications', *Sensors*, 19, 5426, 2019.
- [27] T. Bougoutaia, D. Khedrouche, A. Hocini : 'Bandwidth Improvement for Compact Microstrip Patch Antenna Using Metamaterials', *Acta Physics Polonica A*, Vol. 129, No. 4, 2016.
- [28] P. Mayuri, N. D. Rani, N. B. Subrahmanyam, B. T. P. Madhav : 'Design and Analysis of a Compact Reconfigurable Dual Band Notched UWB Antenna', *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 98, 141–153, 2020.
- [29] W. Naktong, A. Ruengwaree : 'Four-Port Rectangular Monopole Antenna for UWB-MIMO Applications', *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 87, 19–38, 2020.
- [30] A. Das, S. Pahadsingh, S. Sahu : 'Compact Microstrip Fed UWB Antenna with Dual Band Notch Characteristics', *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, pp. 0751-0754, 2016,
- [31] K. U. Sam, P. Abdulla : 'Truncated Circular Microstrip Ultra Wideband Antenna Exhibiting Wideband Circular Polarization', *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 99, 111–122, 2020.

- [32] S. Ullah, C. Ruan, M. S. Sadiq, T. U. Haq, A. K. Fahad, W. He : ‘Super Wide Band, Defected Ground Structure (DGS), and Stepped Meander Line Antenna for WLAN/ISM/WiMAX/UWB and other Wireless Communication Applications’, *Sensors*, 20, 1735, 2020.
- [33] S. Ullah, C. Ruan, M. S. Sadiq, T. U. Haq, W. He : ‘High Efficient and Ultra Wide Band Monopole Antenna for Microwave Imaging and Communication Applications’, *Sensors*, 20, 1–11, 2020.
- [34] S. Deng, S. Yang, M. Liu, Z. Zhang, L. Lei : ‘A Novel Ultra-Wideband Antenna Operating in the frequency band of 2.5-40GHz’, 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang Kwangwoon_Do, Korea (South), pp. 16-20, 2019.
- [35] A. El Hamdouni, A. Tajmouati, J. Zbitou, H. Bennis, A. Errkik, L. El Abdellaoui, M. Latrach : ‘A low cost fractal CPW fed antenna for UWB applications with a circular radiating patch’, *Telkomnika Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, Vol. 18, No. 1, pp. 436-440, February 2020.
- [36] S. Lakrit, S. Das, S. Ghosh, B. T. P. Madhav : ‘Compact UWB flexible elliptical CPW-fed antenna with triple notch bands for wireless communications’, *Int J RF Microw Comput Aided Eng*. 2020.
- [37] R. M. C. Cleetus, G. J. Bala : ‘Wide-Narrow Switchable Bands Microstrip Antenna for Cognitive Radios’, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 98, 225–238, 2020.
- [38] S. Lamultree, C. Jansri, Ch. Phongcharoenpanich : ‘Investigation of 3.1-10.6 GHz Circular Monopole Antenna with Modified Partial Ground Plane’, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 2020.
- [39] N. Nobilet : ‘Simulations d’antennes avec CST-MWS’, *Rapport de stage de Master 2*, Université Rennes 1, 2006.
- [40] URL : https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/cst-microwave-studio.html, 1 juillet 2020.
- [41] URL : <https://www.dps-fr.com/cst-studio-suite>, 1 juillet 2020.

A. CST MICROWAVE STUDIO

A.1. Présentation sommaire

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 [40].

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 [41].

