

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 سعيدة د مولاي الطاهر

Université DR Moulay Taher Saida



Faculté MATH et Informatique et Télécommunications MIT

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master Académique Domaine : Math et informatique

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux des Télécommunications

Conception, modélisation et optimisation d'une antenne fractale de type Sierpinski Carpet multi bande

Présentée par :

✍ BOUMAZZA feriel

✍ BOUANANI rihab

Sous la direction de :

🌀 Pr. BOUHMIDI Rachid

JUIN 2026

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous avons l'honneur et le plaisir d'adresser nos profondes gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant, le Professeur Bouhmidi Rachid, qui nous a accordé une grande autonomie dans ce travail et nous a orientés vers des pistes de réflexion riches et prometteuses.

Nous lui exprimons également notre profonde reconnaissance pour son aide précieuse, ses conseils avisés, son sérieux, son sens des responsabilités ainsi que pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de notre encadrement.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi à tous nos enseignants qui nous ont accompagnés durant notre parcours universitaire et ont contribué à notre formation scientifique et académique.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont aidés et soutenus durant cette période et que nous ne pouvons malheureusement pas toutes citer.

Dédicace

Au nom d'Allah, le Clément et le Miséricordieux,

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, qui ont toujours été une source de soutien et de force pour moi, et qui m'ont offert amour, sacrifice et encouragement tout au long de mon parcours universitaire.

Qu'Allah les protège et les récompense pour tous leurs efforts.

À ma très chère mère, symbole de tendresse, de générosité et de patience, dont les prières ont été la raison de ma persévérance et de ma réussite.

À mon cher père, qui a toujours été un exemple de courage, de travail et de détermination, et qui m'a appris la valeur de l'ambition et de la persévérance.

À mon cher frère, pour son soutien constant et ses encouragements permanents.

À ma chère sœur, à qui je porte beaucoup d'amour et d'estime, en lui souhaitant bonheur, santé et réussite.

Enfin, à toutes les personnes qui m'aiment, me soutiennent et qui ont laissé une belle empreinte dans ma vie, je dédie ce travail avec une grande fierté et une profonde gratitude.

Feriel



Dédicace

Au nom d'Allah, le Clément et le Miséricordieux,

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur amour infini, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien permanent tout au long de mon parcours universitaire.
Qu'Allah les protège et leur accorde santé et bonheur.

À mes chers frères et à mes chères sœurs, pour leur affection, leur présence et leurs encouragements qui m'ont toujours apporté force et motivation.

À toute ma famille, pour leur soutien moral et leurs prières sincères.

À mes amis et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, à tous ceux qui m'aiment et me souhaitent la réussite, je dédie ce travail avec toute ma reconnaissance et mon respect.

Rihab



RESUME

Dans ce travail, nous allons montrer que les antennes Multibandes sont plus avantageuses et plus pratiques que les antennes à large bande, car elles permettent de fonctionner sur des bandes de fréquences très éloignées sans rencontrer de problèmes d'adaptation. Par la suite, nous proposerons une structure double bande basée sur la technique des fentes. Enfin, nous terminerons ce travail par la simulation de cette structure sous le logiciel ANSYS HFSS ainsi que par une discussion des résultats obtenus.

Mots clés : Antenne, patch, Multibande, HFSS

Abstract:

In this work, we will demonstrate that multiband antennas are more advantageous and practical than wideband antennas, since they can operate over highly separated frequency bands without encountering impedance matching problems. Then, we will propose a dual-band structure using the slot technique. Finally, we will conclude this work by simulating this structure using ANSYS HFSS and discussing the obtained results.

Keywords: Antenna, patch, multiband, HFSS

الملخص:

في هذا العمل، سنُبين أن الهوائيات متعددة النطاقات تُعدّ أكثر فائدة وعملية من الهوائيات عريضة النطاق، وذلك لأنها تتيح العمل على نطاقات ترددية متباعدة جدًا دون مواجهة مشاكل في المطابقة. بعد ذلك، سنقترح بنية ثنائية النطاق بالاعتماد على تقنية الشقوق. وأخيرًا، سنختتم هذا العمل بمحاكاة هذه البنية باستخدام برنامج ANSYS HFSS ومناقشة النتائج المتحصل عليها.

الكلمات المفتاحية: هوائيات مسطحة، متعددة المجالات، برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية HFSS

Table des matières

RESUME.....	i
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
La liste des abréviations:	ix
La liste des symboles :	x
Introduction Générale :	I
I. Chapitre 1 : Généralités sur les antennes.....	1
I.1 Introduction :	1
I.2 Définition d'une antenne :	1
I.3 Paramètres fondamentaux des antennes	2
I.3.1 Diagramme de rayonnement :	2
I.3.2 Directivité :	2
I.3.3 Gain :	2
I.3.4 Bande passante :	3
I.3.5 Polarisation :	4
I.3.6 Impédance d'entrée :	5
I.3.7 Le VSWR :(adaptation).....	5
I.4 Types d'antennes :	6
I.4.1 Selon la forme géométrique :	6
I.4.2 Selon le gain :	6
I.4.3 Selon la forme du faisceau :	6
I.4.4 Selon la largeur de bande :	6
I.4.5 Antennes filaires :	7
I.4.6 Antennes à ouverture :	8
I.4.7 Antennes micro-ruban (patch):.....	8
I.5 Antennes patch (microstrip) :	9
I.5.1 Introduction :	9
I.5.2 Description géométrique et caractéristique :	9
I.5.3 Différentes formes des antennes microstrip :	10
I.5.4 Alimentation ;	10

I.5.5	Excitation par un ligne coaxiale :	10
I.5.6	Alimentation par ligne micro ruban :	11
I.5.7	Alimentation par fente :	13
I.6	Avantages et inconvénients des antennes patch	13
I.7	Conclusion :	14
II.	Chapitre 2 : Formes fractales et antennes patch fractales	15
II.1	Introduction :	15
II.2	Géométrie fractale	16
II.2.1	Définition des fractales :	16
II.2.2	Propriétés (auto-similarité, dimension fractale) :	16
II.3	Les différentes formes fractales :	16
II.3.1	Les courbes fractales :	17
II.3.2	Les surfaces fractales :	20
II.3.3	Les volumes fractals	23
II.4	Les antennes fractales :	25
II.4.1	Définition	25
II.4.2	Propriétés des structures fractales	25
II.4.3	Avantages et inconvénients	26
II.5	Types de fractales utilisées en antennes	26
II.5.1	Tapis de Sierpinski (Sierpinski Carpet) :	26
II.5.2	Triangle de Sierpinski :	27
II.5.3	Courbe de Koch :	27
II.6	Intérêt des fractales en antennes	28
II.6.1	Miniaturisation :	28
II.6.2	Multibande :	37
II.6.3	Large bande	37
II.7	Antenne patch fractale de type Sierpinski Carpet	38
II.7.1	Itération zéro de l'antenne tapis de Sierpiński	38
II.7.2	Première et deuxième itérations de l'antenne tapis de Sierpinski	39
II.8	Travaux de recherche existants (état de l'art)	39
II.9	Conclusion :	40
III.	Chapitre 3 : Simulation, réalisation et mesures	41

III.1	Introduction :	41
III.2	Présentation du logiciel	41
III.2.1	DEFINITION HFSS :	41
III.2.2	DESCRIPTION GENERALE DES OUTILS HFSS :	41
III.3	Antenne patch rectangulaire avec ligne simple :	47
III.3.1	Géométrie de base :	47
III.3.2	Résultat de simulation :	48
III.4	Technique d'adaptation :	49
III.4.1	Adaptation de l'antenne avec une fente (slot) :	49
III.5	Miniaturisation par fractalisation de l'antenne patch rectangulaire	54
III.5.1	Les itérations de sierpinski Carpet :	55
III.5.2	Itération 02 de tapis de sierpinski Carpet :	59
III.5.3	Itération 03 du tapis de sierpinski Carpet :	64
III.6	Optimisation de l'antenne	67
III.7	Analyse des résultats	68
III.8	Conclusions	69
	Conclusion Générale	71
	Références	72

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne	2
Figure I-2 Bande passante et coefficient de réflexion [7]	3
Figure I-3 polarisation du champ électromagnétique.....	4
Figure I-4 : Différentes formes d'antennes	7
Figure I-5 : Configurations d'antennes filaires	7
Figure I-6 : Configurations d'antennes à ouverture	8
Figure I-7 : Antennes micro ruban (patch) rectangulaires et circulaires [10]	8
Figure I-8 : Antenne microstrip	9
Figure I-9 : dépression d'antenne microstrip	10
Figure I-10 : Différent formes d'antenne microstrip	10
Figure I-11 : Alimentation d'une antenne plaquée rectangulaire par coaxial. Le point d'excitation (S) sur la médiatrice du rectangle influence l'impédance d'entrée, qui augmente lorsqu'on s'éloigne du centre. Ceci offre une marge de manœuvre pour optimiser l'adaptation [11].	11
Figure I-12 : alimentation par ligne micro ruban	11
Figure I-13 : encoches d'adaptation	12
Figure I-14 : alimentation pour rayonnement à polarisation circulaire.....	12
Figure I-15 : alimentation d'un patch carré par deux lignes déphasées de 90°	12
Figure I-16 : Alimentation par fente.....	13
Figure II-1 : La courbe de coche [15].....	17
Figure II-2 : Ensemble cantor [14].....	18
Figure II-3 : la fractale de Minkowski [15].....	18
Figure II-4 : Les fractales d'Hilbert [15]	19
Figure II-5 : Les fractales de Peano [14]	19
Figure II-6 : Génération de la géométrie d'un triangle de sierpinski. [13].....	20
Figure II-7 : IFS pour la génération de triangle sierpinski auto similaire.....	21
Figure II-8 : Génération de la géométrie du tapis de Sierpinski [17]	22
Figure II-9 : L'étoile de Koch	23
Figure II-10 : Le tétraèdre de Sierpinski	23
Figure II-11 : Eponge de Sierpinski-Menger - Ordre 3.....	24
Figure II-12 Résumé chronologique de l'historique des fractales.....	24
Figure II-13 : Génération de la géométrie du tapis de Sierpinsky [17]	26
Figure II-14 : Génération du triangle de Sierpinsky par les deux approches [18].....	27
Figure II-15 : Courbe de Koch.....	27
Figure II-16 : Sphère minimale qui englobe l'antenne : sphère de Chu	28
Figure II-17 : Structure de l'antenne PIFA [28]	31
Figure II-18 : Représentation de champ « électrique du demi-onde, (b) quart-onde	32
Figure II-19 : Antenne PIFA : (a) avec languette de court-circuit(b) avec court-circuit plan [29]	32

Figure II-20 : Chargement capacitif en bout de l'élément : (a) avec l'ajout d'un élément vertical, (b) par repliement de l'élément.....	34
Figure II-21 : Antenne PIFA : (a) avec dite débouchant, (b) avec fente non débouchant [34]	35
Figure II-22 : nombre d'itération tapis de Sierpinsky.....	38
Figure III-1 : page d'accueil du logiciel HFSS	42
Figure III-2 : fenêtre des propriétés	42
Figure III-3 : fenetre es paramètre de projet	43
Figure III-4 : fenêtre manager de projet.....	43
Figure III-5 : les modèles de DRAW	44
Figure III-6 : validation du modèle	44
Figure III-7 : types d'excitation	45
Figure III-8 : modifier le balayage de projet.....	45
Figure III-9 : les paramètre S de l'antenne.	46
Figure III-10 : visualiser de diagramme de rayonnement	46
Figure III-11 : antenne patch initiale désigné sur HFSS.....	48
Figure III-12 : coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne initiale proposé.....	49
Figure III-13 : rapport d'onde stationnaire.....	49
Figure III-14 : antenne adaptée avec le slot.....	50
Figure III-15 : paramètre S_{11} avec le slot.....	51
Figure III-16 : de vswr d'antenne avec slot.....	51
Figure III-17 : diagramme de rayonnement de 3D.....	52
Figure III-18 : diagramme de rayonnement 2D.....	53
Figure III-19 : Distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet.....	53
Figure III-20 : nombre d'itération tapis de Sierpinsky.....	54
Figure III-21 : antenne sierpinski Carpet itération 01	55
Figure III-22 : coefficient de réflexion S_{11} d'antenne Sierpinski Carpet itération 01.....	56
Figure III-23 : diagramme de rayonnement 3D itération 01	57
Figure III-24 : diagramme de rayonnement 2D itération 01	57
Figure III-25 : VSWR d'antenne de itération1.....	58
Figure III-26 : Distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet à itération1	59
Figure III-27 : antenne sierpinski Carpet itération 02	59
Figure III-28 : coefficient de réflexion d'antenne Sierpinski Carpet itération 02	60
Figure III-29 : diagramme de rayonnement 3D d'itération 02	61
Figure III-30 : diagramme de rayonnement 2D d'itération02	61
Figure III-31 : VSWR d'antenne sierpinski Carpet d'itération 02.....	62
Figure III-32 : Distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 2.....	63
Figure III-33 : : antenne sierpinski Carpet itération 03	64
Figure III-34 : coefficient de réflexion d'antenne Sierpinski Carpet itération 03	64

Figure III-35 : diagramme de rayonnement 2D itération 03	65
Figure III-36 : diagramme de rayonnement 3D itération 3	66
Figure III-37 : VSWR d'itération 03.....	66
Figure III-38 : Distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 03.....	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Caractéristique de chacun des types de polarisations [8].....	4
Tableau II-1 : principes différents entre géométrie euclidienne et géométrie fractale [13]	15
Tableau II-2 : Propriétés des structures fractales et leur conséquence.....	25
Tableau III-1 : paramètre de l'antenne patch.....	47
Tableau III-2 : dimension (mm) de l'antenne patch initiale proposée.	48
Tableau III-3 : les dimensions de l'antenne patch avec la fente.....	50

La liste des abréviations :

AEP : Antenne Électriquement Petite

DCS: Digital cellular system

DGS: Defected Ground Structure

FEM : La méthode des éléments finis

FR4: Flame Retardant 4

GPS: Global positioning system

GSM: Global positioning system

HFSS: High frequency structure simulator

IFA: Inverted Function Antenna

IFS: Iterated Function System

MPA: Antenne patch microruban

PCB: Printed circuit Board

PIFA : Palar Inverted Function Antenna

ROS : Rapport d'Ondes Stationnaires

SC : Sierpinski Carpet

TOS : Taux d'Ondes Stationnaires

UMTS : Universal Mobile Telecommunications system

VSWR: Voltage standing wave ratio

WI-FI: Wireless Fidelity

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN: Wireless Local Area Network

dB : Décibel

La liste des symboles :

ϵ_r : permittivité relative

Z_{in} : impédance d'entrée

f_0 : fréquence de résonance

D : directivité

G : gain

L : longueur du patch

W : largeur du patch

c : vitesse de la lumière dans le vide

f : fréquence

h : épaisseur du substrat

Γ : coefficient de réflexion

θ (*thêta*) : angle d'élévation

Ω : ohm

η : rendement

λ : longueur d'onde

μ_r : perméabilité relative

φ (*phi*) : angle d'azimut

Introduction générale

Introduction Générale :

L'évolution rapide des technologies de télécommunications sans fil a engendré une demande croissante en systèmes de transmission performants, compacts et capables de fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences. Avec le développement des réseaux mobiles, des communications satellitaires, des systèmes radar ainsi que des objets connectés, les antennes jouent un rôle fondamental dans l'efficacité et la qualité des communications. Ainsi, la recherche scientifique s'oriente de plus en plus vers la conception d'antennes innovantes répondant aux exigences de miniaturisation, de large bande passante et de fonctionnement Multibande.

Parmi les différentes structures étudiées dans ce domaine, les antennes fractales occupent une place importante grâce à leurs propriétés géométriques particulières. Les fractales sont des structures caractérisées par l'auto-similarité et la répétition d'un même motif à différentes échelles. Ces propriétés permettent d'obtenir des antennes compactes offrant des performances intéressantes en termes de Multibande, de gain et d'adaptation d'impédance. En outre, l'intégration des géométries fractales dans la conception des antennes contribue à améliorer l'efficacité spectrale tout en réduisant les dimensions physiques de l'antenne.

Parmi les géométries fractales les plus connues figure le **Sierpinski Carpet**, qui représente une structure fractale bidimensionnelle obtenue par suppression répétitive de portions carrées d'une surface initiale. Cette géométrie possède des caractéristiques favorables pour les applications de télécommunications modernes, notamment la possibilité de générer plusieurs résonances correspondant à différentes bandes de fréquences. Grâce à cette propriété, les antennes basées sur le motif Sierpinski Carpet constituent une solution prometteuse pour les systèmes Multibandes.

Dans ce contexte, ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la conception, de la modélisation et de l'optimisation d'une antenne fractale de type Sierpinski Carpet destinée aux applications Multibandes. L'objectif principal est d'étudier l'influence de la géométrie fractale sur les performances électromagnétiques de l'antenne, puis de proposer une structure optimisée répondant aux critères exigés dans les systèmes de télécommunications modernes. Cette étude s'appuie sur des outils de simulation électromagnétique permettant d'analyser différents paramètres tels que le coefficient de réflexion, la bande passante, le gain, le diagramme de rayonnement ainsi que l'efficacité de l'antenne.

L'intérêt de ce travail réside également dans l'exploration des techniques d'optimisation appliquées aux antennes fractales afin d'améliorer leurs performances tout en conservant des dimensions réduites. Cette démarche vise à contribuer au développement de solutions adaptées aux nouvelles générations de réseaux de communication sans fil.

Afin d'atteindre ces objectifs ce mémoire est structuré en trois chapitres : le premier chapitre présente les généralités sur les antennes et leurs paramètres fondamentaux. Le deuxième chapitre est consacré à la géométrie fractale et aux antennes fractales, notamment le tapis sierpinski. Le troisième chapitre expose la conception sous HFSS et l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 1 : Généralités **sur les antennes**

I. Chapitre 1 : Généralités sur les antennes

I.1 Introduction :

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif.

Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques. La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes.

Les premières applications de transmission radio sont apparues, leur développement s'est fait en parallèle avec celui de l'électronique au début du XIXe siècle. Le XXe siècle est ensuite ponctué d'innovations majeures, qui répondaient à des besoins précis. [2]

I.2 Définition d'une antenne :

La définition formelle d'une antenne est un dispositif qui sert à transmettre et à recevoir des ondes radio. Elle convertit l'onde guidée par la ligne de transmission (le câble ou le guide d'onde) en ondes électromagnétiques pouvant se propager dans l'espace libre.

En réalité, une antenne est un morceau de matériau conducteur auquel on applique un signal, et ce signal est ensuite rayonné dans l'espace libre.

Les antennes doivent conférer à l'onde rayonnée un caractère directionnel. Autrement dit, elles doivent accentuer une seule direction et atténuer ou annuler les autres. Cela est nécessaire puisque l'on souhaite généralement émettre dans une direction bien déterminée.

On peut expliquer cela par un exemple en parlant des antennes utilisées par les satellites. Celles-ci accentuent fortement la direction vers la Terre et atténuent la direction opposée, car l'objectif est de communiquer avec la Terre et non d'envoyer les signaux vers l'espace.

Les antennes doivent également donner à l'onde rayonnée une polarisation. La polarisation d'une onde est la figure géométrique décrite, au cours du temps, par l'extrémité du vecteur du champ électrique en un point fixe de l'espace, dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.

Pour toutes les ondes, cette figure est généralement une ellipse, mais deux cas particuliers sont importants : lorsque la figure est un segment, on parle de polarisation linéaire, et lorsque la figure est un cercle, on parle de polarisation circulaire.

Une onde est dite polarisée circulairement ou elliptiquement à droite si, en s'éloignant de la source, le champ tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. À l'inverse, s'il tourne dans le sens opposé, l'onde est polarisée à gauche. [3]

I.3 Paramètres fondamentaux des antennes

I.3.1 Diagramme de rayonnement :

Les antennes sont dans la plupart des cas omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées.

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0 , φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a pas de sens que si l'onde est sphérique [2].

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions [4].

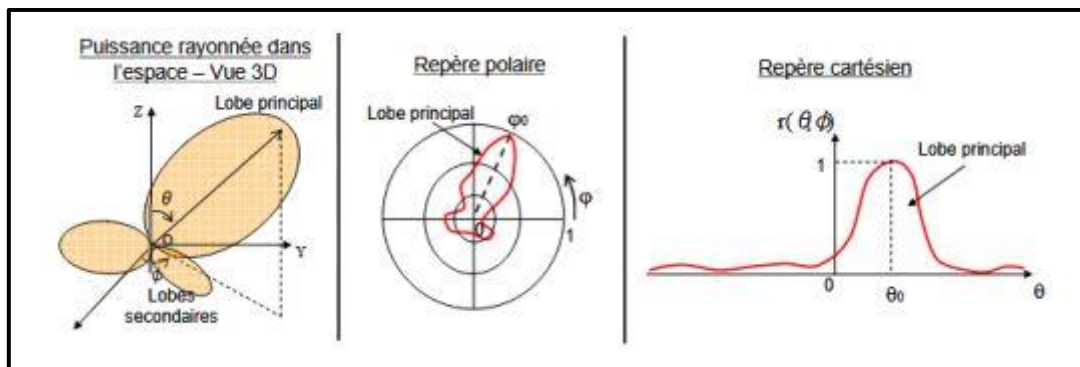


Figure I-1 : représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne

I.3.2 Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante [5] :

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

I.3.3 Gain :

D'une antenne dans une direction donnée est la quantité descriptive de la performance de l'antenne, c'est la quantité d'énergie rayonnée dans cette direction comparée à l'énergie qu'une antenne isotrope rayonnerait dans la même direction avec la même puissance d'entrée. Le rapport de gain est donné par [4]:

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

Le gain est lié à la directivité, il définit l'augmentation de la puissance émise ou reçue dans le lobe principal, il est dû au fait que l'énergie est focalisée dans une seule direction, il est exprimé en dBi (décibels par rapport à l'antenne isotrope) [2]: $Gain = \eta D$ Pour avoir un gain important, l'antenne doit avoir un diagramme de rayonnement directif et réciproquement.

I.3.4 Bande passante :

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

$$BP_r = \frac{BP}{f_c}$$

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

f_c : fréquence centrale.

BP_r : La largeur relative de bande passante.

La figure ci-dessous montre un exemple d'un coefficient de réflexions S_{11} en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à -10 dB. [6]

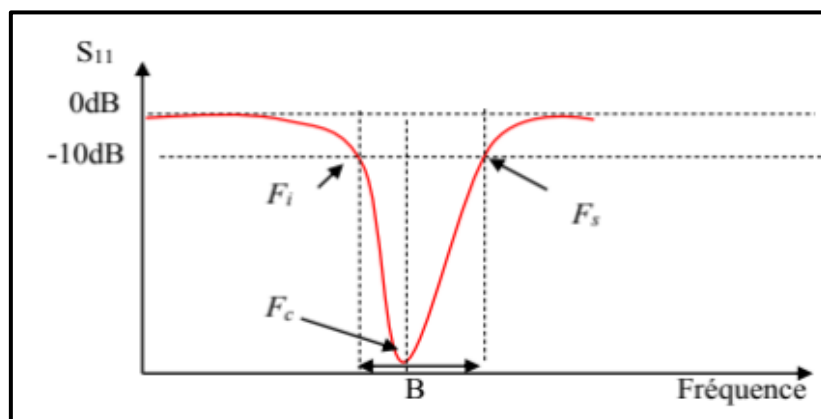


Figure I-2 Bande passante et coefficient de réflexion [7]

I.3.5 Polarisation :

La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction du champ électrique E . Si $\vec{E}$ garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne. Si la direction varie avec le temps de telle sorte que si, en un point donné, on schématise les positions successives de $\vec{E}$, l'extrémité du vecteur représentatif décrit un cercle ou une ellipse. On dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique

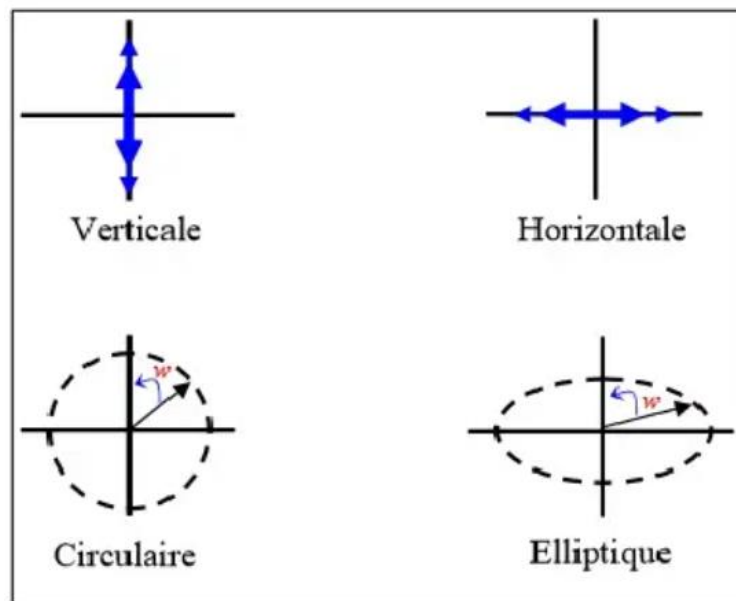


Figure I-3 polarisation du champ électromagnétique

Une atténuation typique de près de 40 dB est observée lorsque nous utilisons deux polarisations différentes dans les bandes micro-ondes. Ainsi, si une antenne transmet à la verticale et la seconde à l'horizontale, une différence de signal de 40dB peut être observée sur le signal reçu par rapport à celui transmis. Ceci pouvant transformer un bon signal en un signal non satisfaisant. L'onde étant plus longue, l'effet d'atténuation est moins prononcé entre les polarisations. Dans le tableau. Nous présentons les caractéristiques de chacun des types de polarisations précitées [8]

Polarisation Horizontale	Polarisation Verticale	Polarisation Circulaire
○ Meilleure sensibilité aux signaux faibles. ○ Angle de rayonnement généralement plus élevé par rapport au sol favorisant ainsi de bons contacts locaux	○ Bruit électrique plus présent dans les bandes HF ○ Optimisation de l'espace occupé par l'antenne Nécessite généralement un bon plan de terre (Grounds, masse)	○ Génère deux polarisations en phase pour éviter les pertes en traversant l'ionosphère pour compenser la rotation des satellites. ○ Rarement utilisée pour des contacts au sol

Tableau I-1 : Caractéristique de chacun des types de polarisations [8]

I.3.6 Impédance d'entrée :

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on assume une antenne en émission. L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existent un courant et une tension V_{in} . Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance Z_{in} (ou mieux encore, Z_a).

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a$$

I.3.6.1 La partie réactive (réactance) :

Est due aux champs d'induction au voisinage de l'antenne ; elle est capacitive pour les antennes électriquement courtes (un peu comme l'impédance vue près d'un circuit ouvert en régime sinusoïdale permanent) autrement, elle est inductive ou capacitive. Autrement dit elle est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

I.3.6.2 La partie active :

Est reliée aux champs (ou puissance) rayonnés et à la puissance perdue par effet de joules, elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement R_r et une résistance de perte R_l . La puissance associée à la résistance R_r est la responsable du rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance de perte R_l est perdue en chaleur dans l'antenne. [9]

I.3.7 Le VSWR :(adaptation)

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas que s'il y a adaptation entre l'impédance de l'antenne (Z_{in}) et celle de l'émetteur (Z_s). Selon le théorème de transfert de puissance maximale, cette dernière peut être transférée que si l'impédance de l'émetteur est un conjugué complexe de l'impédance de l'antenne et vice-versa.

Ainsi, la condition pour la correspondance est la suivante :

$$Z_{in} = Z_s^*$$

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$$

$$Z_s = R_s + jX_s$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchie, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires de tension (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR). Le VSWR est donné par Makarov.

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

$$\Gamma = \frac{v_r - v_i}{v_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s}$$

Où :

Γ : est appelé le coefficient de réflexion.

V_r : est l'amplitude d'onde réfléchie.

V_i : est l'amplitude d'onde incidente.

Le VSWR est essentiellement une mesure de la différence d'impédance entre l'émetteur et l'antenne. Plus le VSWR est grand plus la différence d'impédance est grande. Le VSWR minimale correspond à une adaptation parfaite. Une conception

Pratique de l'antenne doit avoir une impédance d'entrée égale à $50\ \Omega$ ou $75\ \Omega$, la plupart des équipements radio sont construit pour cette impédance. [9]

I.4 Types d'antennes :

Les antennes sont réparties en plusieurs catégories selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. Ainsi, on les classe comme suit [10] :

I.4.1 Selon la forme géométrique :

- Antennes filaires : dipôle, boucle, spirale.
- Antennes à ouvertures : cornet, fente.
- Antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.

I.4.2 Selon le gain :

- Gain élevé : planaire.
- Gain moyen : cornet.
- Gain bas : dipôle, fente, patch.

I.4.3 Selon la forme du faisceau :

- Omnidirectionnelle : dipôle.
- Faisceau étroit : planaire.
- Faisceau large : antenne réseau.

I.4.4 Selon la largeur de bande :

- Bande large : spirale.
- Bande étroite : patch, fente.

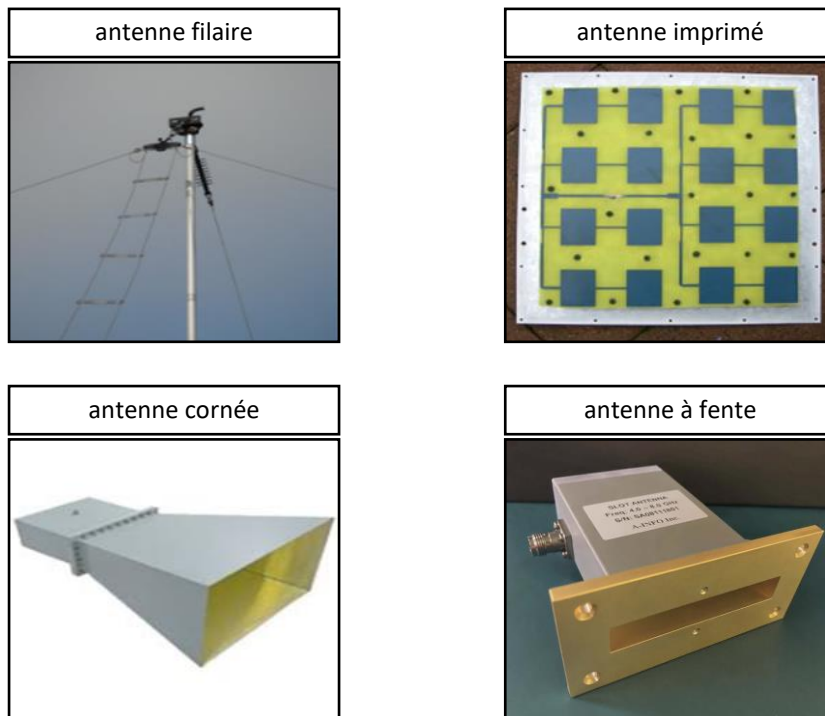


Figure I-4 : Différentes formes d'antennes

I.4.5 Antennes filaires :

Les antennes filaires sont familières aux gens ordinaires car on les voit Presque partout - dans les voitures, les vaisseaux spatiaux, etc.... Il existe différentes formes d'antennes filaires telles que le fil droit (bipolaire), la boucle et l'hélice qui sont illustrées à la figure. Les antennes annulaires ne doivent pas nécessairement être simplement circulaires. Elles peuvent prendre la forme d'un rectangle, d'un carré, d'une ellipse ou de toute autre forme. [10]

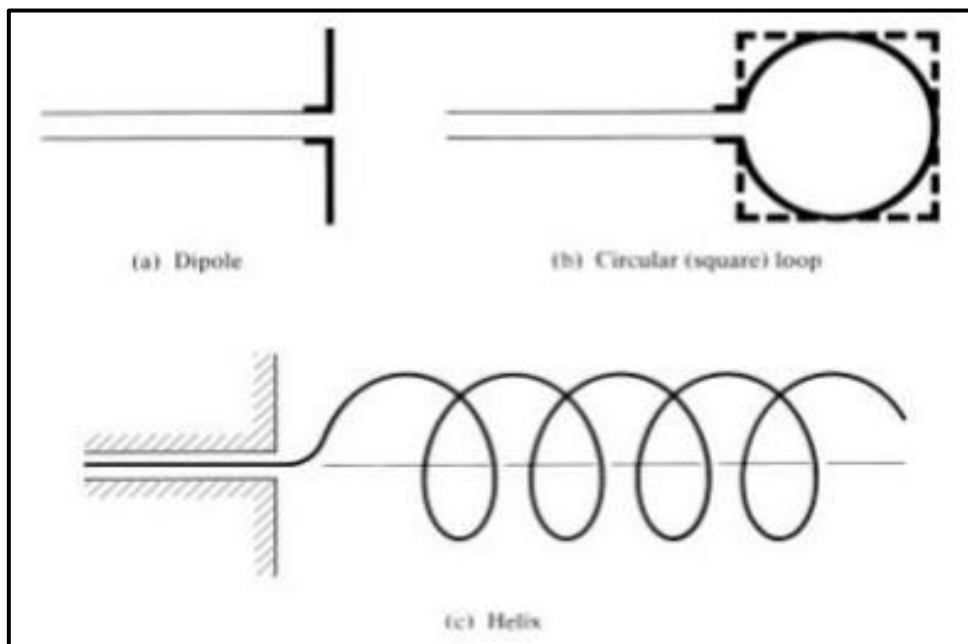


Figure I-5 : Configurations d'antennes filaires

I.4.6 Antennes à ouverture :

Les antennes à ouverture peuvent être plus familières aujourd'hui qu'elles ne l'étaient dans le passé en raison de la demande croissante pour des formes d'antennes plus avancées et de l'utilisation de fréquences plus élevées. Certaines formes d'antennes à ouverture sont illustrées sur la figure. Les antennes de ce type sont très utiles pour les applications aéronautiques et spatiales fixées sur la coque d'un avion ou d'un engin spatial. Elles peuvent être recouvertes de matériaux isolants pour les protéger des conditions environnementales souvent difficiles.

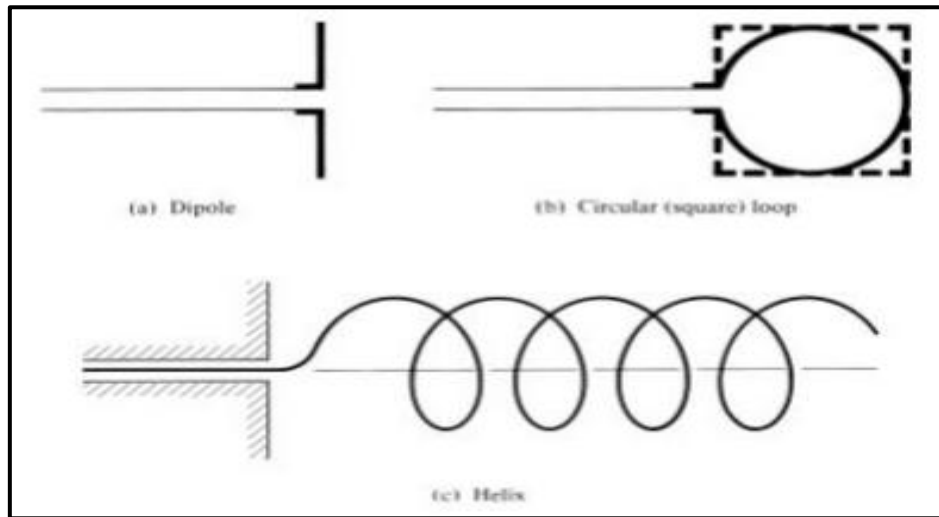


Figure I-6 : Configurations d'antennes à ouverture

I.4.7 Antennes micro-ruban (patch):

Les antennes micro ruban sont devenues très populaires dans les années 1970, principalement pour les applications spatiales. Aujourd'hui, elles sont utilisées dans des applications commerciales. Ces antennes consistent en un patch métallique sur un substrat mis à la terre.

Le patch métallique peut prendre de nombreuses configurations différentes, comme illustré ci - dessous. Cependant, les patches rectangulaires et circulaires, illustrés à la figure I.10, sont les plus populaires en raison de leur facilité d'analyse et de fabrication. [10]

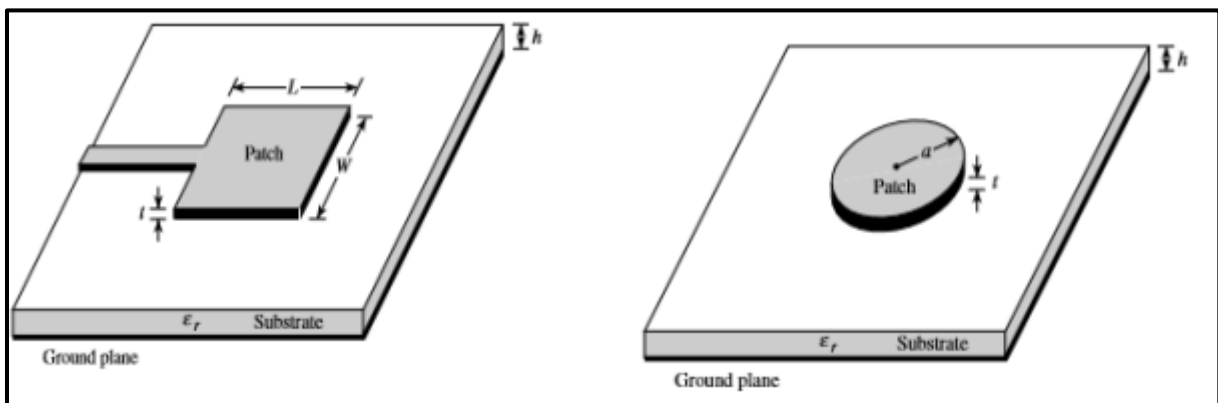


Figure I-7 : Antennes micro ruban (patch) rectangulaires et circulaires [10]

I.5 Antennes patch (microstrip) :

I.5.1 Introduction :

Les antennes microstrip, également connues sous le nom d'antennes patch, sont des composants essentiels dans les systèmes de communication modernes. Leur simplicité de conception, leur faible coût de fabrication et leur facilité d'intégration sur des circuits imprimés (PCB) en font un choix privilégié pour une variété d'applications, notamment les communications sans fil, les radars, et les systèmes de navigation par satellite (GPS). Ces antennes se caractérisent par leur structure plane et compacte, ce qui permet de les intégrer facilement dans des dispositifs électroniques portables et des systèmes embarqués. Grâce à leurs avantages uniques, les antennes microstrip sont couramment utilisées dans des appareils tels que les téléphones mobiles, les routeurs Wi-Fi, et les dispositifs de localisation GPS, ainsi que dans des applications industrielles et militaire.

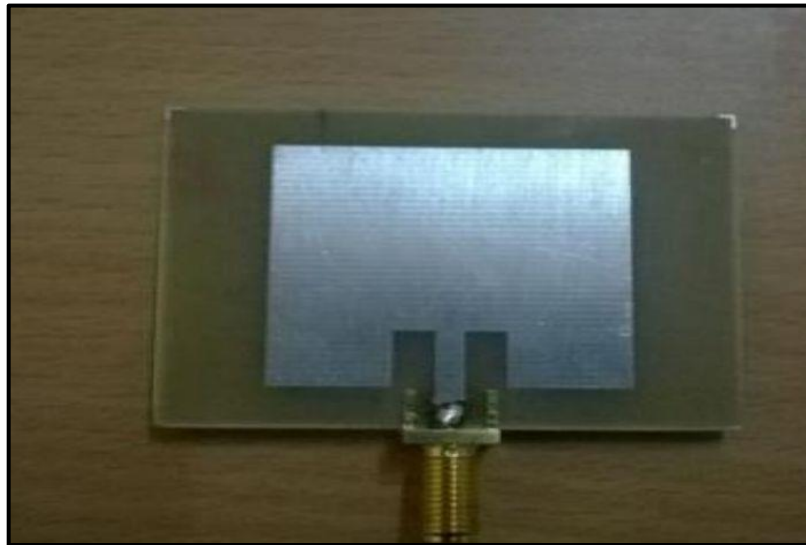


Figure I-8 : Antenne microstrip

I.5.2 Description géométrique et caractéristique :

Les antennes microstrip, également connues sous le nom d'antennes patch, sont des composants essentiels dans les systèmes de communication modernes. Leur simplicité de conception, leur faible coût de fabrication et leur facilité d'intégration sur des circuits imprimés (PCB) en font un choix privilégié pour une variété d'applications, notamment les communications sans fil, les radars, et les systèmes de navigation par satellite (GPS). Ces antennes se caractérisent par leur structure plane et compacte, ce qui permet de les intégrer facilement dans des dispositifs électroniques portables et des systèmes embarqués. Grâce à leurs avantages uniques, les antennes microstrip sont couramment utilisées dans des appareils tels que les téléphones mobiles, les routeurs Wi-Fi, et les dispositifs de localisation GPS, ainsi que dans des applications industrielles et militaire [11].

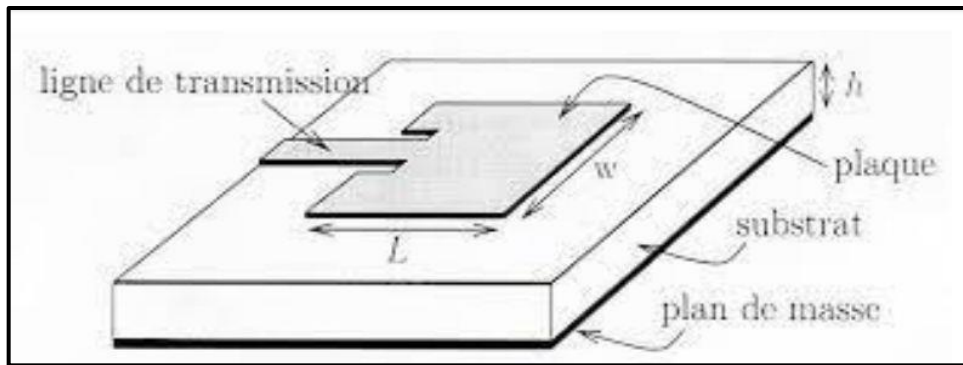


Figure I-9 : dépression d'antenne microstrip

I.5.3 Différentes formes des antennes microstrip :

L'antenne microstrip peut prendre plusieurs formes : rectangulaire, carrée, circulaire ou simplement un dipôle, ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication.