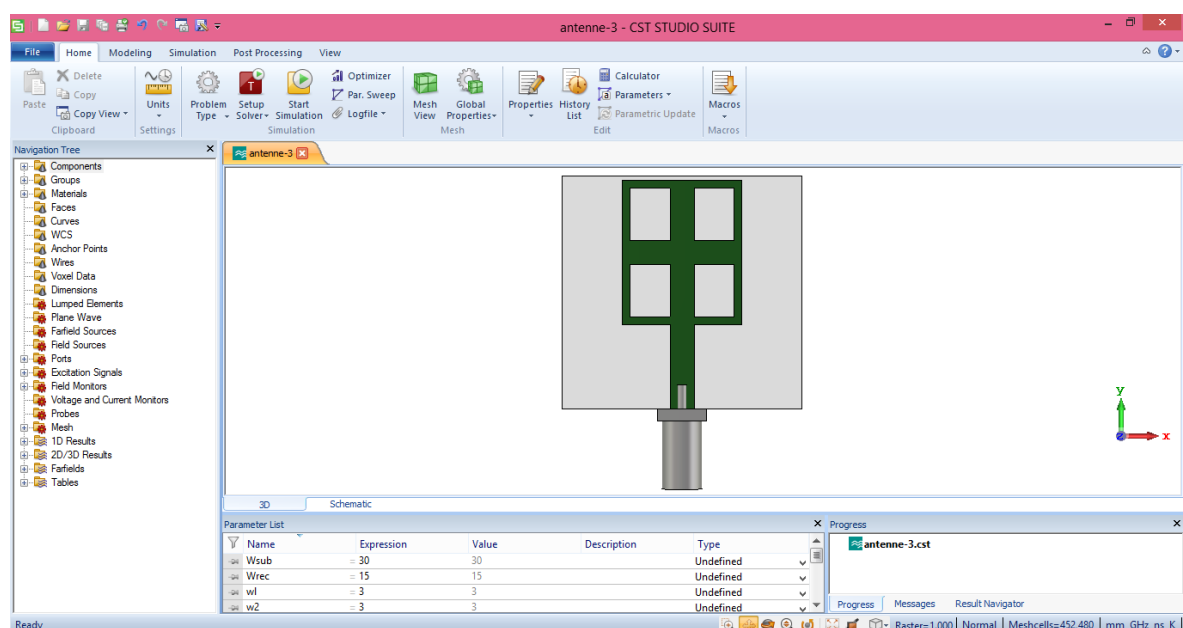


Figure A.1. L'interface principale de CST MICROWAVE Studio.

A.2. Exemple de simulation d'une antenne

- **Création un nouveau modèle de projet**

Après le lancement du CST DESIGN ENVIRONMENT, on choisit de créer un nouveau projet CST MICROWAVE STUDIO. Ensuite, on sélectionne de l'environnement dans lequel la structure sera créée (Figure A.3) et du type d'antenne (Figure A.4).

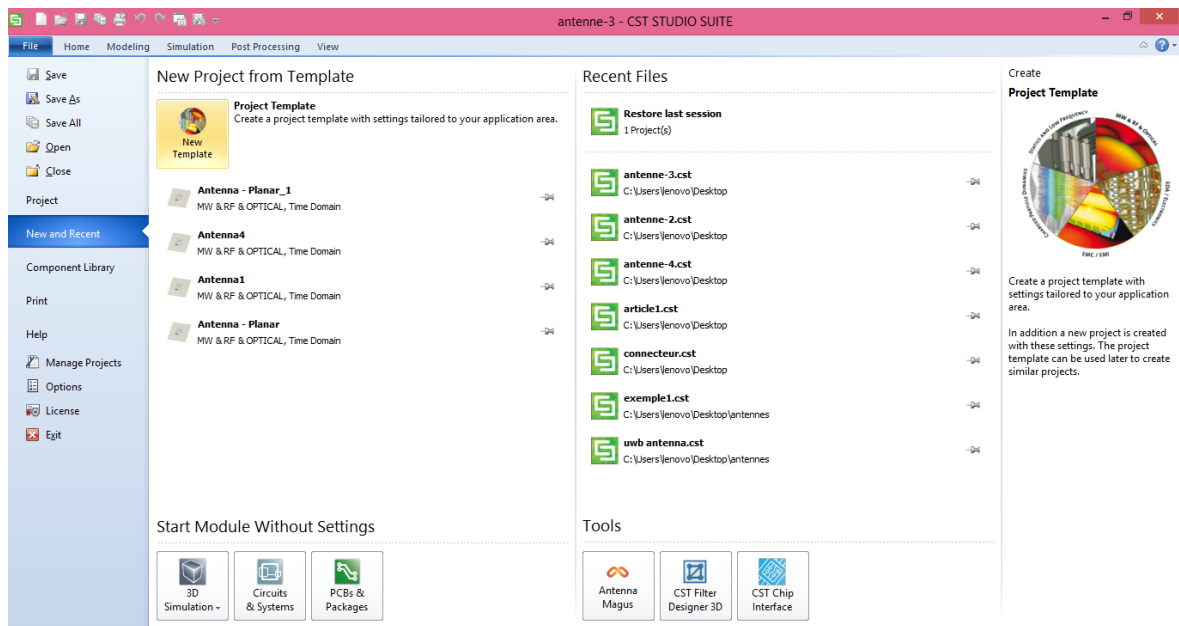


Figure A.2. Création un nouveau modèle de projet.

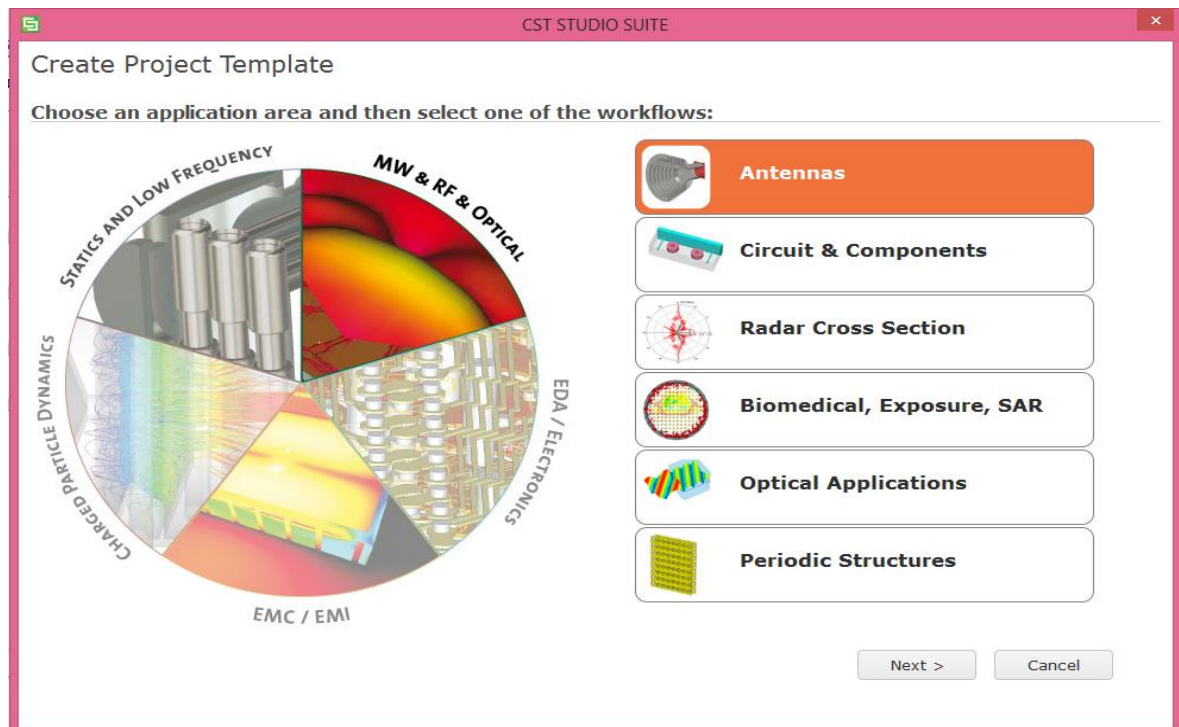


Figure A.3. Choix de l'environnement.