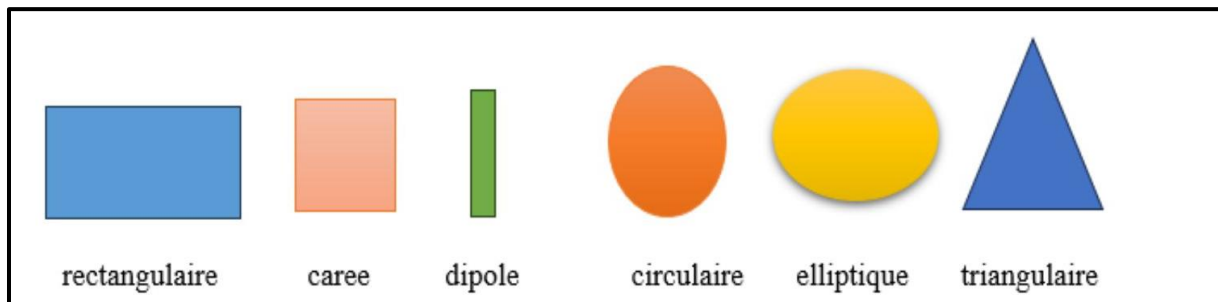


Figure I-10 : Différent formes d'antenne microstrip

I.5.4 Alimentation ;

L'impédance d'entrée d'une antenne est fixée lorsque sa taille est très petite par rapport à la longueur d'onde, comme dans le cas du dipôle. Cependant, lorsque la taille de l'antenne est plus grande, son impédance d'entrée dépend du point d'excitation. Les antennes planaires, avec des dimensions de l'ordre de la demi-longueur d'onde pour permettre l'établissement du phénomène de résonance, offrent diverses options d'alimentation, permettant de choisir différentes formes d'alimentation et différents points d'excitation [12].

I.5.5 Excitation par un ligne coaxiale :

Un patch rectangulaire se compose d'un rectangle de métal fin posé sur un diélectrique à faible permittivité, avec une fine couche métallique de l'autre côté servant de plan de masse. L'alimentation est assurée par un coaxial, dont l'âme traverse une cavité usinée dans le diélectrique et le plan de masse pour être soudée sur le plan métallique rayonnant du patch. Ce processus utilise un via pour la traversée du coaxial. [12]

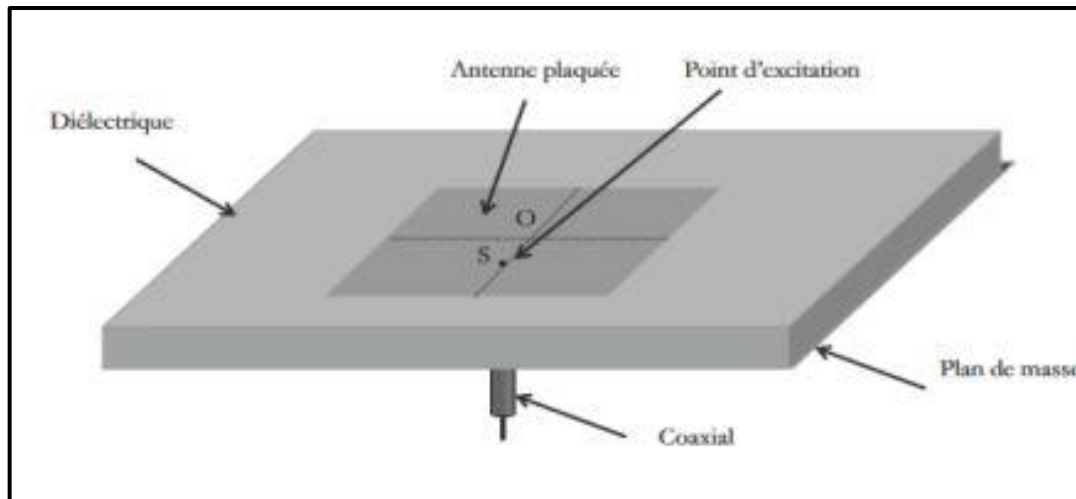


Figure I-11 : Alimentation d'une antenne plaquée rectangulaire par coaxial. Le point d'excitation (S) sur la médiane du rectangle influence l'impédance d'entrée, qui augmente lorsqu'on s'éloigne du centre. Ceci offre une marge de manœuvre pour optimiser l'adaptation [11].

I.5.6 Alimentation par ligne micro ruban :

L'alimentation la plus simple consiste à utiliser une ligne micro ruban sur le même plan que le patch rayonnant

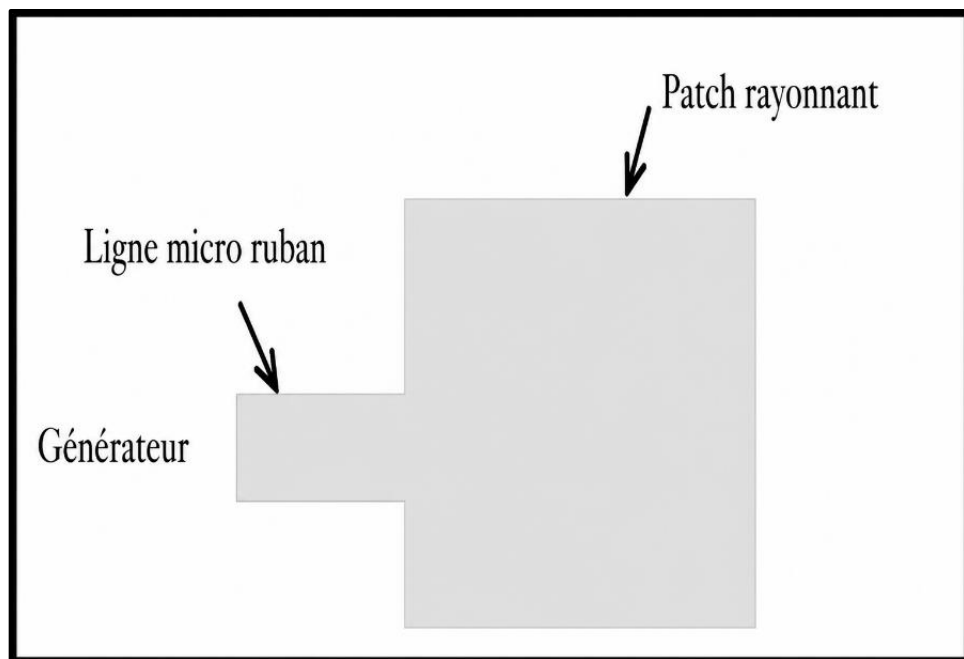


Figure I-12 : alimentation par ligne micro ruban

À des fréquences très élevées, la disposition peut être problématique car la ligne de transmission peut rayonner, affectant la polarisation de l'antenne. Malgré cela, pour des fréquences normales, cette méthode est largement utilisée en raison de sa simplicité. Pour améliorer l'adaptation entre la ligne micro ruban et l'antenne, il est courant de réaliser des encoches dont la taille est à calculer afin d'obtenir une meilleure adaptation [11].

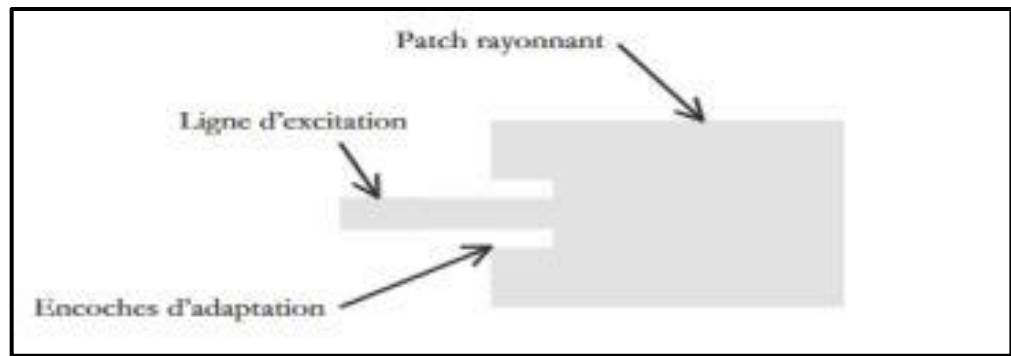


Figure I-13 : encoches d'adaptation

La polarisation circulaire est obtenue avec ce type d'alimentation en excitant un patch presque carré selon sa diagonale

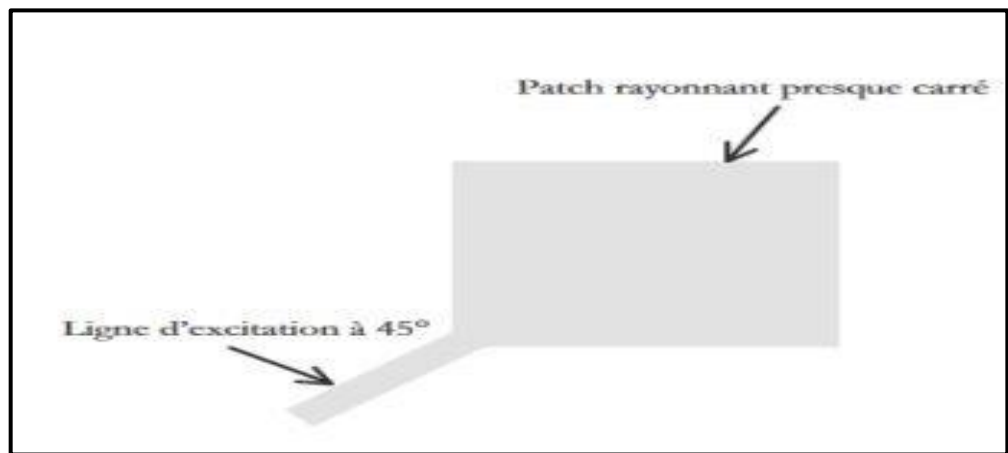


Figure I-14 : alimentation pour rayonnement à polarisation circulaire.

Une autre façon d'obtenir la polarisation circulaire est de réaliser deux lignes d'accès à 90°, débouchant symétriquement sur un patch carré, dont l'alimentation présente un déphasage de 90°.

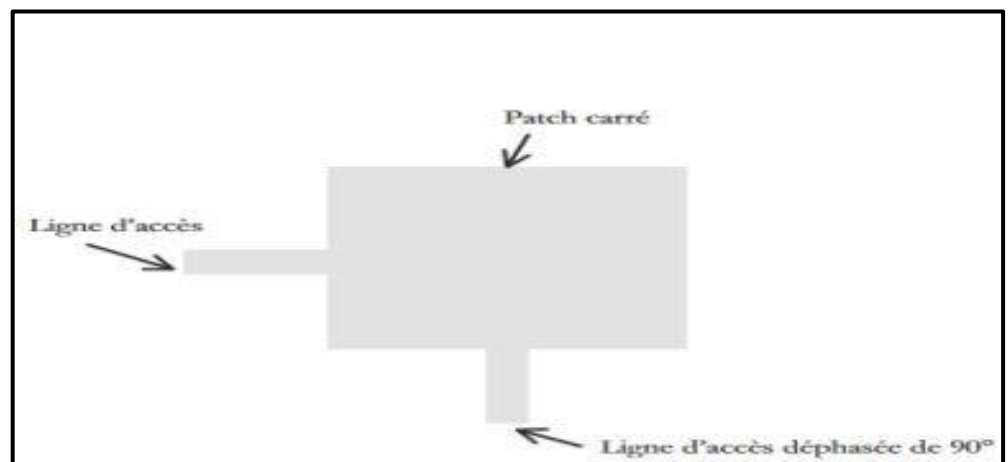


Figure I-15 : alimentation d'un patch carré par deux lignes déphasées de 90°

I.5.7 Alimentation par fente :

Placer la ligne d'alimentation sur un plan inférieur par rapport à l'élément rayonnant peut améliorer la qualité du rayonnement dans certains cas. Cela est réalisé en gravant la ligne sur la face arrière d'un diélectrique, avec un plan de masse sur la face avant, et en pratiquant une ouverture dans ce dernier. Cette disposition permet d'éviter le rayonnement de la ligne, qui est écrantée par le plan de masse. Le diélectrique au-dessus de ce plan de masse est souvent de faible permittivité pour favoriser le rayonnement de l'élément métallique gravé au-dessus. [11]

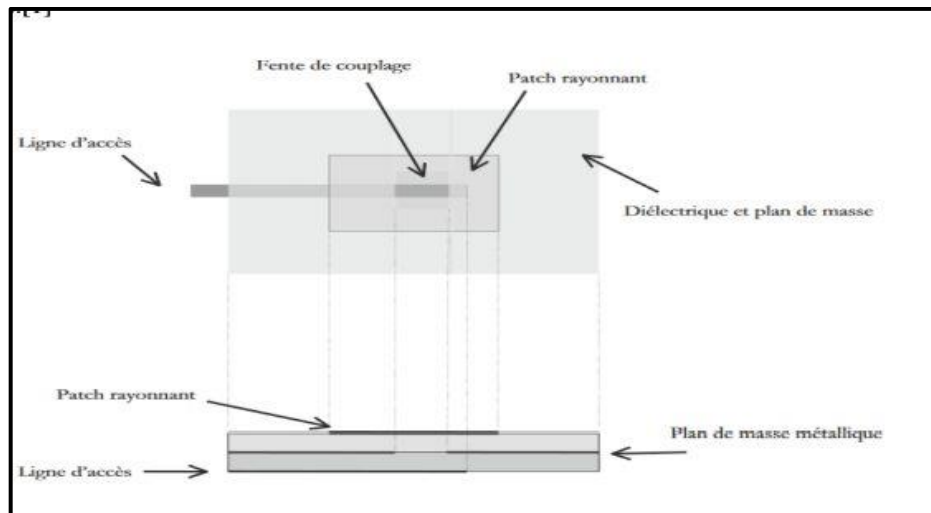


Figure I-16 : Alimentation par fente

Le diélectrique sous la ligne agit comme un écran, concentrant le champ électrique. Le couplage entre la ligne et l'élément rayonnant est magnétique à travers une ouverture, introduisant un élément inductif compensé par l'effet capacitif de la ligne micro ruban. La longueur de la ligne peut être ajustée pour obtenir l'adaptation appropriée. La conception d'une antenne ne peut être faite indépendamment de sa ligne d'adaptation. Dans les simulations numériques sur lesquelles s'appuie la conception, la partie de la ligne d'excitation est modélisée en même temps que le dispositif rayonnant. [11]

I.6 Avantages et inconvénients des antennes patch

Compte tenu de la structure plane des antennes imprimées, nous bénéficions donc de tous les avantages de la technologie des circuits imprimés. Comparées aux antennes conventionnelles, les avantages qu'on peut leur attribuer sont nombreux, néanmoins, on se contentera de citer les plus attrayants d'entre eux.

- Faible poids
- Faible encombrement
- Simplicité de réalisation et reproduction
- Fort rendement d'ouverture
- Polarisation variable simplement avec la position d'alimentation

Chapitre 1 : Généralités sur les antennes

- Possibilité d'association a des éléments actifs ou passifs tels que : amplificateurs, modulateurs, déphaseurs, etc.. . .
- Possibilité de les conformer sur des surfaces non planes.

Toutefois, comme rien n'est jamais parfaits, ce type d'antenne a ses propres inconvénients
Compose

- Bandes passantes très étroite
- Gain faible dû aux pertes
- Rendement faible (concentration des champs sur les parois métalliques)
- Effet de couplage parasite entre les éléments
- Pureté de polarisation difficile à obtenir
- Puissance supportée limitée
- Rayonnement parasite de l'alimentation [9]

I.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les notions générales relatives aux antennes, en commençant par la définition d'une antenne et son rôle essentiel dans les systèmes de télécommunications. Les principaux paramètres caractérisant une antenne, tels que le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité, la bande passante, la polarisation et l'adaptation d'impédance, ont été introduits afin de mieux comprendre leur influence sur les performances globales.

Par ailleurs, une classification des antennes a été abordée, en distinguant les antennes filaires, les antennes à ouverture et les antennes microruban, chacune ayant ses propres caractéristiques, avantages et domaines d'application. Une attention particulière a été accordée aux antennes patch (microstrip), en détaillant leur structure, leur principe de fonctionnement ainsi que les différentes méthodes d'alimentation.

Enfin, les avantages et les limitations des antennes microruban ont été discutés, mettant en évidence leur importance dans les applications modernes malgré certaines contraintes telles que la bande passante limitée. Ce chapitre constitue ainsi une base théorique essentielle pour aborder les chapitres suivants, consacrés à la conception et à la modélisation de l'antenne étudiée

Chapitre 2 : Formes
fractales et antennes
patch fractales

II. Chapitre 2 : Formes fractales et antennes patch fractales

II.1 Introduction :

Depuis l'antiquité, la géométrie utilisée pour décrire le monde était la géométrie euclidienne. Cette géométrie décrit facilement plusieurs objets de la nature tels que les cercles, les carrés, les triangles, les rectangles, les cônes de sphères ou de cubes. Néanmoins, nous pouvons facilement remarquer qu'il y a dans la nature des formes et des objets que nous ne pouvons pas définir à l'aide de ces figures géométriques conventionnelles et dès qu'il s'agit de décrire des objets très irréguliers cette géométrie atteint ses limites. Cela a mené les scientifiques à inventer de nouveaux modèles pour tenter d'expliquer cette irrégularité de la nature Ce qui a permis l'émergence d'une nouvelle géométrie, appelée « géométrie fractale », qui permet de modéliser un nombre important de formes naturelles.

Le concept de géométrie fractale a été introduit pour la première fois par le mathématicien Français Benoît Mandelbrot dans la première édition de son livre « les Objets fractals : forme hasard et dimension >> paru en 1975.

Citons donc maintenant, les principales différences qui existent entre la géométrie fractale et la géométrie euclidienne. [13]

Géométrie fractale	Géométrie euclidienne
○ Invention moderne par le mathématicien bientôt Mandelbrot (1970) ○ Pas de taille ou échelle spécifique. ○ Bien adaptée pour décrire la géométrie dans la nature. ○ Objets décrits par un algorithme	○ Mise au point par le mathématicien grec Euclide, 300 ans avant J.C ○ Basée sur une taille ou échelle caractéristique. ○ Utilisé pour la description des objets fabriqués par l'homme (architecture et topographie). ○ Objets décrits par une formule simple.

Tableau II-1: principes différents entre géométrie euclidienne et géométrie fractale [13]

Cependant, les premiers contacts avec ce genre d'objet mathématique remontent à 1872 quand le mathématicien allemand Karl Whilhem Theodor Weierstrass (1815-1897) provoqua une crise dans les mathématiques (il ne leur en fallait pas vraiment beaucoup à l'époque.) en décrivant une courbe qui ne pouvait être en aucun de ses points. Par la suite, les principes théoriques nettement pressentis de ces objets ont été formulés par des mathématiciens ou physiciens, dès la fin du 19ème siècle et le début du vingtième siècle, comme Cantor,

Hausdorff, Besicovitch, Julia, Fatou, Henri Poincaré, Jean Perrin, Von Koch, Peano et Sierpinski qui d'ailleurs la plupart d'entre eux ont donné leur nom a une fractale, mais leur complexité et l'absence de moyens pour représenter convenablement ces objets firent que cette branche des mathématiques ne se développera que bien plus tard. De fait, la fractale de Mandelbrot a été tracé pour la première fois en 1980.

Le mot « Fractale » est inspiré du mot latin « Fractus » qui signifie irrégulier ou brisé. Ce sont des objets infinis possédant une structure géométrique répétitive et autosimilaire.

Généralement, on dit qu'un objet est infini lorsqu'il est déterminé par une fin non tangible, c'est-à-dire que si vous zoomez », et vous zoomez encore, il y aura toujours de nouveaux détails qui apparaîtront sur lesquels vous pourrez encore « zoomer » [13]

II.2 Géométrie fractale

Depuis l'antiquité, la géométrie utilisée pour décrire le monde était la géométrie euclidienne. Cette géométrie décrit facilement plusieurs objets de la nature tels que les cercles, les carrés, les triangles, les rectangles, les cônes de sphères ou de cubes. Le terme de fractal a été introduit par Benoît Mandelbrot au cours des années 70, dans un ouvrage célèbre, plusieurs fois édité et modifié qui s'appelle « Les Objets Fractals »

II.2.1 Définition des fractales :

Le mot « fractale » est inspiré du mot latin « fractus » qui signifie irrégulier ou brisé ce sont des objets infinis possédant une structure géométrique répétitive et autosimilaire.

Le terme « fractal » a été introduit par Benoît Mandelbrot (fractal, c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini, du latin « fractus » dérivé du verbe « franger », briser). Une définition à la fois précise et générale d'un objet fractal est difficile, nous le définirons avec Mandelbrot comme un ensemble qui présente des irrégularités à toutes les échelles. [14]

II.2.2 Propriétés (auto-similarité, dimension fractale) :

Les particularités et les propriétés des objets fractales découlent de la forme auto similaire et de dimension non entière.

- **Auto-similarité** : La géométrie fractale est basée sur la reproduction d'un même motif de plus en plus petit. En effectuant un zoom sur un objet, on observe toujours exactement la même. [14]
- **Dimension fractale** : ou dimension de similarité est le nombre qui quantifie le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un ensemble géométrique ou d'un objet naturel.