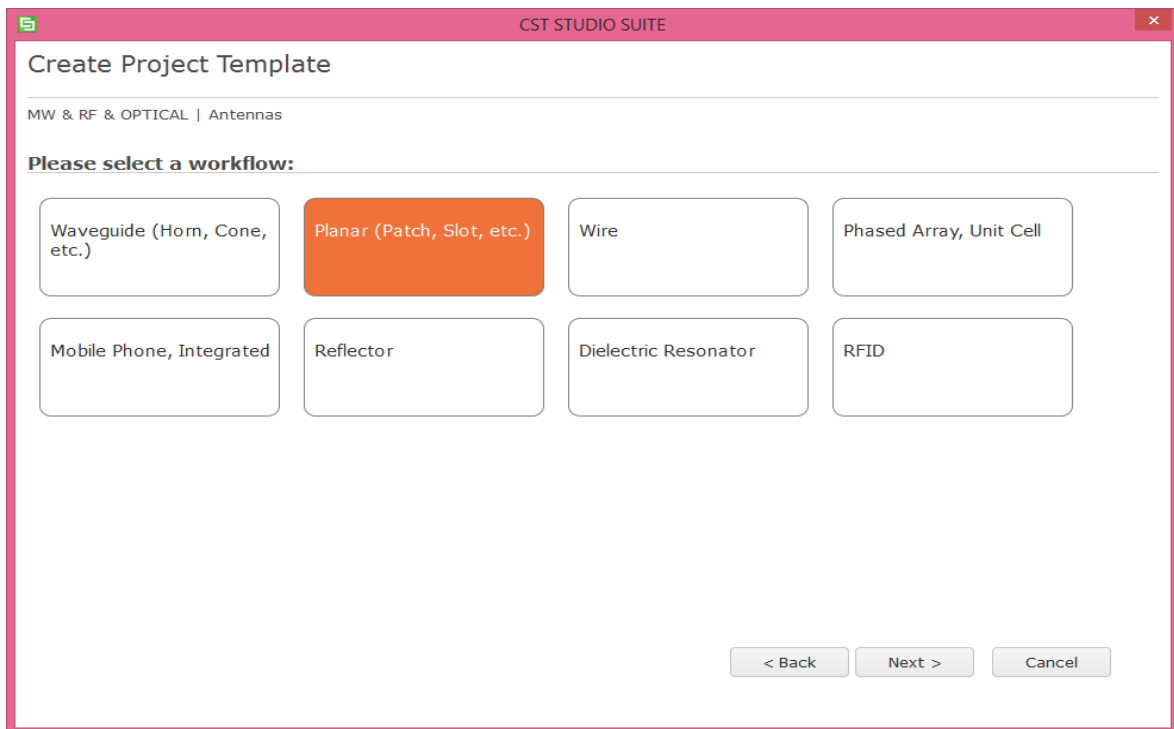


Figure A.4. Choix du type d'antenne.

- **Définition des unités**

On sélectionne les unités des dimensions, fréquences, temps et température ..., pour les paramètres de notre antenne (Figure A.5).

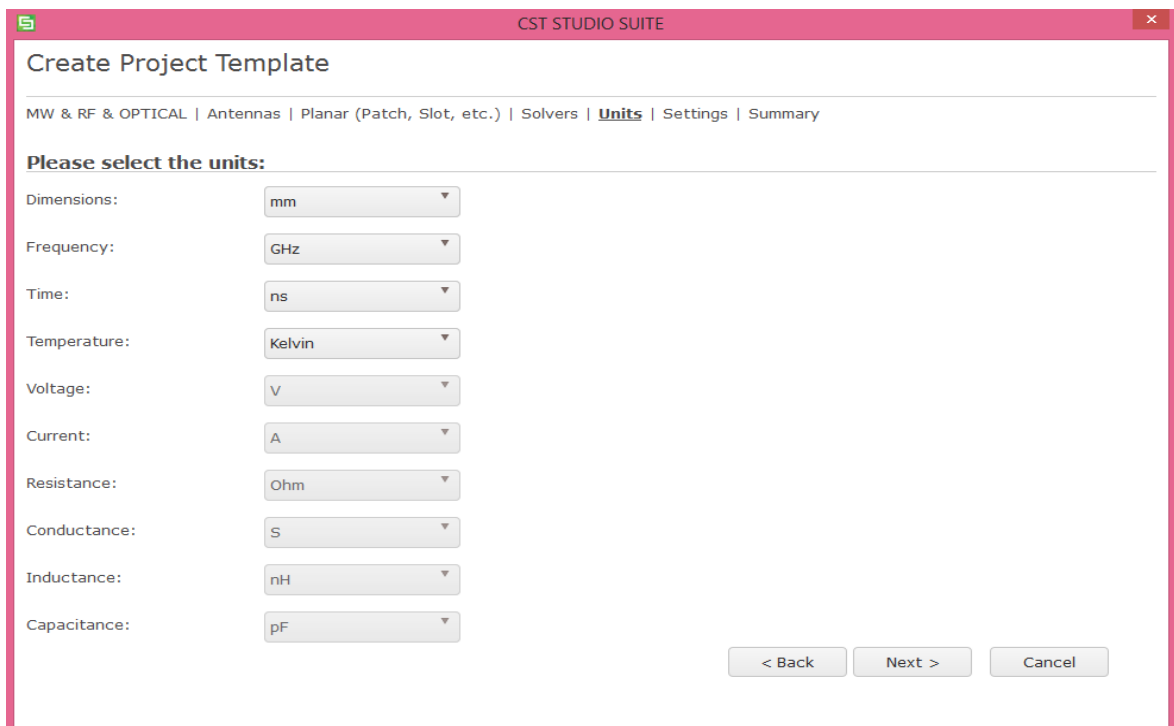


Figure A.5. Définition des unités.

- **Définition de la gamme de fréquence**

On sélectionne la gamme de fréquence dans laquelle on analyse le problème (Figure A.6). On peut aussi spécifier la gamme de fréquence en choisissant simulation → Frequency dans le menu principale.