La dimension fractale est aussi une mesure de la façon dont la forme fractale occupe l'espace. [14]

II.3 Les différentes formes fractales :

Il y a plusieurs formes fractales, classées sous trois catégories

- Les courbes fractales
- Les surfaces fractales
- Les volumes fractals [15]

II.3.1 Les courbes fractales :

II.3.1.1 La courbe de Koch :

Le fractale de Koch est l'une des premières courbes fractales et sa construction est très simple. On commence par une ligne de départ droite, on divise cette ligne en trois parties égales, la partie médiane sera remplacée par deux autres parties de même longueur. Il s'agit de la première transformation répétée de la géométrie, connue sous le nom de générateur ou fractale de Koch d'ordre 1. Pour chacun de ces quatre nouveaux segments, nous répétons le même processus, comme le montre la Figure. La première itération de la droite de longueur l est remplacée par 4 segments de longueur $\frac{l}{3}$, à la seconde $16 \times \frac{l}{9}$ et ainsi de suite.

À chaque nouvelle itération, la longueur $\frac{l}{3}$ est multipliée par $\frac{4}{3}$, ce qui signifie que la longueur de la courbe de Koch tend vers l'infini en itérations infinies [15]

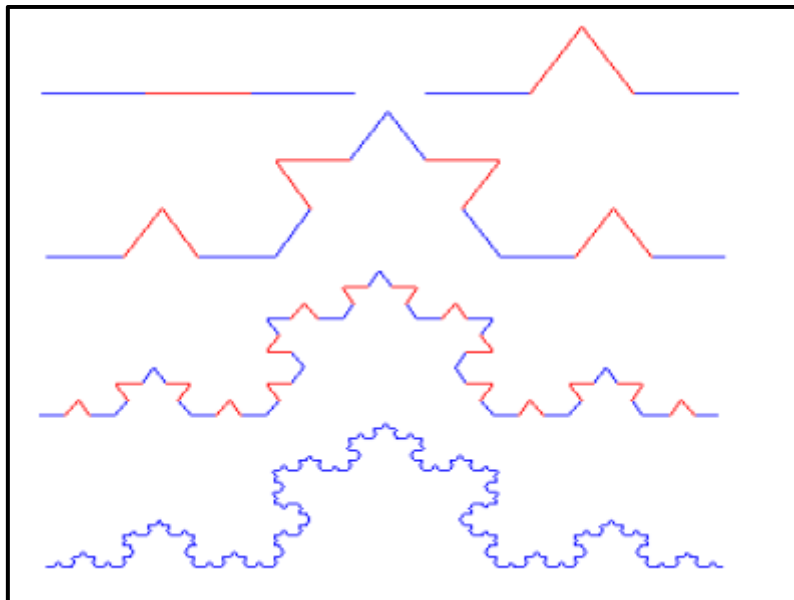


Figure II-1 : La courbe de coche [15]

II.3.1.2 Ensemble de Cantor

L'ensemble de Cantor est la poussière de Cantor, obtenue en éliminant itérativement le tiers central de chaque fragment (Figure). Afin d'avoir une représentation plus évidente d'une part, et d'introduire un lien entre mesures et ensembles d'autre part, les segments sont des barres de largeur fixe (barres de Cantor), représentant ainsi une densité uniformément répartie sur « l'ensemble support ». La dimension de cette fractale est $D = \frac{\log 2}{\log 3} = 0.6309 \dots$ [14]

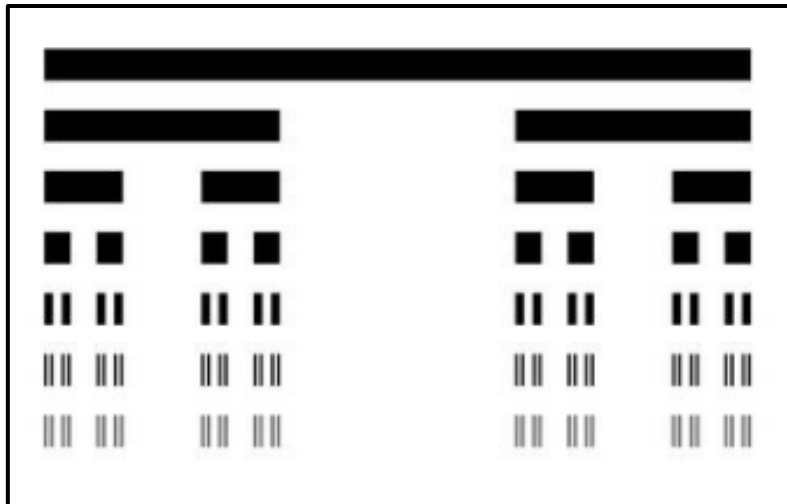


Figure II-2 : Ensemble cantor [14]

II.3.1.3 Fractale de Minkowski :

Ce type de courbe a été proposé par le mathématicien Hermann Minkowski (1864-1904). On part d'un modèle carré et on considère l'itération 0 (le modèle initial), puis on subdivise chaque partie du carré en cinq parties pour chaque partie du carré, et ainsi de suite [15]

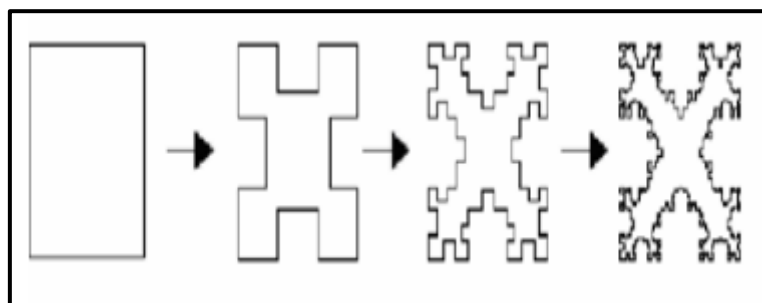


Figure II-3 : la fractale de Minkowski [15]

II.3.1.4 Les fractales d'Hilbert

La construction géométrique de la courbe de Hilbert est définie par l'algorithme suivant : On divise d'abord le carré initial en 4 petits carrés égaux ; chacun de ces carrés est numéroté de manière que deux carrés successifs se touchent d'un côté, nous commençons par le carré en bas à gauche et se termine par le carré inférieur droit. On divise ensuite chacun de ces nouveaux carrés en 4 micro-carrés égaux, jusqu'à l'infini [14]

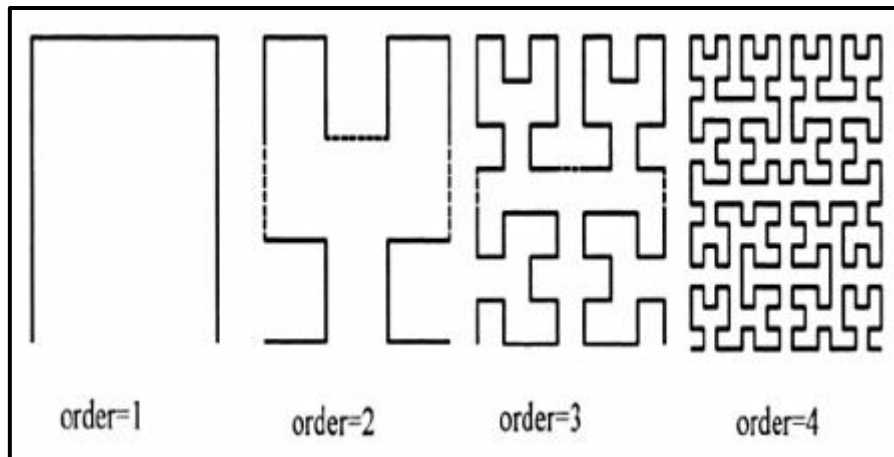


Figure II-4 : Les fractales d'Hilbert [15]

II.3.1.5 Les fractales de Peano :

La construction géométrique la plus célèbre de la courbe de Peano commence par dessiner les diagonales d'un carré. Pour effectuer la deuxième étape, nous divisons le carré initial en neuf petits carrés congruents, puis traversons tous les carrés avec un trait au crayon passant par l'une de leurs diagonales. De même pour chaque petit carré que nous subdivisons à nouveau, nous y traçons le même parcours. Le carré entier est réalisé dans un processus itératif jusqu'à l'infini [15]

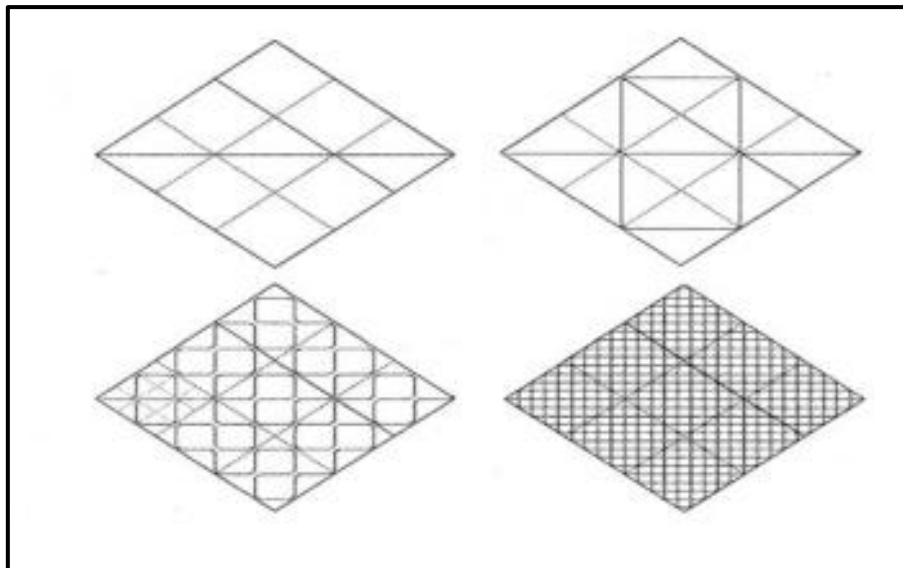


Figure II-5 : Les fractales de Peano [14]

II.3.2 Les surfaces fractales :

II.3.2.1 Triangle de Sierpinski (sierpinskiasket) :

La fractale de Sierpinsky apparue en 1915 est l'une des formes fractales les plus utilisées. Elle est baptisée du nom de Waclaw Sierpinsky, le mathématicien polonais qui l'a intensivement étudié. [13]

La génération du triangle se base sur deux méthodes à savoir : l'approche copie multiple, ou l'approche de décomposition. Dans la première, on commence par un petit triangle. Deux copies supplémentaires de ce triangle de la même taille sont produites et collées au triangle original. Ce processus peut être répété n fois, n étant l'ordre de l'itération fractale. Dans l'approche de décomposition, on commence par un grand triangle entourant la géométrie entière [13]

Copies supplémentaires de ce triangle de la même taille sont produites et collées au triangle original. Ce processus peut être répété n fois, n étant l'ordre de l'itération fractale. Dans l'approche de décomposition, on commence par un grand triangle entourant la géométrie entière.

La géométrie représentée sur la figure II.6 illustre ce processus. Avec cette méthode, On obtient 3^n triangles après la $n^{\text{ième}}$ étape.

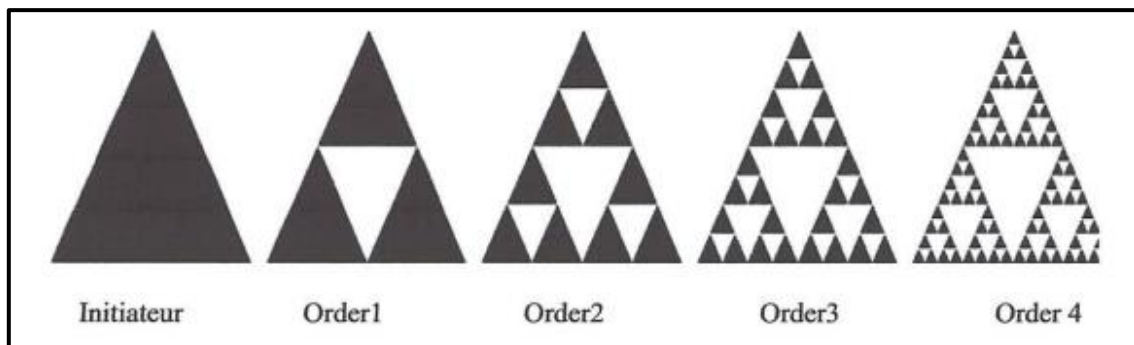


Figure II-6 : Génération de la géométrie d'un triangle de Sierpinski. [13]

Dans l'équation ci-dessus, r et s sont des facteurs d'échelles, θ et φ correspondent aux angles de rotation et X_0 et Y_0 des vecteurs de translation. On peut remarquer que si : $r = s$: la transformation est auto-similaire (même échelle dans les deux plans) $r \neq s$: la transformation est auto-affine (échelle différente dans les deux plans).

Les transformations W_1, W_2, W_3

Les transformations IFS de cette forme peuvent être exprimées comme suite [13]:

$$W\left(\frac{x}{y}\right) = \begin{bmatrix} r \cos \theta & -\sin \theta \\ r \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}$$

Sont :

$$w_1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$w_2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$w_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.433 \end{pmatrix}$$

La géométrie sera obtenue avec l'union de ces trois transformations :

$$W(A) = W_1(A) \cup W_2(A) \cup W_3(A)$$

Strictement auto similaire pour un angle de 60° sont :

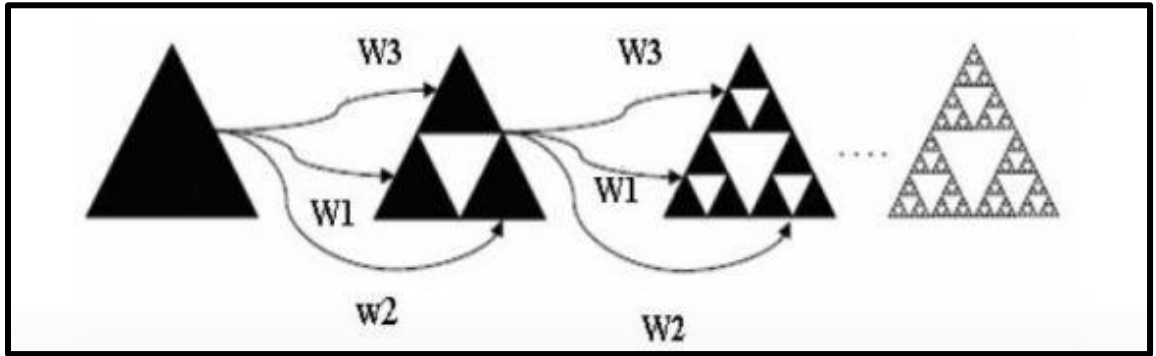


Figure II-7 : IFS pour la génération de triangle sierpinski auto similaire

Une extension de la notion de la dimension permet de préciser que cette courbe a une dimension fractale non entière.

La dimension fractale est donnée où : le facteur d'échelle de fréquence est de 2, tandis que le rapport de masse est de 3 [16]:

$$D = \frac{\log 3}{\log 2} = 1.585$$

Théorème : (Configuration de l'antenne triangle)

La conception de ce type d'antenne est commencée par un triangle équilatéral, le coté a de ce triangle est calculé par la relation [16]:

$$f_{10} = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}}$$

La fréquence de résonance pour les modes supérieurs est calculée par [16] :

$$f_{mn} = f_{10} \sqrt{m^2 + mn + n^2}$$

Théorème : (Auto-similitude)

Une application affine $w: R^2 \rightarrow R^2$: est une similitude si et seulement si c'est une composition de rotation, dilatation (ou contraction), réflexion et translation, c'est-à-dire si et seulement si elle est de la forme [16]

$$w \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k \cos \theta & -k \sin \theta \\ k \sin \theta & k \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}$$

II.3.2.2 Le tapis de SIERPINSKI

La construction du tapis de SIERPINSKI est conçue à partir d'un carré plein et en appliquant récursivement les étapes suivantes [17]:

- 1- On découpe le carré en neuf carrés égaux avec une grille de trois par trois, 2- On supprime la pièce centrale,
- 3- On applique cette procédure indéfiniment aux huit carrés restants.

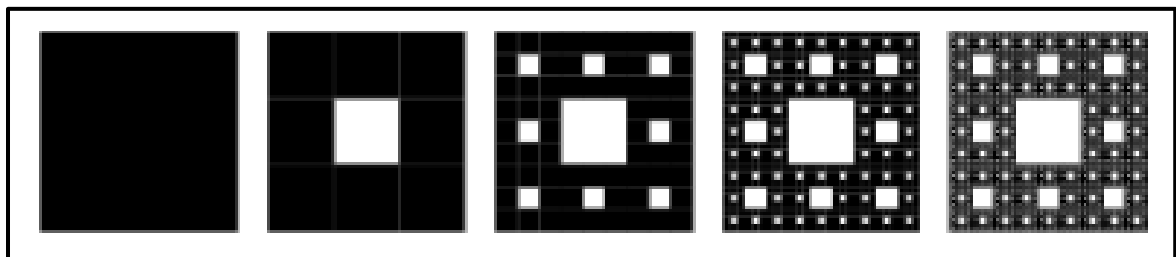


Figure II-8 : Génération de la géométrie du tapis de Sierpinski [17]

II.3.2.3 L'étoile de Koch

L'étoile de Koch est décrite pour la première fois par le mathématicien suédois Helge Von Koch en 1904.

Le flocon de Koch ou l'étoile de Koch s'obtient de la même façon que la fractale Précédent de la courbe de Koch, en partant d'un triangle équilatéral au lieu d'un segment droit, et en effectuant les modifications en orientant les triangles vers l'extérieur [N]. Pour un triangle initial (étape 0) de périmètre p , le périmètre du flocon à l'étape n est $(4/3)^n p$

On peut aussi partir d'un hexagone, et opérer en orientant les triangles vers l'intérieur. Dans les deux cas, après quelques itérations on obtient une forme évoquant un flocon de neige régulier.

L'étoile de Koch est de longueur infinie et délimite une aire finie. Elle est égale à $8/5$ de l'aire du triangle initial dû à la construction de seulement 3 triangles lors de la première étape. [17]

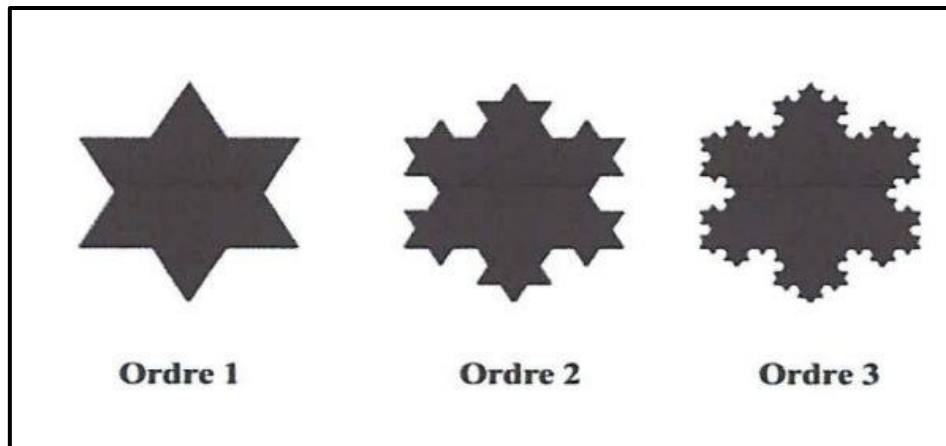


Figure II-9 : L'étoile de Koch

II.3.3 Les volumes fractals

II.3.3.1 Le tétraèdre de Sierpinski

Le tétraèdre de Sierpinski Il existe aussi une version 3D du tamis de Sierpinski, le « tétraèdre de Sierpinski », attracteur de 4 homothéties de rapport $1/2$ centrées aux sommets d'un tétraèdre, sa dimension fractale égale à 2. [17]

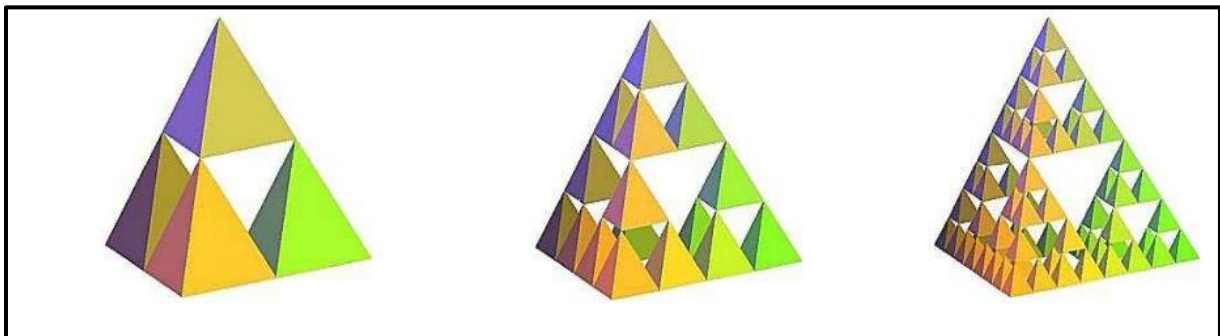


Figure II-10 : Le tétraèdre de Sierpinski

II.3.3.2 L'éponge de Sierpinski Menger

L'éponge de Sierpinski Menger En dimension 3, la fractale de Sierpinski la plus célèbre, est l'éponge de Sierpinski Menger (mathématicien Américain), attracteur de 20 homothéties de rapport $1/3$ centrées aux sommets et aux milieux des arêtes d'un cube, d'une dimension fractale de 2.7. [17]