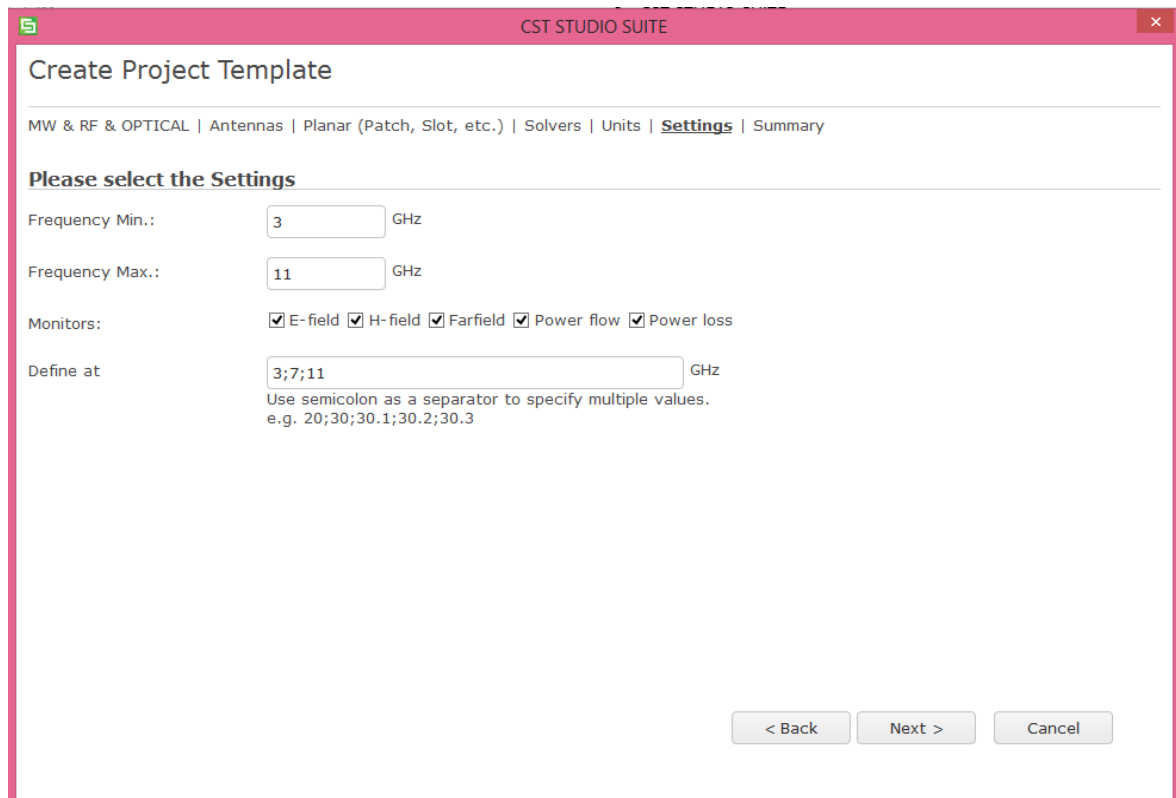


Figure A.6. Définition de la gamme de fréquence.

- **Modélisation de la structure**

Il existe un certain nombre de différents outils de conception géométrique pour des géométries typiques tels que les planches, les cylindres, les sphères, etc., pour la modélisation de la structure d'antenne (plan de masse, substrat, ligne d'alimentation et l'élément rayonnant). Ces formes peuvent être ajoutées ou soustraites à l'aide des opérateurs booléens pour construire des formes plus complexes.

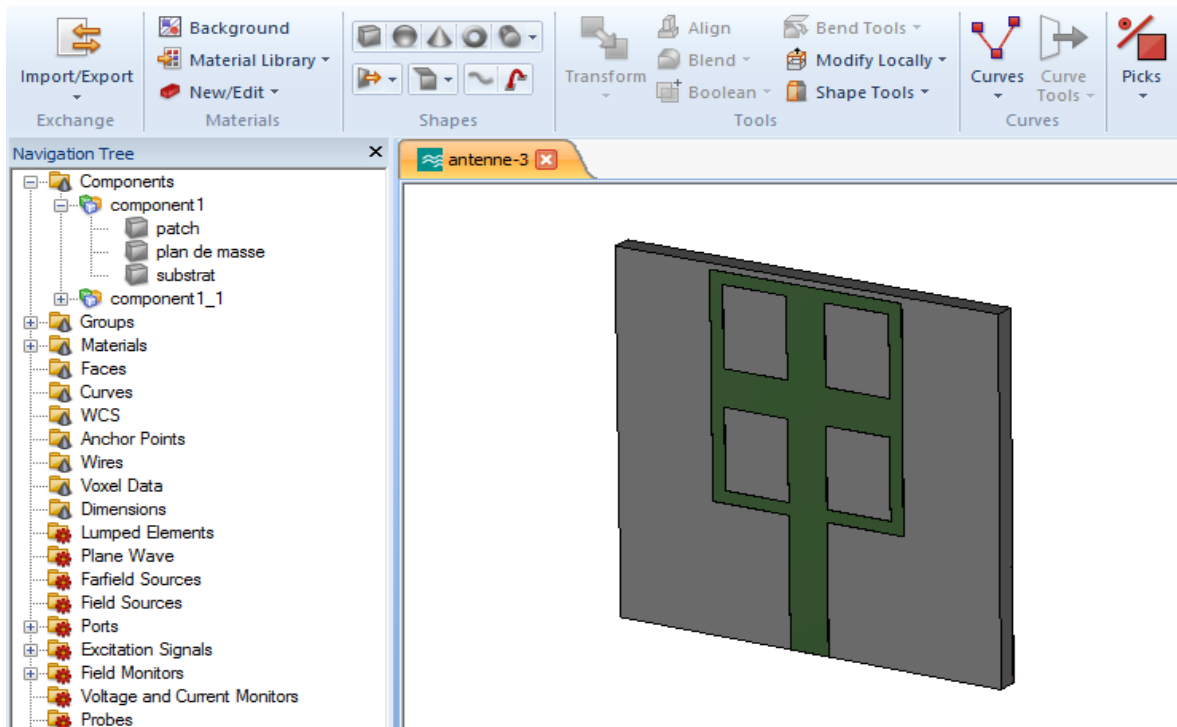


Figure A.7. Dessin d'une structure à simuler (antenne 2).

- **Modélisation de l'alimentation coaxiale (connecteur SMA)**

La dernière étape de modélisation est la construction de l'alimentation coaxiale comme source d'excitation pour l'antenne patch microruban (Figure A.8).

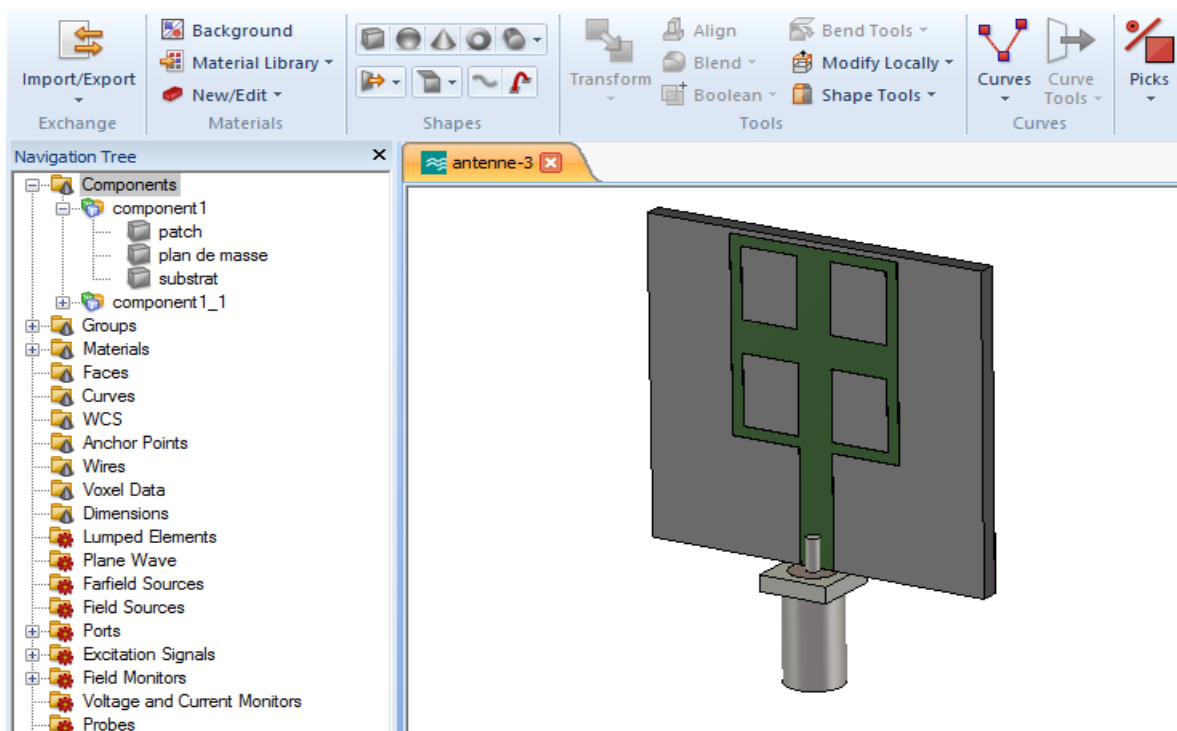


Figure A.8. Dessin d'une structure connectée avec un connecteur SMA.