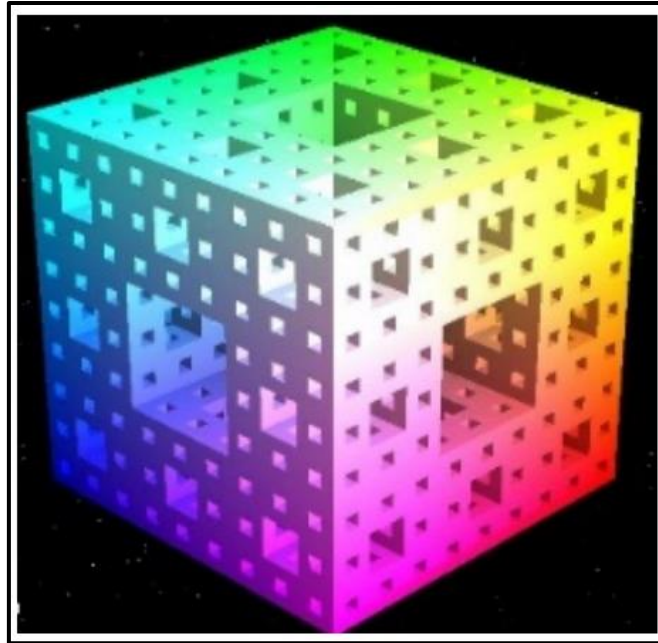


Figure II-11 : Eponge de Sierpinski-Menger - Ordre 3

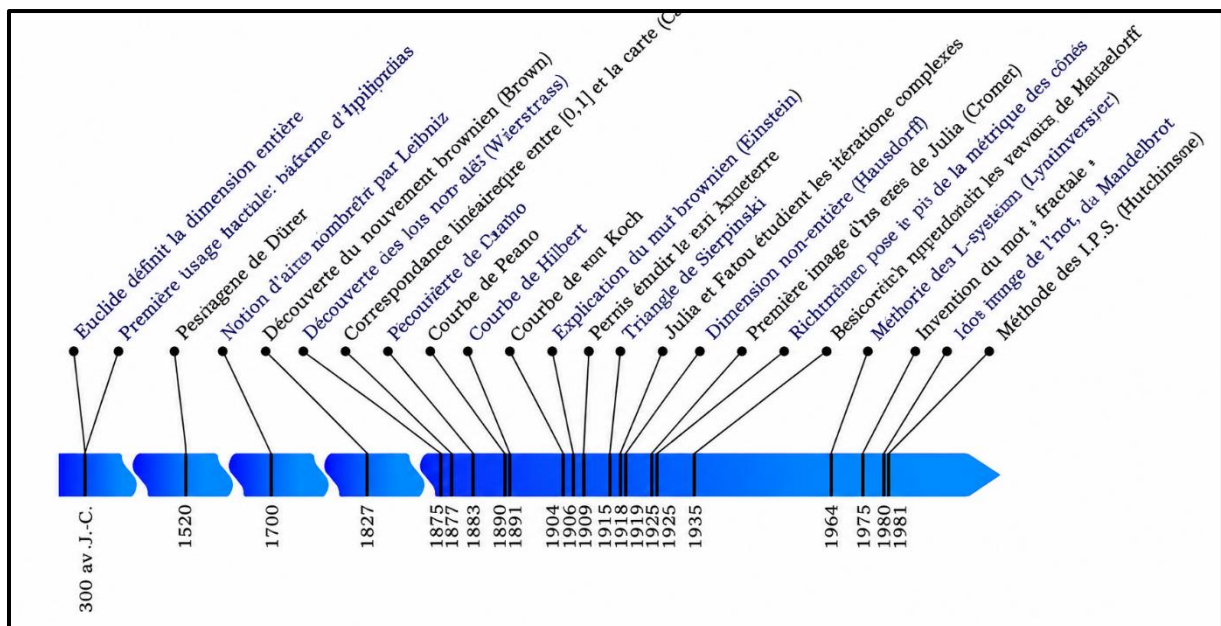


Figure II-12 Résumé chronologique de l'histoire des fractales

II.3.3.3 Application de la géométrie fractale

Depuis la contribution de Mandelbrot, les fractales sont devenues une véritable notoriété, ils sont tout d'abord utilisés pour décrire les objets irréguliers qui existent dans la nature (géométrie d'une côte, arbres, plants...) mais à nos jours les possibilités qu'offrent les fractales dans les avancées mathématiques, physiques, et technologiques sont nombreuses [19]:

- La compréhension, le calcul et le traitement de certains phénomènes aléatoires qui n'obéissent pas aux lois statistiques classiques comme les bruits parasites dans les circuits électroniques ;

- En informatique, la compression de fichiers (images, sons) utilise ces propriétés bien utiles pour gagner de la place. Incontestablement un domaine qui a fait l'objet de nombreuses études est la compression d'images par la technique des IFS qui repose sur la détection de la récurrence des motifs, et tend à la suppression de la redondance d'informations dans l'image.
- Il est possible d'utiliser aussi cette notion en infographie pour créer des paysages réalistes ou pour rendre les mouvements plus véridiques. Les fractales servent ainsi à créer des images fixes ou des vidéos sur un ordinateur. En 1987, le mathématicien Michael F. Barnsley montra en effet qu'on pouvait obtenir une approximation de photographies numérisées à l'aide des fractales. Par ce procédé, il est possible de stocker des images en utilisant un nombre minimal de données. Ce processus est utilisé dans de nombreuses applications multimédias.
- Un autre domaine d'application est l'utilisation des formes fractales dans la conception d'antennes où certaines de ces géométries ont été particulièrement utiles en diminuant la taille de l'antenne, alors que d'autres visent à implanter des caractéristiques multi-bandes.

En conclusion, on peut dire que les fractales connaissent donc une grande heure de gloire, et deviennent incontournables dans la quasi majorité des domaines scientifiques [19]

II.4 Les antennes fractales :

II.4.1 Définition

Une fractale est une antenne utilisant une conception fractale, aussi dite auto -similaire, son aspect clé réside dans la répétition d'un motif sur plusieurs tailles d'échelle ou "itérations".

La réponse d'une antenne fractale diffère sensiblement de celle des modèles traditionnels d'antennes, car elle peut fonctionner à plusieurs fréquences simultanées avec des performances allant de bonnes à excellentes. Notons que cette géométrie est aussi exploitée dans la conception des antennes afin d'assurer une miniaturisation de taille tout en combinant l'aspect multi-bandes et large-bande avec un encombrement réduit

II.4.2 Propriétés des structures fractales

Le tableau résume les deux raisons pour lesquelles nous avons choisi d'étudier des structures d'antennes dont la géométrie est fractale.

Propriétés des structures fractales	Conséquences
Autosimilarité fractale	Antennes multi-bandes
Occupation de l'espace due aux formes très accidentées	Petites antennes

Tableau II-2 : Propriétés des structures fractales et leur conséquence

II.4.3 Avantages et inconvénients

- L'antenne fractale présente les avantages suivants :
 - ☑ Surface occupée très réduite : la compacité résulte du caractère irrégulier des formes fractales.
 - ☑ Résonances multiples : le caractère Multibande et large bande vient du caractère d'autosimilarité.
 - ☑ Gain très important dans certain cas.
- Les principaux inconvénients d'une antenne fractale sont :
 - ☒ Gain faible dans d'autres cas.
 - ☒ Réalisation très difficile liée à la complexité des formes

II.5 Types de fractales utilisées en antennes

II.5.1 Tapis de Sierpinski (Sierpinski Carpet) :

On obtient généralement ce « tapis » en partant d'un carré. On le subdivise en 9 carrés de même taille et on supprime le carré central. On répète l'opération sur les huit carrés restants et ainsi de suite

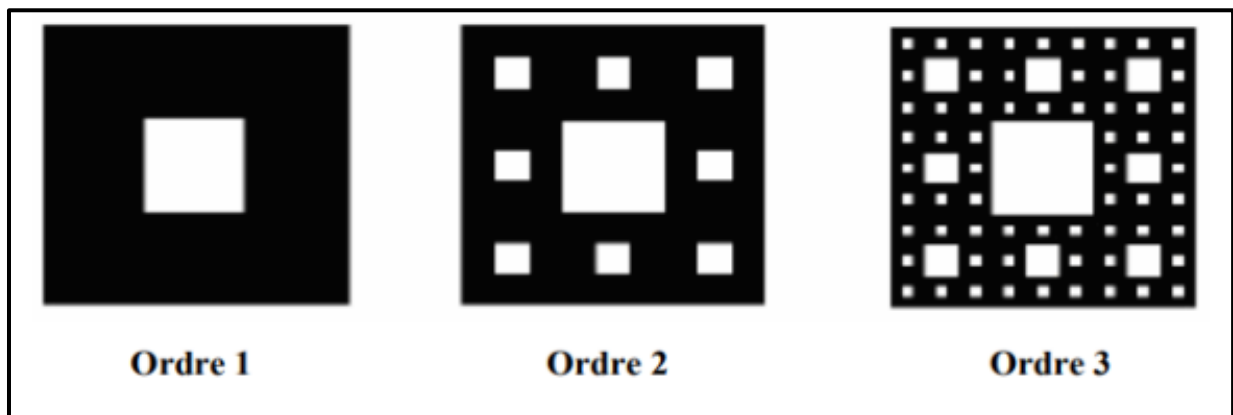


Figure II-13 : Génération de la géométrie du tapis de Sierpinsky [17]

II.5.2 Triangle de Sierpinski :

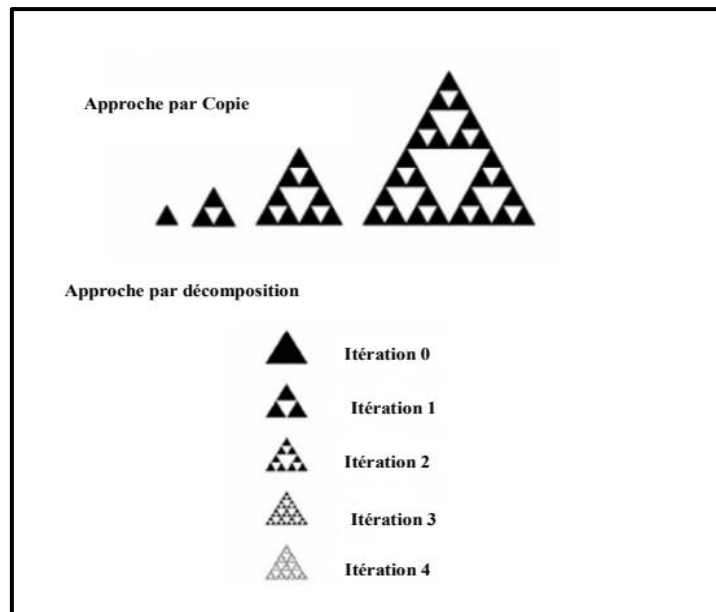


Figure II-14 : Génération du triangle de Sierpinsky par les deux approches [18]

II.5.3 Courbe de Koch :

La fractale de Koch est aussi l'une des premières courbes fractales à avoir été décrite en 1906 par le mathématicien Suédois Helge Von Koch.

Le principe de construction géométrique de la courbe de Koch est assez simple. Au départ on trace une ligne droite, appelée l'initiateur ce qui représente l'itération 0. Puis on divise cette ligne en trois parts égales et le segment du milieu sera remplacé lui aussi par deux autres de la même longueur. Et donc C'est la première itération de cette géométrie.

On refait le même processus pour chacun de ces quatre nouveaux segments et ainsi de suite, comme la montre la figure suivante :

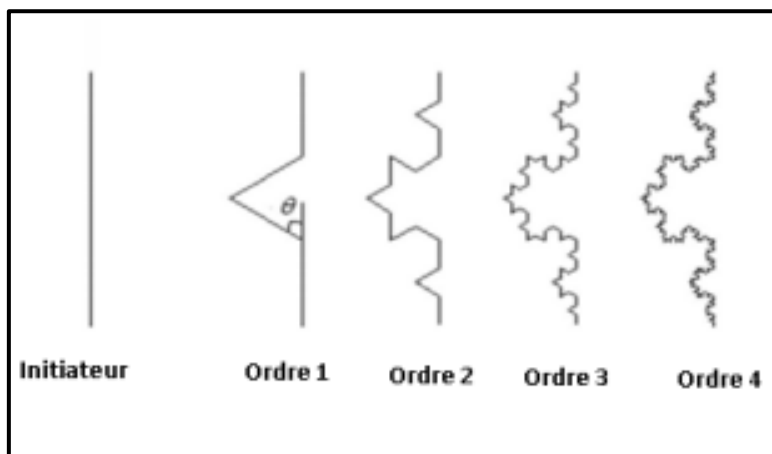


Figure II-15 : Courbe de Koch

II.6 Intérêt des fractales en antennes

Les géométries fractales, composées de structures répétitives et autosimilaires, ont conduit à des conceptions innovantes dans le domaine des antennes. Les antennes fractales présentent plusieurs avantages importants dans les systèmes de télécommunications modernes. Grâce à leur structure particulière, elles permettent de réduire la taille de l'antenne tout en conservant de bonnes performances électriques.

Les antennes fractales offrent également un fonctionnement Multibande et large bande. Une seule antenne peut ainsi fonctionner sur plusieurs fréquences différentes, ce qui la rend adaptée aux applications sans fil modernes telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, les réseaux mobiles et les communications satellitaires.

De plus, les structures fractales améliorent plusieurs paramètres de rayonnement comme le gain, la directivité et l'adaptation d'impédance. Elles augmentent également la longueur électrique du courant sans augmenter considérablement les dimensions physiques de l'antenne [19]

II.6.1 Miniaturisation :

La miniaturisation d'une antenne consiste à réduire ses dimensions, sa surface et son volume à fréquence de résonance. Il doit être intégré le plus près possible de l'antenne du circuit d'adaptation nécessaire au fonctionnement. Les limites théoriques ont été fixées par WHEELER en 1947 et par CHU en 1948. Ce dernier précise la relation entre la taille de l'antenne et sa bande passante (ou son facteur de qualité). $\frac{\lambda}{\pi}$ (λ étant la longueur d'onde), cette valeur est souvent appelée le radian sphère. Cette définition est équivalente au fait de dire qu'une antenne est électriquement petite si elle vérifie la condition suivante

$$K_a < 1$$

Où :

K est le nombre d'onde égale $\frac{2\pi}{\lambda}$, et a le rayon de la sphère minimale qui inclut l'antenne. [20]

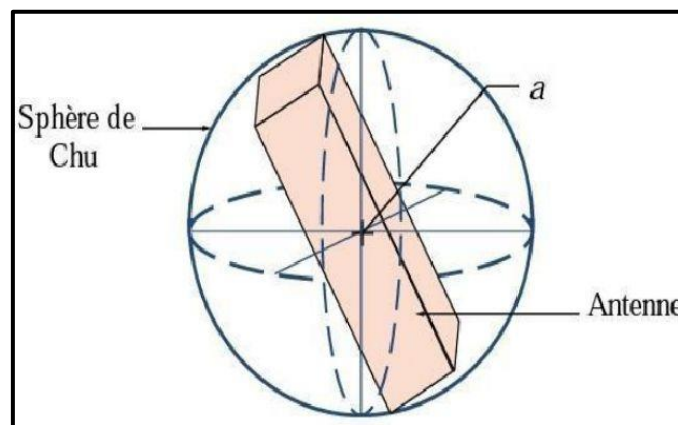


Figure II-16 : Sphère minimale qui englobe l'antenne : sphère de Chu

Le radian sphère correspond à la distance de transition entre le champ proche ou l'énergie électromagnétique est stockée dans l'antenne et le champ lointain où elle est propagée. La réduction de la taille de l'antenne par rapport à la longueur d'onde électrique limite le rendement radioélectrique de l'antenne. Les performances d'une AEP sont caractérisées par la taille électrique Ka , le facteur de qualité Q (ou bande passante), et l'efficacité. En effet, plusieurs études ont été réalisées pour déterminer la valeur minimale du facteur de qualité (et donc maximum de bande passante) pour une taille d'antenne donnée. [20]

II.6.1.1 Avantage et Inconvénient de la miniaturisation :

La miniaturisation constitue un atout important dans le domaine aéronautique [24]. Elle permet de réduire considérablement l'encombrement des équipements, ce qui rend les dispositifs plus simples à transporter, à stocker et à intégrer dans différents systèmes. Les structures compactes sont ainsi privilégiées par rapport aux équipements volumineux en raison de leur aspect pratique. Cette technique contribue également à diminuer le poids, les coûts de fabrication ainsi que la consommation d'énergie et de matériaux. De plus, elle favorise la conception de dispositifs multifonctionnels capables d'assurer plusieurs fonctions au sein d'un même système.

Néanmoins, comme toute technologie, la miniaturisation possède aussi certaines limites [25]. Les opérations de recyclage deviennent plus complexes, notamment lors de la séparation des métaux, ce qui réduit partiellement les bénéfices obtenus en matière d'économie d'énergie. Dans le cas des nanotechnologies, le recyclage des nanoéléments est presque irréalisable. Par ailleurs, pour une même puissance, les circuits électroniques miniaturisés dissipent davantage de chaleur alors que leur surface d'échange thermique est plus faible. Enfin, la réduction des dimensions d'une antenne peut entraîner une dégradation de ses performances électriques et électromagnétiques.

II.6.1.2 Les techniques de miniaturisation :

La modification de la géométrie et de la structure d'une antenne influence directement la circulation du courant électrique à sa surface. Ces transformations représentent parmi les méthodes les plus efficaces pour réduire les dimensions de l'antenne. En effet, cette approche permet d'augmenter la longueur électrique de la structure, ce qui entraîne une diminution de la fréquence de résonance des modes fondamentaux et des modes supérieurs.

Par ailleurs, plusieurs techniques ont été développées afin de résoudre le problème d'encombrement et de concevoir des antennes compactes. Dans ce qui suit, nous présenterons les méthodes de miniaturisation les plus couramment utilisées.

II.6.1.2.1 Substrat à haute permittivité :

La longueur électrique d'une antenne peut être augmentée grâce à l'utilisation de matériaux possédant une permittivité diélectrique élevée. Dans un milieu caractérisé par une permittivité relative ϵ_r , la longueur d'onde est exprimée par l'équation, où λ représente la longueur d'onde, f la fréquence et c la vitesse de la lumière :

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$$

L'augmentation de la permittivité du substrat entraîne une diminution de la longueur résonante de l'antenne, ce qui contribue à sa miniaturisation. Toutefois, les antennes conçues avec ce type de substrat présentent généralement certains inconvénients, notamment une réduction de la largeur de bande ainsi qu'une baisse du rendement. De plus, leur coût de fabrication reste relativement élevé [26].

II.6.1.2.2 Les métas matériaux :

L'utilisation des métamatériaux constitue une méthode récente et innovante dans le domaine de la miniaturisation des antennes. Ces matériaux artificiels, caractérisés par une permittivité et une perméabilité spécifique, possèdent des propriétés électromagnétiques particulières et inhabituelles [27].

Les métamatériaux offrent de nouvelles caractéristiques physiques permettant de confiner les ondes électromagnétiques dans des structures de dimensions réduites. Leur fonctionnement repose notamment sur des propriétés liées à l'inversion des lois de Snell-Descartes, conduisant à un indice de réfraction négatif. En général, ces matériaux sont constitués de structures périodiques dont les dimensions sont inférieures à la longueur d'onde du signal utilisé.

II.6.1.2.3 Ajout de court-circuit – antennes PIFA :

L'intégration d'un court-circuit constitue une solution efficace pour diminuer les dimensions des antennes. Cette technique est principalement appliquée aux antennes de type PIFA [28]. Ces dernières sont composées d'une plaque métallique rayonnante reliée au plan de masse par un court-circuit. La largeur de cette connexion peut être ajustée selon les caractéristiques recherchées.

L'alimentation de l'antenne est généralement assurée par une sonde verticale, considérée comme la méthode la plus appropriée dans ce type de structure. Entre le plan de masse et l'élément rayonnant, l'air est souvent utilisé comme diélectrique (Figure). Toutefois, d'autres matériaux, tels que la mousse, peuvent être employés afin d'améliorer la rigidité mécanique de l'antenne.

Les antennes PIFA présentent l'avantage d'être compactes et peu coûteuses à fabriquer. Elles peuvent être réalisées à partir de circuits métalliques flexibles découpés et pliés, ou encore de matériaux plastiques métallisés permettant de réduire davantage les dimensions de la surface rayonnante. De plus, l'ajout de fentes dans la plaque métallique permet de générer plusieurs fréquences de résonance. Enfin, le rayonnement de ces antennes est généralement omnidirectionnel dans l'espace.