- **Définition de port**

Enfin, la dernière étape, c'est l'excitation de l'antenne patch avec un port avant la phase de calculs et de résolution du problème électromagnétique. Le port guide d'onde sert à exciter les structures telles que le guide d'onde rectangulaire ou à simuler un connecteur (relie a un câble coaxial) qui est connecté à la structure d'antenne au niveau de la ligne d'alimentation (Figure A.9).

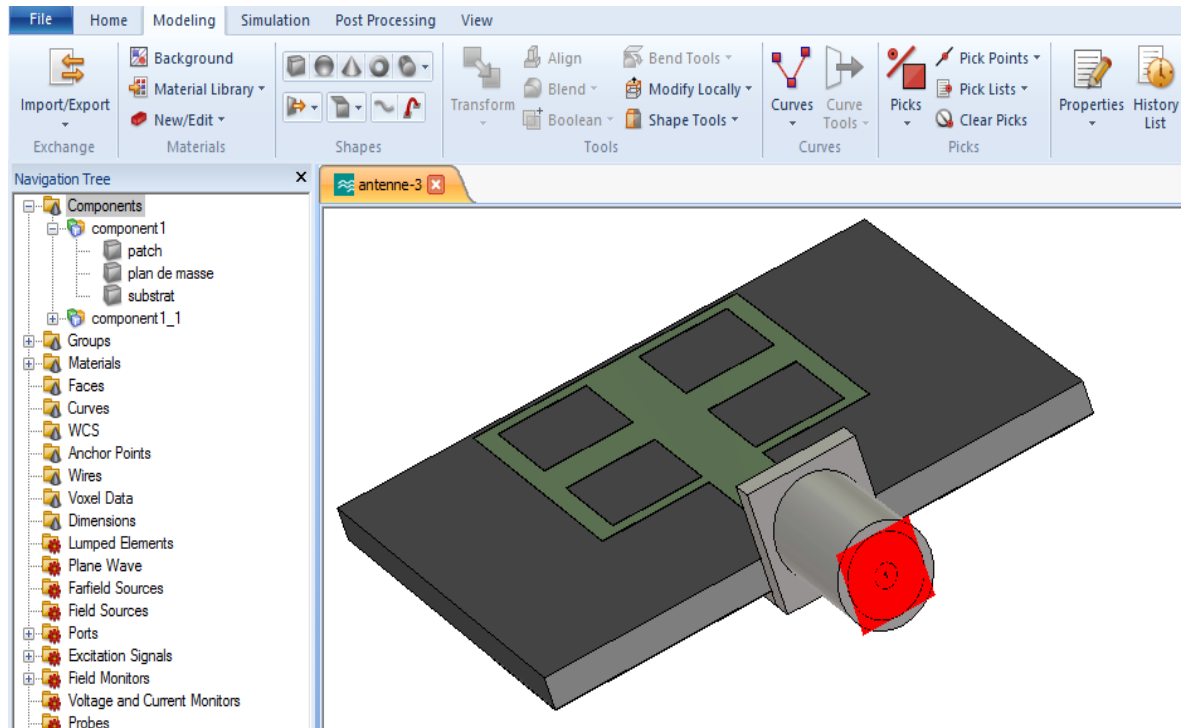


Figure A.9. Application du port d'excitation (en rouge).

- **Début de la simulation**

Après avoir défini tous les paramètres nécessaires, on est prêt à commencer notre première simulation. On démarre la simulation en choisissant le solveur temporel dans le menu principale : Home → Setup Solver → Time Domain Solver.

- **Affichage des résultats**

Après avoir exécuté avec succès une simulation, de nombreux résultats sont autorisés. Nous avons simulé une structure d'un patch rectangulaire avec CST (antenne 2).

Les différents graphes que nous pouvons visualiser telle que le coefficient de réflexion, l'abaque de Smith (Figure A.10) et le diagramme de rayonnement en 2D (Figure A.11) et en 3D (Figure A.12) sont représentés ci-dessous.

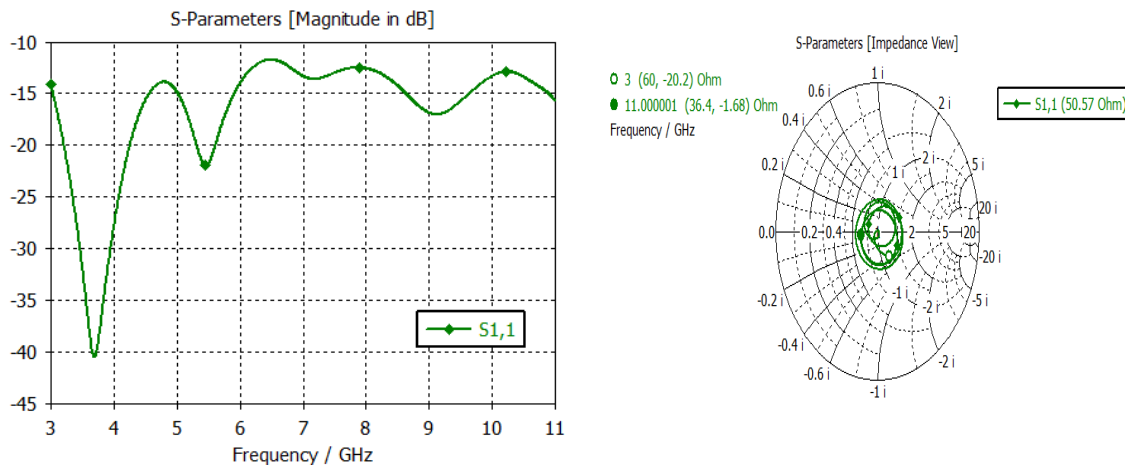


Figure A.10. Le coefficient de réflexion S_{11} en dB et l'abaque de SMITH.

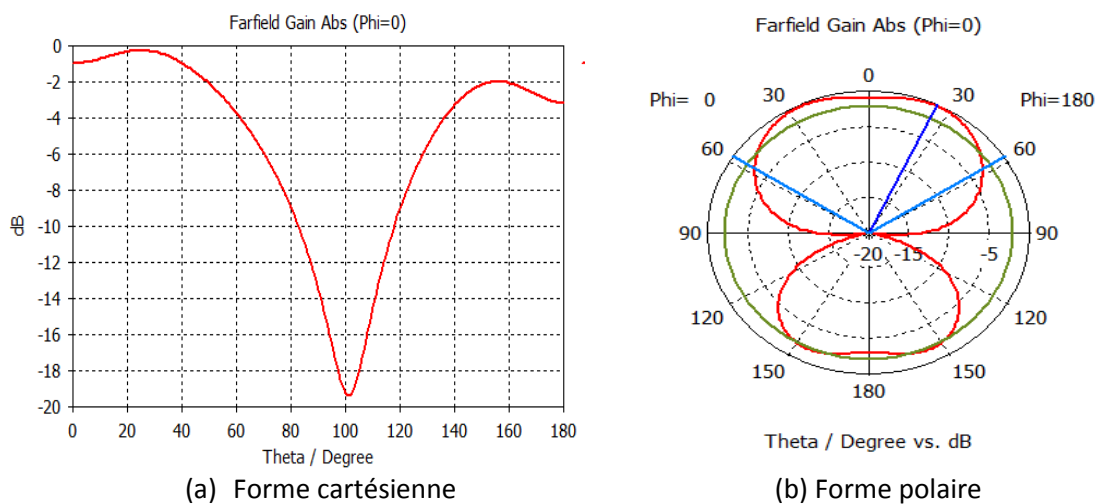


Figure A.11. Le Diagramme de rayonnement en 2D.

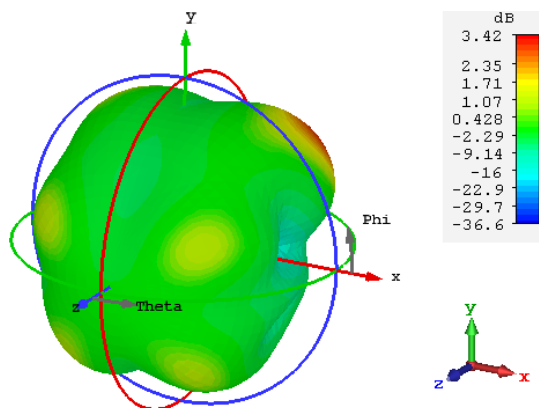


Figure A.12. Le Diagramme de rayonnement en 3D.