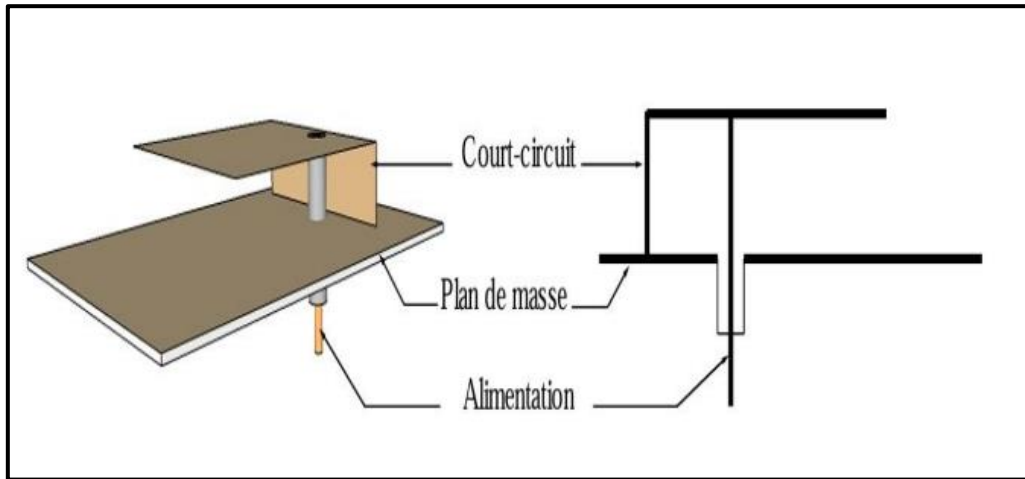


Figure II-17 : Structure de l'antenne PIFA [28]

Comparées aux antennes demi-onde, les antennes PIFA présentent également des dimensions plus réduites. En effet, l'ajout d'un court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse, placé le long de la zone où le champ électrique est nul, permet de diminuer la taille globale de l'antenne.

Comme illustré à la Figure, l'emplacement du court-circuit dans une PIFA correspond à une région où, pour une antenne demi-onde équivalente, le champ électrique atteint généralement sa valeur maximale. Ce principe conduit à l'annulation de certains modes de résonance : les modes supérieurs pairs sont supprimés puisque le champ électrique y est nul en ce point. Par conséquent, seuls les modes impairs, tels que le mode fondamental (1,0) et les harmoniques impaires (3,0, etc.), sont conservés.

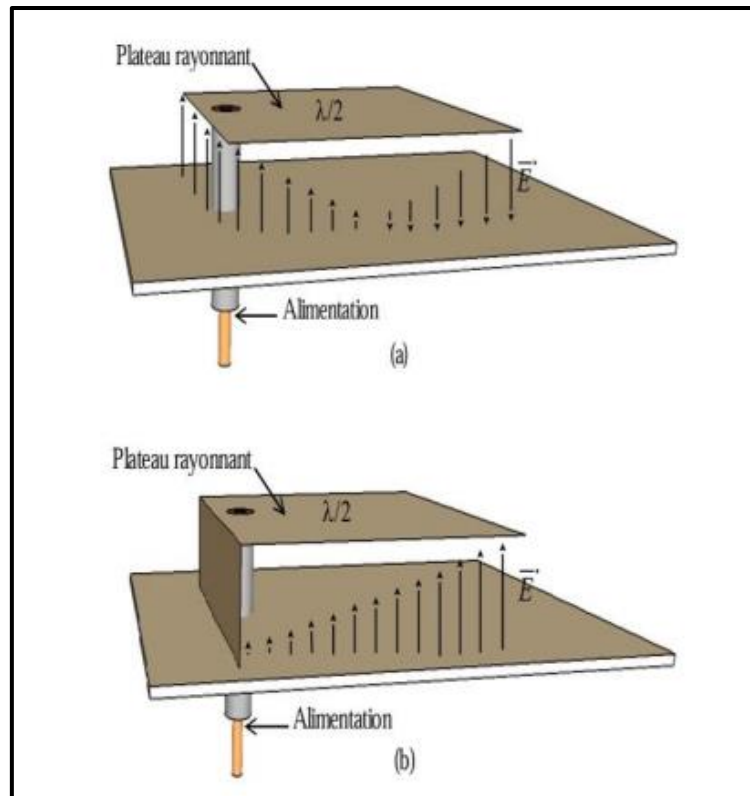


Figure II-18 : Représentation de champ « électrique du demi-onde, (b) quart-onde

Ainsi, afin de réduire les dimensions de l'antenne, différents types de courts-circuits peuvent être utilisés, notamment les courts-circuits verticaux, planaires [10, 11] ainsi que filaires [12]. Ces derniers sont généralement réalisés sous forme de languettes reliant l'élément rayonnant au plan de masse (Figure).

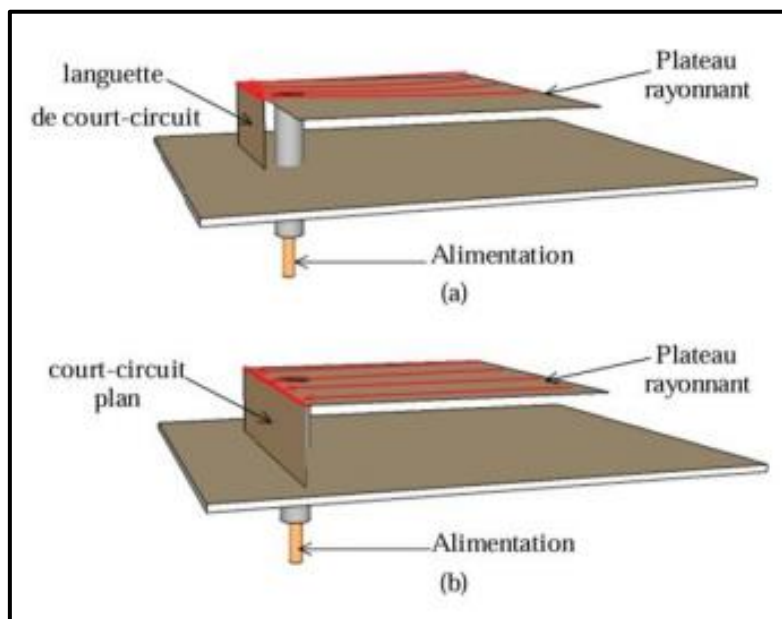


Figure II-19 : Antenne PIFA : (a) avec languette de court-circuit (b) avec court-circuit plan [29]

Lorsque le court-circuit est positionné au niveau du coin de la plaque rayonnante (a), le chemin suivi par les courants devient courbé et donc plus long que dans le cas d'un court-circuit planaire (b), où la trajectoire du courant reste plus directe et quasi linéaire. Cette différence de parcours entraîne une variation de la fréquence de résonance fondamentale entre les deux structures.

En effet, dans le cas d'un court-circuit de type languette, la longueur électrique effective augmente, ce qui conduit à une diminution de la fréquence de résonance, laquelle peut être exprimée par la relation suivante :

$$f_r = \frac{C}{4(L + W + H)}$$

Où :

- C : est la vitesse de la lumière
- L : la longueur du plateau rayonnant
- W : est la largeur du plateau rayonnant
- H : est la hauteur du plateau rayonnant

Avec un court-circuit plan nous avons :

$$f_r = \frac{C}{4(L + H)}$$

L'ajout d'un court-circuit introduit un effet inductif dont l'intensité dépend de ses dimensions. En augmentant la partie imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne et en supprimant certains modes de résonance de la cavité, cet effet influence directement les performances globales de l'antenne. La fréquence de résonance dépend ainsi du type de court-circuit employé, mais aussi de sa position par rapport au point d'alimentation [30]

Les antennes de type PIFA ou IFA, présentées précédemment, répondent efficacement aux contraintes de miniaturisation des systèmes de communication. Elles permettent en effet de réduire significativement les dimensions, parfois jusqu'à la moitié de la taille initiale, sans dégrader de manière excessive l'efficacité de rayonnement ni la largeur de bande. Ces caractéristiques expliquent leur large utilisation dans les dispositifs de communication modernes [31] [32]. Cependant, pour les applications nécessitant la couverture des basses fréquences, l'utilisation seule d'une PIFA ou d'une IFA ne suffit généralement pas.

II.6.1.2.4 Repliement des éléments :

Le repliement constitue également une technique permettant de modifier la géométrie initiale de l'antenne afin de réduire ses dimensions. L'objectif principal de cette approche est d'obtenir une structure plus compacte tout en conservant des performances acceptables. Les deux configurations sont illustrées à la Figure [33].

La première configuration (a) correspond à un chargement capacitif obtenu par l'ajout d'un élément vertical jouant le rôle de radiateur. La seconde configuration (b) repose sur un chargement capacitif associé au repliement des éléments rayonnants, ce qui permet une réduction encore plus importante de l'encombrement de l'antenne.

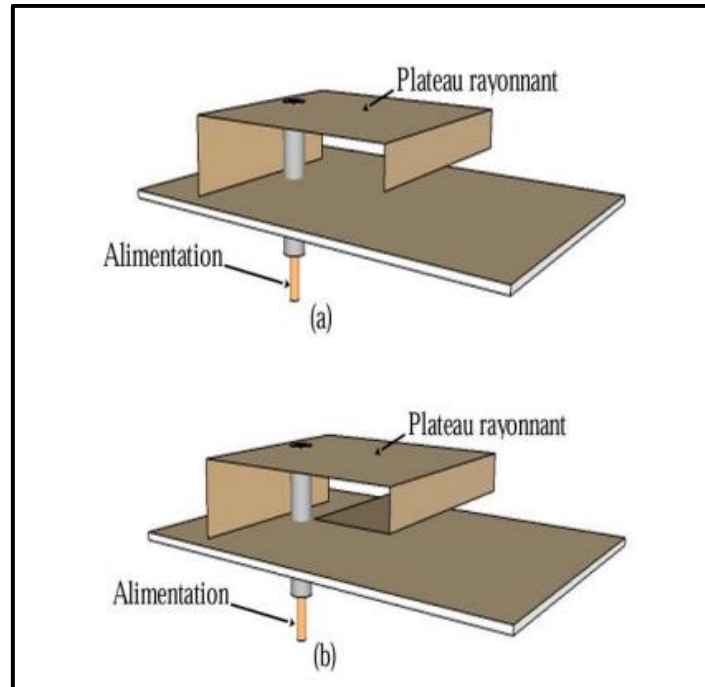


Figure II-20 : Chargement capacitif en bout de l'élément : (a) avec l'ajout d'un élément vertical, (b) par repliement de l'élément

Le principe de cette réduction repose sur la perturbation du trajet des courants, ce qui entraîne une diminution de la fréquence de résonance. Le repliement de la plaque rayonnante permet non seulement de réduire l'encombrement global de la structure, mais aussi d'introduire un effet capacitif supplémentaire. Cet effet contribue à l'abaissement de la fréquence de résonance.

Par ailleurs, cette composante capacitive peut être ajustée en modifiant certains paramètres géométriques de l'antenne, comme le montre l'équation suivante.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{h}$$

Où :

(ϵ_0) Représente la permittivité du vide ($8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$), ϵ_r la permittivité relative du matériau, S la surface des parties métalliques en regard et h la distance séparant les deux plans conducteurs. L'augmentation de la distance entre les plaques métalliques ou l'accroissement de la surface en regard conduit à une variation de la capacité équivalente, ce qui permet de diminuer la fréquence de résonance.

Cependant, l'augmentation de cette capacité équivalente peut entraîner une dégradation de la largeur de bande ainsi que de l'efficacité de l'antenne.

II.6.1.2.5 Ajout de fentes dans l'élément rayonnant :

Nous définissons une « fente » comme une interruption ouverte dans une surface métallique conductrice [34], qui oblige les courants de surface à contourner l'obstacle, augmentant ainsi leur trajet effectif. Par conséquent, l'introduction d'une fente, qu'elle soit débouchante ou non débouchante (Figure), permet de diminuer la fréquence de résonance à volume d'antenne constant.

L'intégration de fentes constitue ainsi une étape essentielle dans le processus de miniaturisation des structures d'antennes.

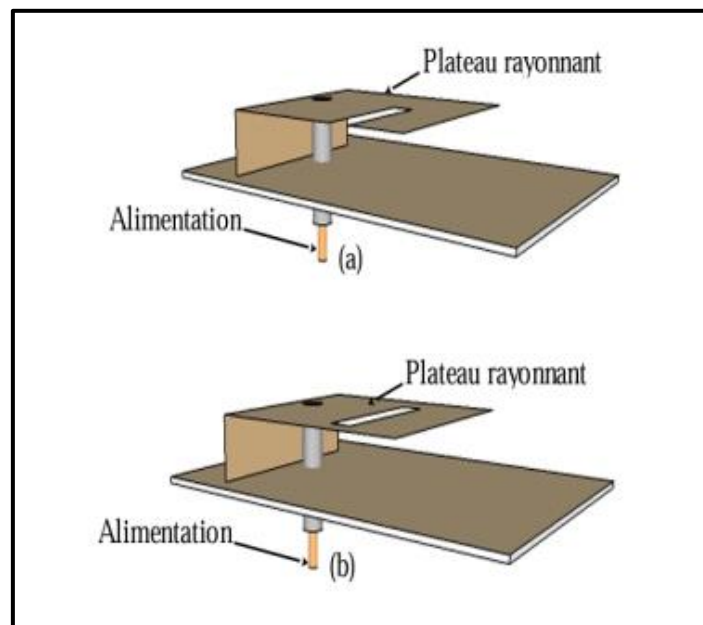


Figure II-21 : Antenne PIFA : (a) avec fente débouchante, (b) avec fente non débouchante [34]

Une autre approche consiste à intégrer plusieurs fentes débouchantes de part et d'autre de l'élément rayonnant. Celles-ci influencent la distribution du courant en l'étirant et en l'obligeant à contourner les ouvertures. La généralisation de ce principe à un ensemble de fentes doit cependant prendre en considération le fait que certaines antennes présentent déjà des structures à méandres latéraux [35].

En effet, le fait de « méandrer » un monopôle simple permet d'augmenter la longueur électrique sans modifier la longueur physique du conducteur. Ce procédé entraîne alors un déplacement des fréquences de résonance vers les basses fréquences. Par ailleurs, la réduction de la fréquence de résonance [36]

S'accompagne de l'apparition d'effets capacitifs localisés, répartis autour des fentes introduites dans la structure.

II.6.1.3 Les techniques l'élargissement de la bande :

Les antennes microruban, largement étudiées depuis plusieurs décennies, présentent de nombreux avantages tels qu'un faible poids, un encombrement réduit, une facilité de fabrication ainsi qu'une bonne capacité de conformabilité. Elles représentent ainsi une solution particulièrement intéressante pour la réalisation d'antennes à rayonnement unidirectionnel.

Cependant, leur principal inconvénient réside dans leur faible bande passante, généralement limitée à quelques pourcents. Afin de pallier cette limitation, de nombreux travaux de recherche ont été menés pour en améliorer les performances, notamment à travers différentes techniques d'élargissement de la bande passante, parmi lesquelles on peut citer :

II.6.1.3.1 Technique de la fente

Actuellement, la grande diversité des standards de communication sans fil, tels que le GSM, DCS, UMTS, WLAN, Bluetooth ou encore la télévision numérique, impose le développement d'antennes compactes, multifréquences et/ou à large bande. Ce besoin est particulièrement important afin d'assurer la compatibilité entre plusieurs normes et de permettre l'accès à différents services au sein d'un même dispositif. Cette contrainte a poussé les chercheurs à proposer de nouvelles structures d'antennes plus performantes.

Les modes de résonance supérieurs peuvent être atténués grâce à l'utilisation de structures de court-circuit ou de fentes rayonnantes. Une fente est définie comme une interruption ouverte pratiquée dans une surface métallique conductrice, provoquant un allongement du trajet du courant de surface autour de celle-ci. L'introduction de fentes dans l'élément rayonnant représente ainsi une méthode efficace de miniaturisation des antennes.

De plus, l'ajout de fentes peut engendrer de nouvelles fréquences de résonance lorsque le courant circule dans la structure rayonnante. La forme ainsi que la longueur des fentes jouent un rôle déterminant sur la fréquence de fonctionnement et l'impédance d'entrée de l'antenne [23].

II.6.1.3.2 Combinaison de plusieurs éléments rayonnants

L'association de deux ou plusieurs éléments rayonnants monopoles, identiques ou différents, constitue une technique classique permettant d'obtenir des antennes à large bande. L'alimentation de ces structures peut être réalisée soit directement par un port d'excitation, soit par couplage électromagnétique.

Chaque élément rayonnant génère ses propres fréquences de résonance fondamentales et harmoniques. Le choix de dimensions proches entre les différents résonateurs permet d'élargir la bande passante globale de l'antenne.

Dans le cas des antennes imprimées, cette association peut être réalisée soit par juxtaposition des éléments dans un même plan, soit par empilement vertical des structures [23].

II.6.1.4 Les techniques fractales :

La Technologie fractale est bien connue que le périmètre de l'antenne est le facteur décisif pour déterminer la fréquence de résonance, et l'une des solutions pour augmenter le périmètre de la surface est d'utiliser des fractales, de sorte que les antennes aux formes fractales peuvent atteindre un fonctionnement à large bande. Parmi les fractales les plus couramment utilisées figurent celles de Von Kock, Hilbert et Sierpinsky [20]

II.6.2 Multibande :

Ce sont des antennes très spéciales qui permettent avec une forme fractale d'aboutir à un fonctionnement Multibande. Les fractales sont des solutions efficaces pour augmenter le périmètre d'une surface. Il est évident que le périmètre d'une antenne est un facteur crucial dans la détermination de la fréquence de résonance. Une antenne fractale avec un donné couvre une surface inférieure à celle d'une antenne comparable carrée. [21]

II.6.3 Large bande

II.6.3.1 Définition de la large bande :

Une antenne est dite large bande lorsque sa largeur de bande relative dépasse généralement 10% à 20% de la fréquence centrale, tout en maintenant une adaptation correcte ($S_{11} \leq -10\text{dB}$).

Selon la littérature, le concept de large bande est fortement lié à la capacité de l'antenne à maintenir des performances stables sur une large plage fréquentielle.

II.6.3.2 Pourquoi on utilise une large bande ?

On recourt aux antennes à large bande afin de couvrir un spectre de fréquences étendu et répondre à plusieurs exigences des systèmes de communication modernes. Cette approche permet notamment :

- D'assurer des débits de transmission élevés
- De supporter plusieurs normes de communication au sein d'un même dispositif
- De réduire la sensibilité aux évanouissements liés à la propagation par trajets multiples
- D'améliorer la robustesse face aux interférences et aux brouillages
- De renforcer la sécurité et la fiabilité des communications
- De fonctionner avec une faible puissance d'émission
- D'améliorer les capacités de pénétration du signal dans différents milieux
- Et d'augmenter la capacité globale du canal de transmission.

II.7 Antenne patch fractale de type Sierpinski Carpet

L'antenne fractale de type Sierpinski Carpet a été proposée pour la première fois par le mathématicien Waclaw Sierpinski en 1916. Cette structure fractale est obtenue en divisant une surface carrée ou rectangulaire en neuf parties identiques organisées sous forme d'une grille 3×3 . Ensuite, le carré central est supprimé afin d'obtenir la première itération.

Le même procédé est répété sur les parties restantes afin d'obtenir les itérations suivantes. À chaque nouvelle itération, la géométrie devient plus complexe et la surface conductrice diminue progressivement.

Cette géométrie fractale permet d'augmenter la longueur du courant électrique sur la surface du patch, ce qui améliore les performances de l'antenne tout en réduisant sa taille. L'antenne Sierpinski Carpet est particulièrement connue pour ses propriétés Multibandes et sa capacité à fonctionner sur plusieurs fréquences de résonance. [19]

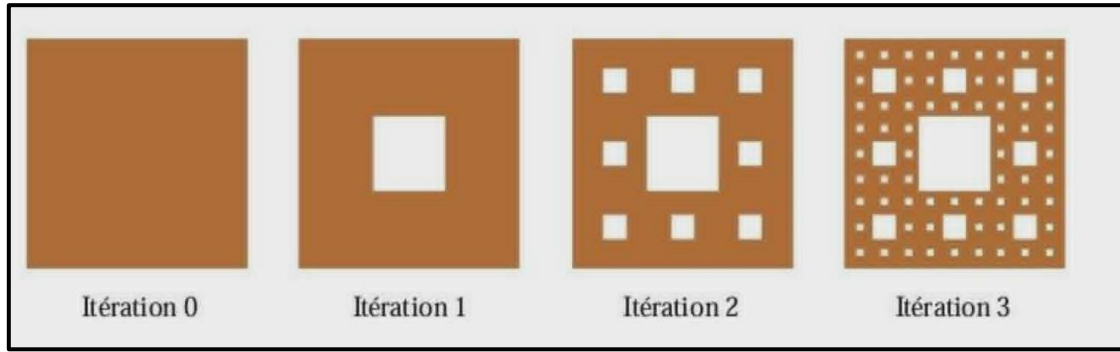


Figure II-22 : nombre d'itération tapis de Sierpinsky

II.7.1 Itération zéro de l'antenne tapis de Sierpiński

Une antenne patch microruban simple MPA est connue comme l'itération zéro de l'antenne patch fractale. Les paramètres de conception tels que la largeur (W), la longueur effective (L_{eff}), la permittivité effective (ϵ_{eff}) et la hauteur (h) du substrat peuvent être déterminés à l'aide des Équations 1 à 5, respectivement, pour une fréquence de résonance (f_r)¹⁸:

$$L_{eff} = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2}$$

$$\Delta L = h \times 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L$$

II.7.2 Première et deuxième itérations de l'antenne tapis de Sierpinski

Pour la première itération, une portion rectangulaire est retirée du centre du patch en divisant le patch d'ordre zéro en neuf portions égales, comme illustré à la Figure 1B. La longueur et la largeur des portions rectangulaires sont calculées comme indiqué ci-dessous.

Pour la deuxième itération, le même processus de troncature est répété pour chacune des huit sous-portions restantes ; autrement dit, chacune des huit sous-portions est à nouveau divisée en neuf sous-portions et la portion centrale est supprimée. La Figure 1C montre le tapis après la troncature de la deuxième itération.

Les dimensions des subdivisions (petites cases) sont définies selon le facteur de longueur (L_n) et le facteur de surface (A_n) pour la n-ième itération.

Dans la Figure, soit N_n le nombre de portions rectangulaires restantes après la troncature pour la n-ième itération, L_n le facteur d'échelle pour la longueur du côté des cases blanches, et A_n le facteur d'échelle de la surface fractionnaire des N_n sous-portions après la n-ième itération. Ainsi :

$$\begin{aligned} N_n &= 8^n \\ L_n &= \left(\frac{1}{3}\right)^n \\ A_n &= L_n^2 N_n \end{aligned}$$

II.8 Travaux de recherche existants (état de l'art)

Les antennes fractales ont suscité un intérêt important dans le domaine des systèmes de communication sans fil grâce à leurs propriétés de miniaturisation et de fonctionnement multibande. Parmi les structures les plus étudiées, la géométrie de type Sierpinski Carpet a été largement adoptée dans la conception des antennes microruban en raison de sa capacité à générer plusieurs fréquences de résonance tout en conservant une structure compacte.

Dans les travaux de Jena et al. (DOAJ), une antenne Sierpinski Carpet réalisée sur substrat FR4 avec un faible nombre d'itérations (2 à 3 itérations) a permis d'obtenir un fonctionnement multibande autour de 2.4 GHz avec un gain d'environ 6 dBi. Cette étude met en évidence l'influence directe du nombre d'itérations sur la complexité du rayonnement et les performances globales de l'antenne.

Par ailleurs, une étude publiée sur Science Direct (2023) a proposé une antenne Sierpinski Carpet intégrant une structure DGS (Defected Ground Structure) pour une application à 2.45 GHz. Les résultats montrent une amélioration significative des performances, notamment une augmentation du gain d'environ 13 %, une amélioration du comportement du coefficient de réflexion S_{11} ainsi qu'une meilleure adaptation d'impédance. Cette approche confirme l'efficacité de l'association entre géométrie fractale et techniques d'optimisation du plan de masse.

D'autres travaux académiques basés sur des structures fractales similaires ont démontré que l'augmentation du nombre d'itérations (jusqu'à 3 ou 4) permet d'élargir le nombre de bandes de résonance, généralement situées entre 1.8 GHz et 10 GHz, avec des gains variants entre 4 dBi et 7 dBi selon la configuration géométrique et le substrat utilisé. Cependant, ces études montrent également qu'un nombre élevé d'itérations peut parfois entraîner une dégradation de la stabilité du rayonnement.

Enfin, des recherches plus récentes sur des structures hybrides combinant Sierpinski et d'autres géométries fractales (comme Koch) ont montré une amélioration supplémentaire des performances, avec des gains pouvant atteindre environ 8 dBi et une meilleure couverture multibande adaptée aux applications Wi-Fi, WiMax et 5G.

En conclusion, la littérature existante confirme que les antennes Sierpinski Carpet offrent un bon compromis entre miniaturisation, fonctionnement multibande et performance de rayonnement. Toutefois, leurs performances restent fortement dépendantes du nombre d'itérations et des techniques d'optimisation utilisées, ce qui justifie l'intérêt des travaux d'amélioration proposés dans ce mémoire.

II.9 Conclusion :

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les simuler ou les réaliser. Alors, pour assurer un bon fonctionnement il faut choisir celle la plus adaptée à l'application envisagée. Dans notre cas, le choix s'est porté sur la technologie des antennes imprimées. Leurs avantages nombreux permettent de les utiliser dans différents secteurs et surtout dans les communications mobiles (satellite, avion, voiture, missile, téléphone portable...). Les techniques utilisées pour réaliser un comportement Multibande sont très variées et basées sur les antennes fractales. Ces antennes présentent une spécificité géométrique qui leur confère la possibilité de résonner sur plusieurs fréquences en gardant éventuellement les mêmes caractéristiques électromagnétiques [8]

Chapitre 3 : Simulation, d'une **antenne Sierpinski Carpet**

III. Chapitre 3 : Simulation, d'une antenne Sierpinski Carpet

III.1 Introduction :

Ces dernières années, les antennes Multibande ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. En effet, l'utilisation de dispositifs Multibande permet de fonctionner sur plusieurs fréquences tout en assurant une bonne qualité de transmission et une meilleure flexibilité dans les systèmes de communication modernes. Par ailleurs, les antennes Multibandes permettent de réduire l'encombrement puisqu'une seule antenne peut remplacer plusieurs antennes fonctionnant sur différentes bandes de fréquences. Ce chapitre présente la démarche de conception, de simulation ainsi que les résultats obtenus d'une antenne fractale Multibande couvrant la plage de fréquences allant de 2.4 GHz à 5.5 GHz en utilisant le logiciel ANSYS HFSS.

Nous avons commencé par la conception et la simulation d'une antenne patch rectangulaire, puis nous avons introduit des modifications géométriques ainsi que des fentes afin d'améliorer l'adaptation d'impédance et d'obtenir plusieurs fréquences de résonance. Notre contribution consiste à transformer l'antenne initiale en une antenne fractale Multibande capable de fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences, ce qui la rend plus intéressante pour les applications de télécommunications sans fil modernes.

III.2 Présentation du logiciel

III.2.1 DEFINITION HFSS :

Le HFSS est un logiciel commercial et un outil de simulation électromagnétique 3D basée sur la méthode des éléments finis (FEM), plusieurs paramètres peuvent être calculés par ce logiciel tels que Paramètres S, fréquence de résonance, et des champs électriques et magnétiques...et où les solutions des problèmes électromagnétiques 3D sont obtenues rapidement et avec précision. Des éléments volumiques tétraédriques sont utilisés pour mailler la structure, De surcroît, il est adapté à des structures homogènes aussi bien qu'hétérogènes [7].

III.2.2 DESCRIPTION GENERALE DES OUTILS HFSS :

La fenêtre de HFSS a plusieurs panneaux facultatifs :

- **Le Project Manager** : contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Le Message Manager** : permet d'afficher toutes les erreurs avant de commencer la simulation.
- **La fenêtre de Propriétés** : pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle.
- **La fenêtre de Progress** : affiche les progressions de la solution.
- **La fenêtre de 3D Modeler** : contient le modèle et son arbre pour la conception [7]

Chapitre 3 Simulation, d'une antenne Sierpinski Carpet

- Méthode de simulation électromagnétique

La figure suivante présente l'interface principale du logiciel HFSS

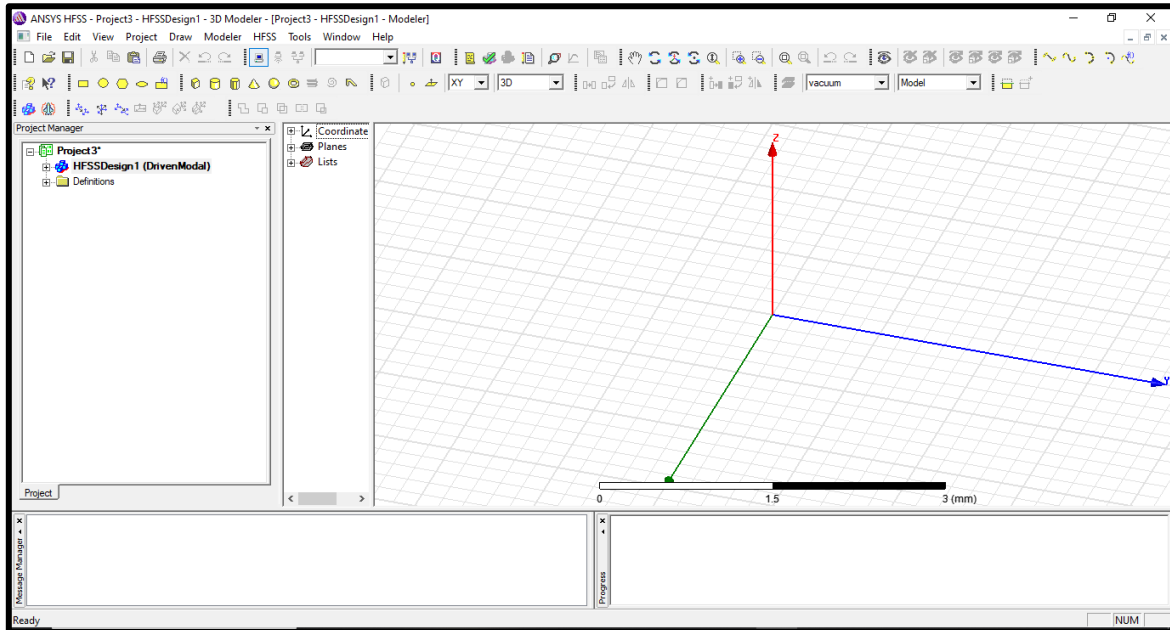


Figure III-1 : page d'accueil du logiciel HFSS

- Fenêtre des propriétés du logiciel HFSS :

Cette fenêtre est utilisée pour attribuer et modifier les propriétés de l'objet, notamment son nom, son matériau, sa couleur et ses autres caractéristiques.

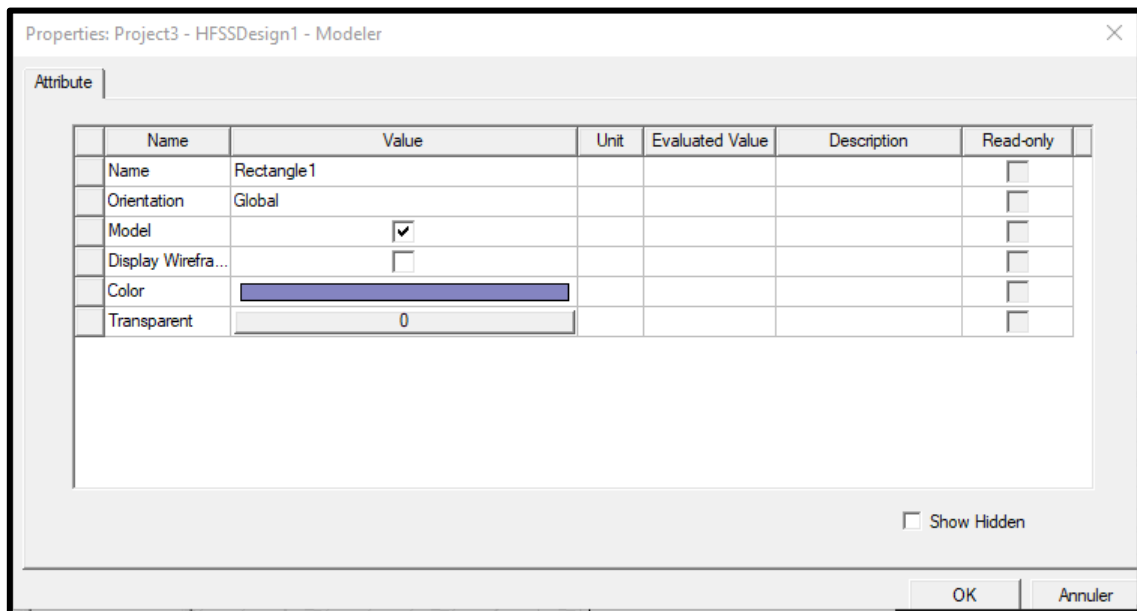


Figure III-2 : fenêtre des propriétés

- **Commande :**

Elle permet de visualiser et modifier la position du modèle ainsi que ses dimensions, telles que la hauteur et la largeur, à n'importe quelle étape du travail

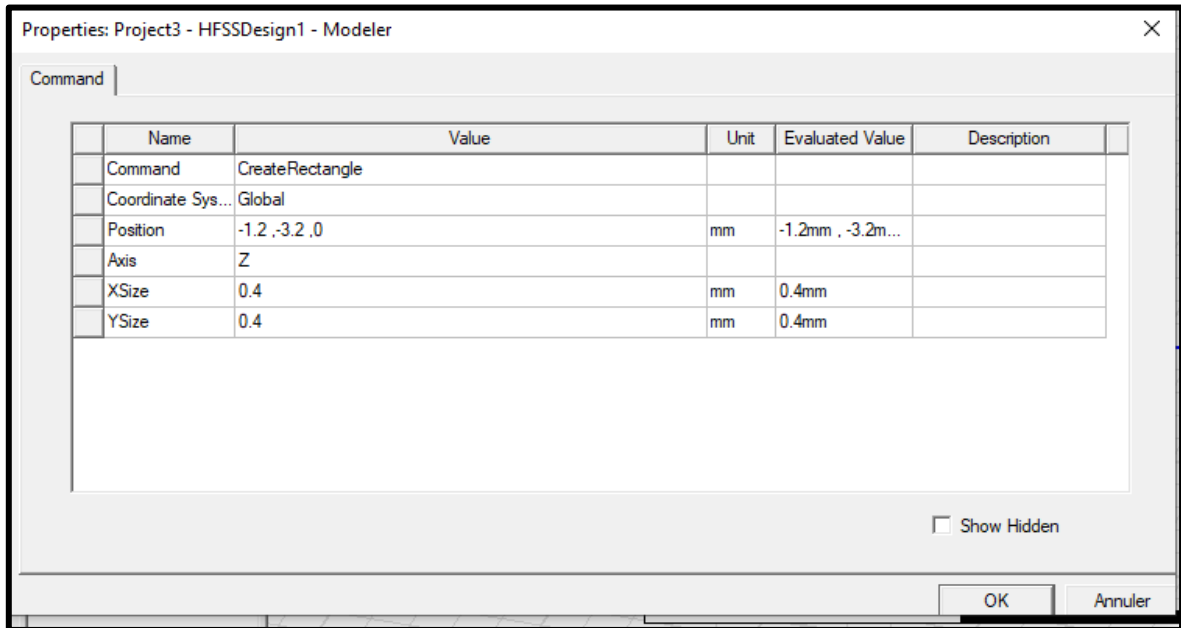


Figure III-3 : fenêtre es paramètre de projet

- **Gestionnaire de projet Arborescen (manager des projets) :**

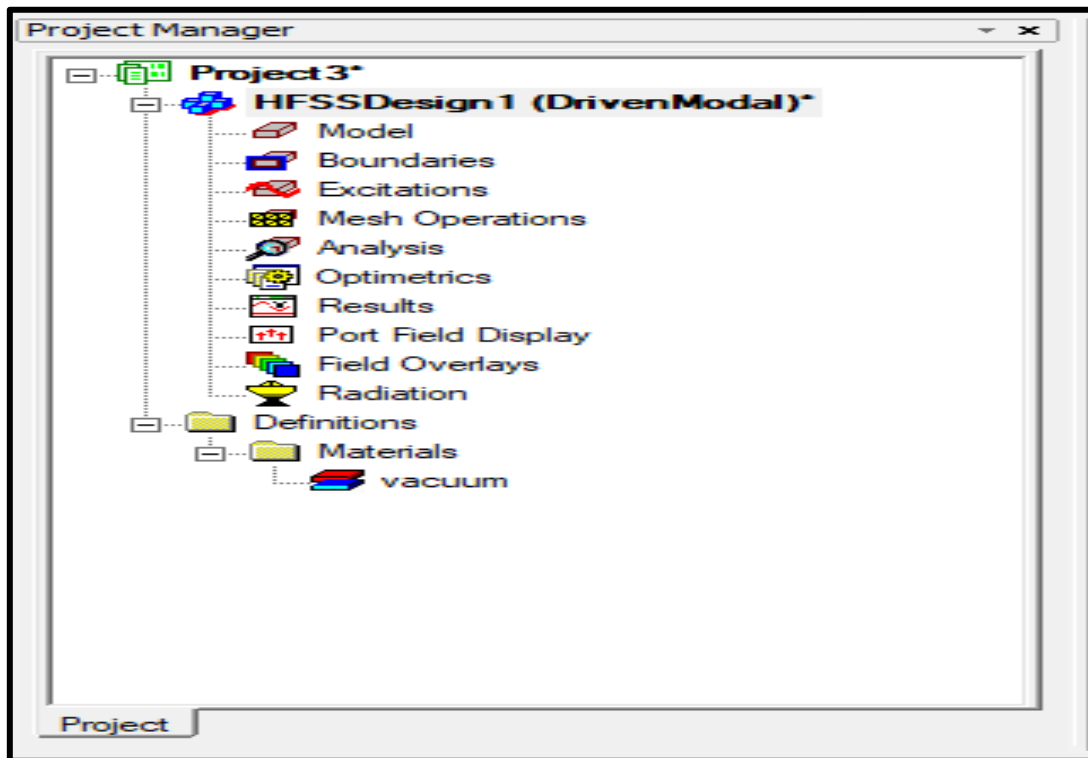


Figure III-4 : fenêtre manager de projet

- **DRAW :**

Regroupe tous les modèles, rectangle, ellipse, cercle, boîte....

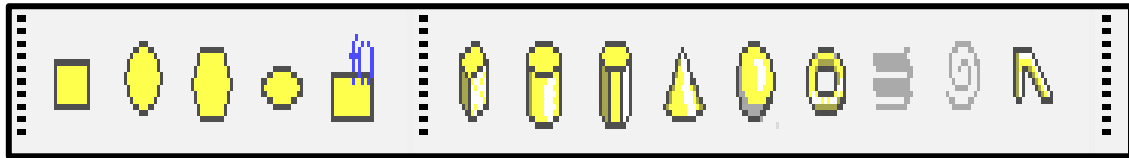


Figure III-5 : les modèles de DRAW

- **Modeler /3D modeler :**

Il contient les éléments suivants : Booléen (fusionner deux objets), unité à utiliser (mm, cm, km...),

- **Mesure** (mesurer les distances),
- **Mode analysis** (analyse les propriétés et les performances des objets, des surface)
- **Coordinate system** : nous permet de changer le système de coordonnées
- **Units** : choisir l'unité de mesure (mm, cm...)

Validation :

Si la compilation du projet s'effectue correctement, la fenêtre présentée ci-dessus apparaît, indiquant le bon déroulement de l'opération :

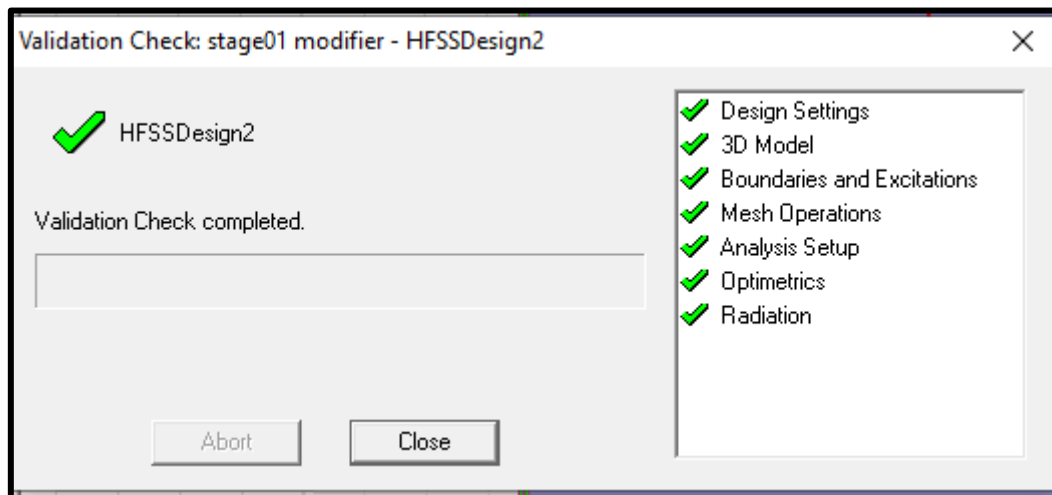


Figure III-6 : validation du modèle

- **Excitations :**

Avant d'exécuter la simulation, il est nécessaire de spécifier l'excitation de la structure, car celle-ci représente une condition indispensable dans les logiciels de simulation électromagnétique

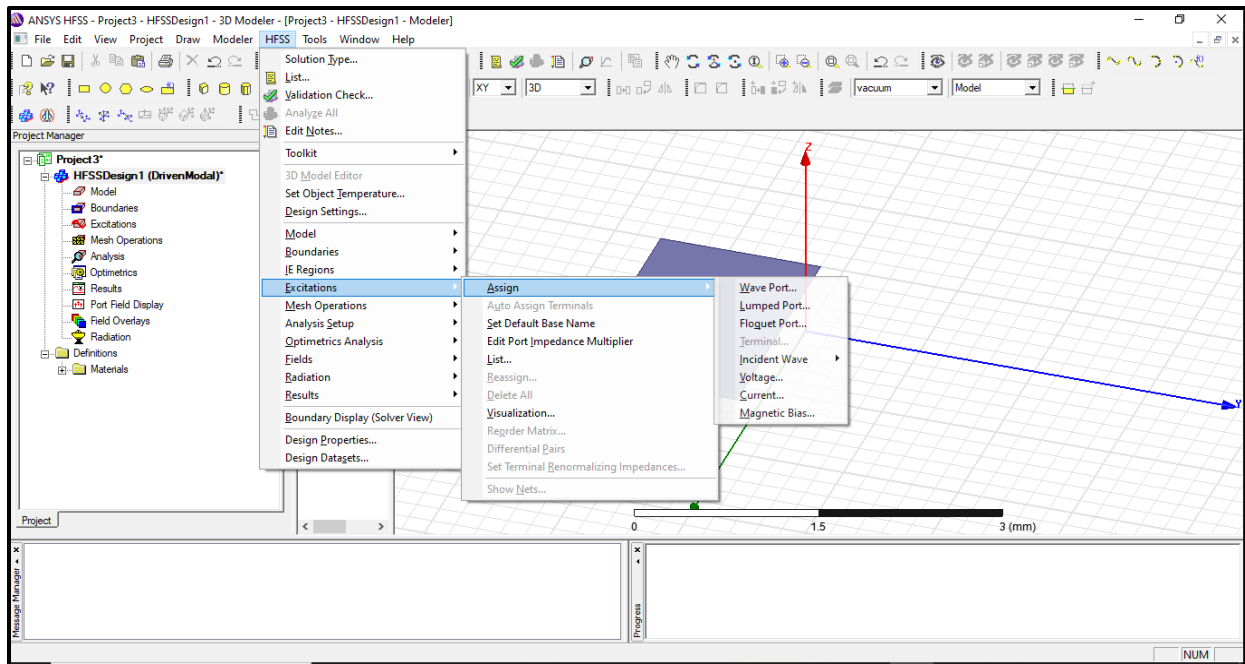


Figure III-7 : types d'excitation

➤ Visualisation des résultats

Après avoir défini le modèle, l'excitation et la plage de fréquence, la simulation est lancée. Les résultats sont ensuite visualisés à partir de menu « Results », ou il est possible d'afficher différents paramètres tels que le coefficient de réflexion (S_{11}), le gain et le diagramme de rayonnement.

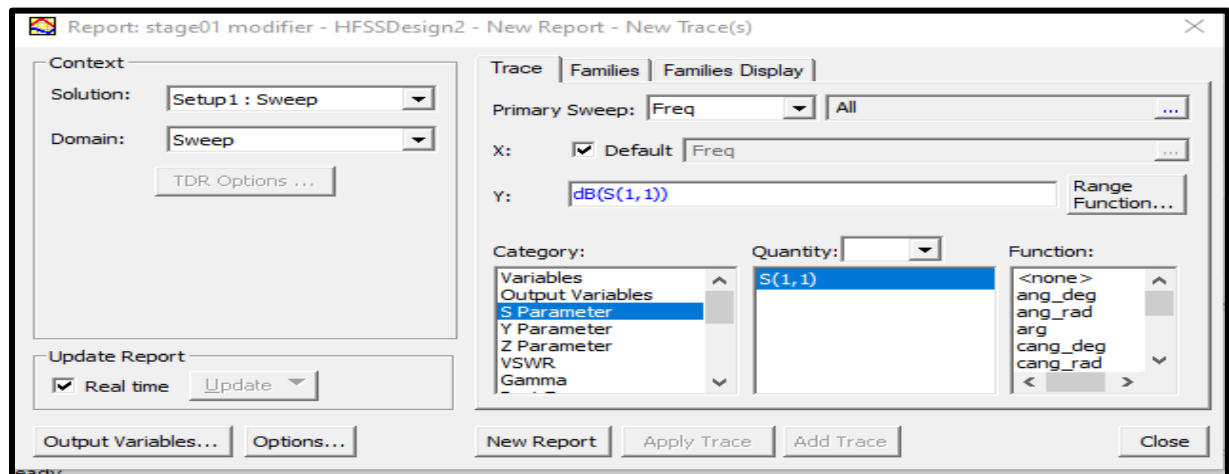


Figure III-8 : modifier le balayage de projet

➤ Create Modal Solution Data Reports:

Cette icône nous permet d'afficher et visualiser des paramètres de l'antenne 2D ou 3D (S,Y, TOS, Gamma...). Prenons l'exemple de Rectangular plot : choisissons le paramètre (S_{11} par exemple) et son unité (dB, re ; im, ang...) et cliquer sur NEW Report

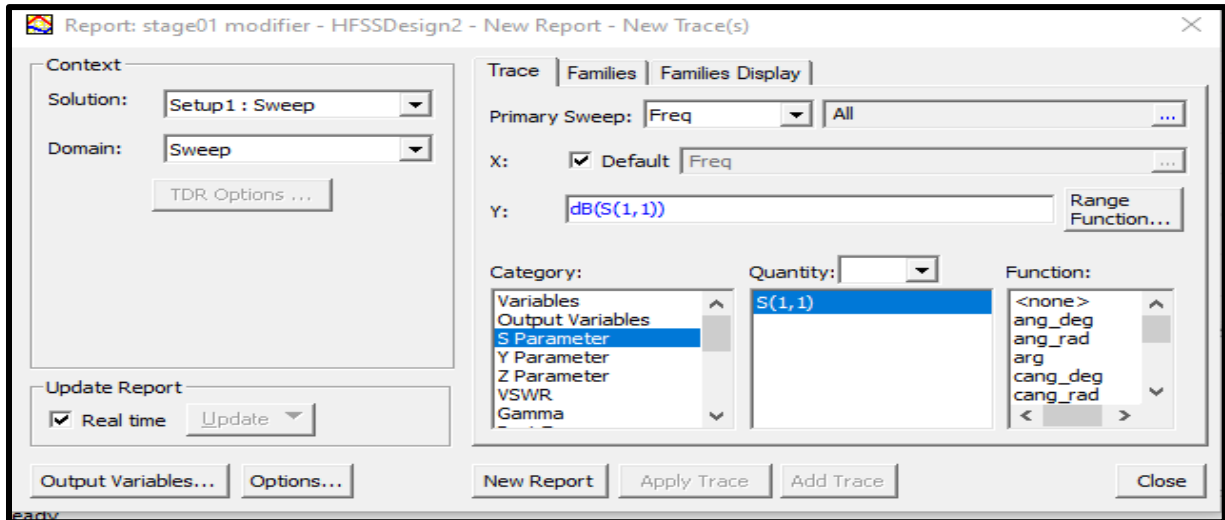


Figure III-9 : les paramètre S de l'antenne.

➤ Diagramme de rayonnement :

Pour visualiser le diagramme de rayonnement sous le logiciel HFSS on fait :

HFSS→Radiation→Insert Far field setup→Infinite sphere

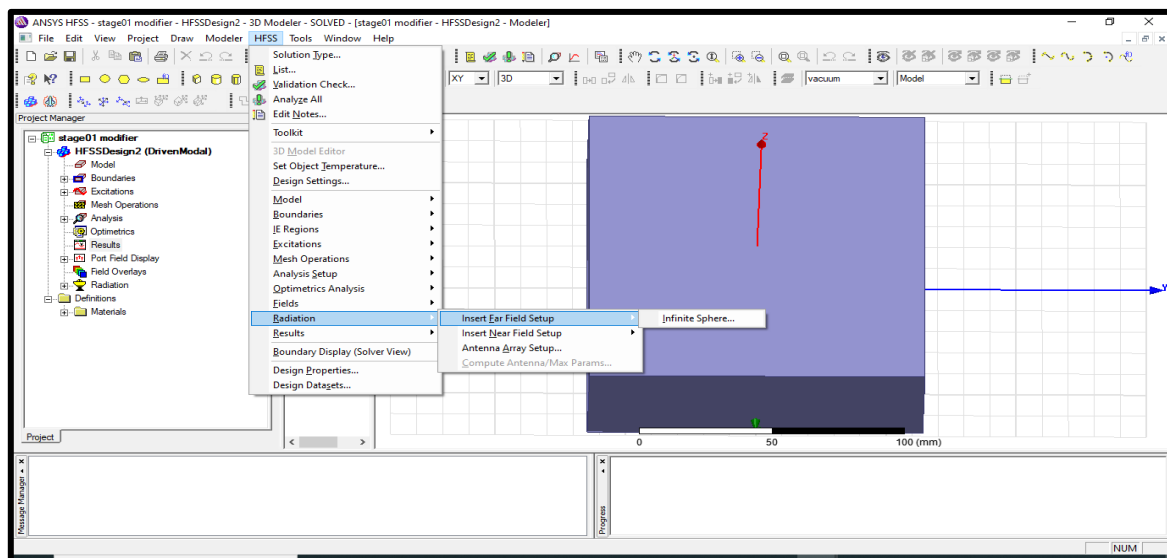


Figure III-10 : visualiser de diagramme de rayonnement

III.3 Antenne patch rectangulaire avec ligne simple :

III.3.1 Géométrie de base :

L'antenne proposée est une antenne patch, alimentée et adaptée par une ligne microruban (50 Ω) simple, avec un substrat de type FR4 (Verres epoxy) d'une permittivité relative $\epsilon_r=4.7$ et d'une épaisseur $h=0.8\text{mm}$. Cette antenne couvre une bande de fréquences s'étendant de 2.4GHz à 5.5GHz. Les paramètres géométriques de l'antenne rectangulaire sont représentés dans la figure (3.1)

Les paramètres de calcul de cette antenne sont donnés sur le tableau :

Paramètre d'antenne	Équation
Largeur efficace de l'antenne W	$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{u_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
Constante diélectrique ϵ_{eff}	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left 1 + 12 \frac{h}{W} \right ^{-\frac{1}{2}}$
L'extension de la longueur (ΔL)	$= 0.412 \frac{(\epsilon_{r eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{r eff} + 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$
Longueur réel (L)	$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{r eff} u_0 \epsilon_0}}$
La longueur effective	$L_{eff} = \lambda_{eff} / 2$
Largeur du substrat et plan de masse S_x	$S_x = W_p + 2L_f$
Longueur du substrat et plan de masse S_y	$S_y = L_p + 2L_f$
La largeur de patch	$W_p = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$

Tableau III-1 : paramètre de l'antenne patch

Tel que :

ϵ_r : *permittivité relative*.

h : *L'épaisseur du substrat*.

f_r : *fréquence de résonance*.

Les dimensions de la ligne simple étant données par les relations suivantes :

$$L_1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{r eff}}}$$

Tel que : $\lambda_0 = \frac{c}{f}$

C : la vitesse de la lumière.

F : fréquence du travail de l'antenne.

Le tableau montre les valeurs des paramètres d'antenne initiale proposée calculés à partir des équations du tableau

Wp	Lp	Sx	Sy	Wf	Lf
26.71mm	31.8mm	61.11mm	62.2mm	1.5mm	7.2mm

Tableau III-2 : dimension (mm) de l'antenne patch initiale proposée.

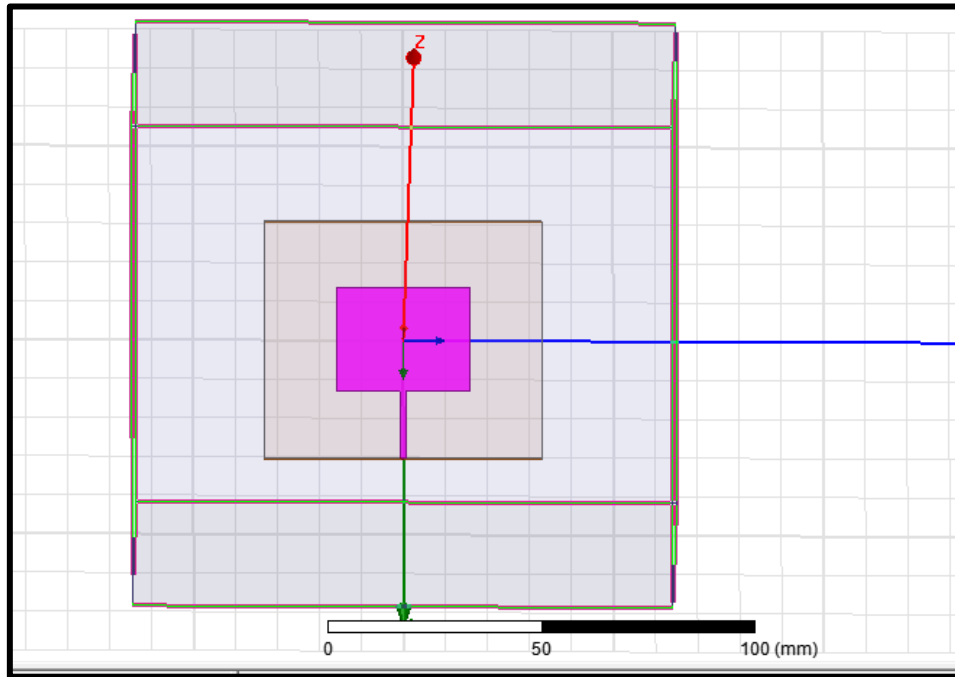


Figure III-11 : antenne patch initiale désigné sur HFSS

III.3.2 Résultat de simulation :

- **Le coefficient de réflexion S_{11} :**
- Nous allons représenter le coefficient de réflexion S_{11} figure. Ce paramètre permet de visualiser le niveau de l'adaptation de la bande passante à la fréquence de résonance de cette antenne initiale proposée.

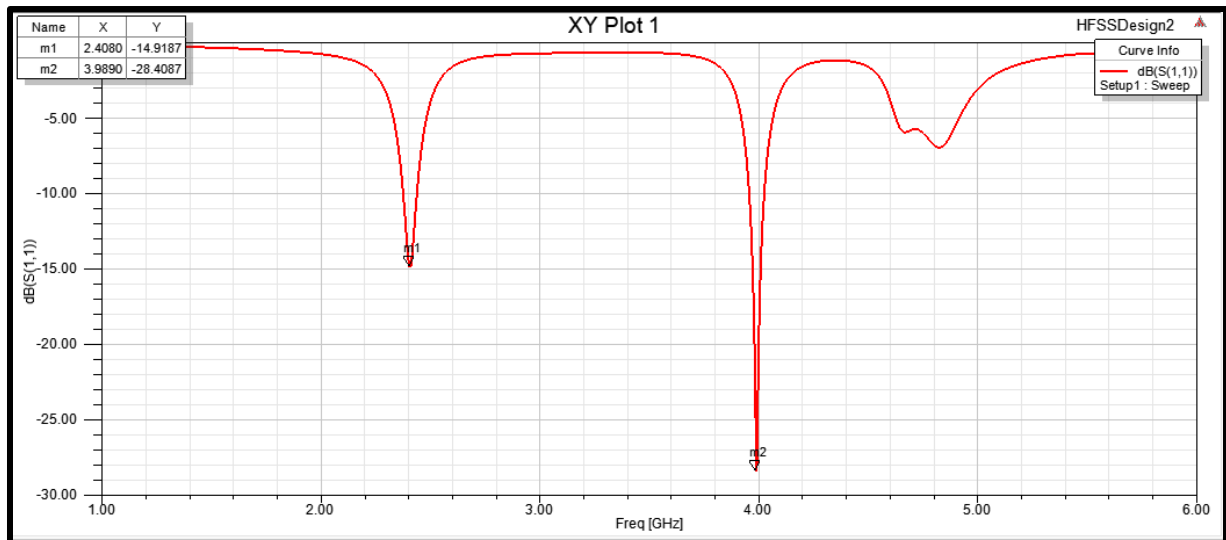


Figure III-12 : coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne initiale proposé

Le VSWR :

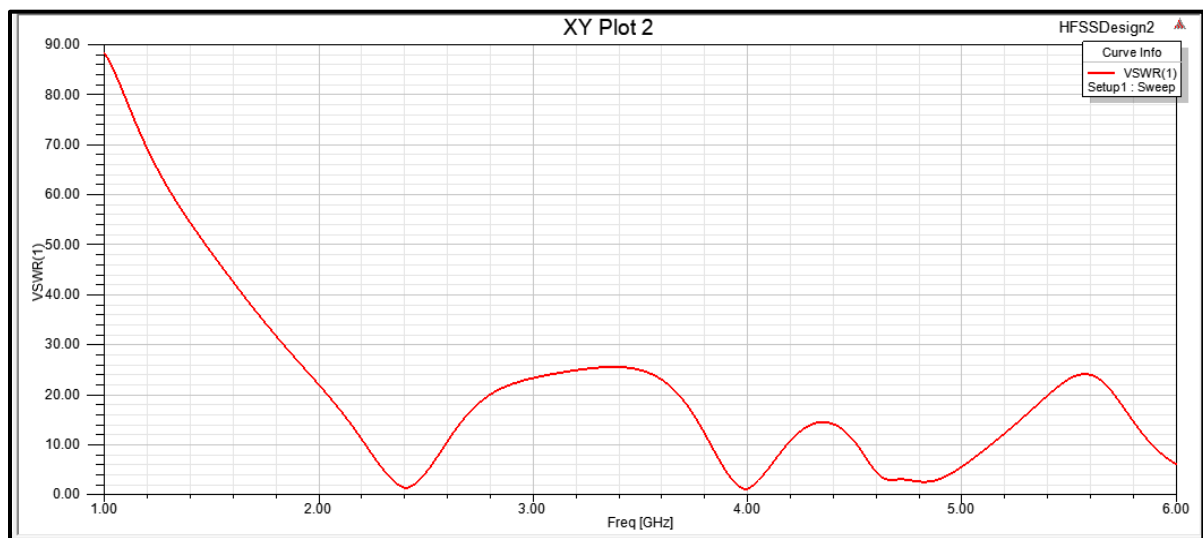


Figure III-13 : rapport d'onde stationnaire

Le graphe du VSWR de l'antenne proposée initiale montre plusieurs fréquences de résonance. On remarque qu'autour de 2.4GHz, la valeurs idéale ($VSWR \leq 2$), ce qui indique que l'adaptation d'impédance n'est pas encore optimale à cette fréquence.

Ces résultats montrent que la structure initiale nécessite une optimisation des dimensions et des paramètres de l'antenne afin d'améliorer ses performances autour de 2.4GHz.

III.4 Technique d'adaptation :

III.4.1 Adaptation de l'antenne avec une fente (slot) :

Afin d'améliorer l'adaptation de l'impédance d'entrée de l'antenne patch initiale avec la ligne d'alimentation d'impédance 50Ω , la technique d'insertion d'une fente rectangulaire

(Rectangular Slot) dans le Patch au niveau de sa jonction avec la ligne d'alimentation a été adoptée. Cette technique consiste à supprimer une portion rectangulaire du Patch avec des dimensions bien définies, où la longueur de la fente est $cut = 13.5 \text{ mm}$ et sa largeur est $wic = 9.6 \text{ mm}$.

L'insertion de cette fente modifie la distribution des courants de surface sur le Patch, permettant ainsi d'ajuster l'impédance d'entrée vers la valeur optimale 50Ω et d'améliorer le coefficient de réflexion S_{11} au-delà du seuil de référence -10 dB à la fréquence cible de 2.4 GHz . Ces dimensions ont été déterminées par simulation sous HFSS en sélectionnant les valeurs offrant la meilleure adaptation possible. (**$Wic=13.5\text{mm}$, $cut=9.6\text{mm}$**)

(Nous avons modifié les noms des dimensions du patch par d'autres appellations afin que les changements n'affectent que le patch et non la structure complète). P_x largeur de patch P_y la longueur de patch.

- **Le coefficient de réflexion :**

Les dimensions de l'antenne sont données sur le tableau et sur la figure :

P_x	P_y	S_x	S_y	L_f	W_f
26.71mm	31.8mm	61.11mm	66.2mm	17.2mm	0.4mm

Tableau III-3 : les dimensions de l'antenne patch avec la fente

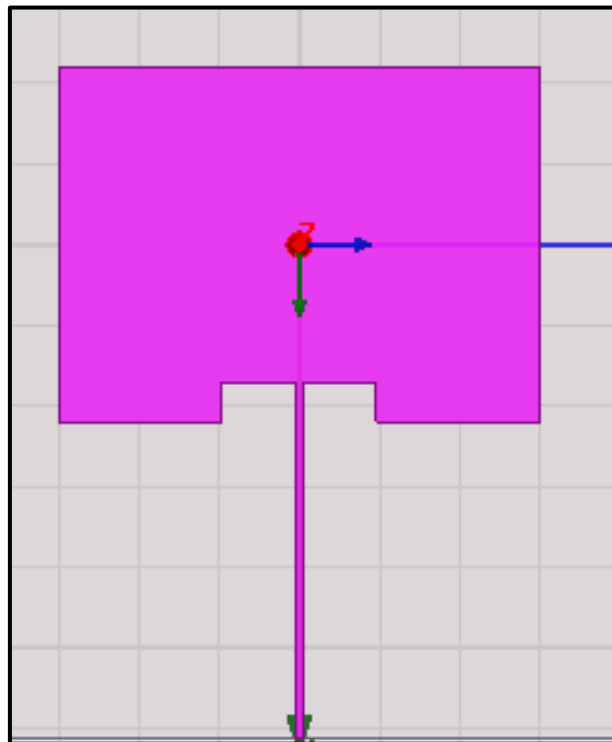


Figure III-14 : antenne adaptée avec le slot

Les résultats du coefficient de réflexion obtenues avec le logiciel HFSS sont présentés dans la figure :

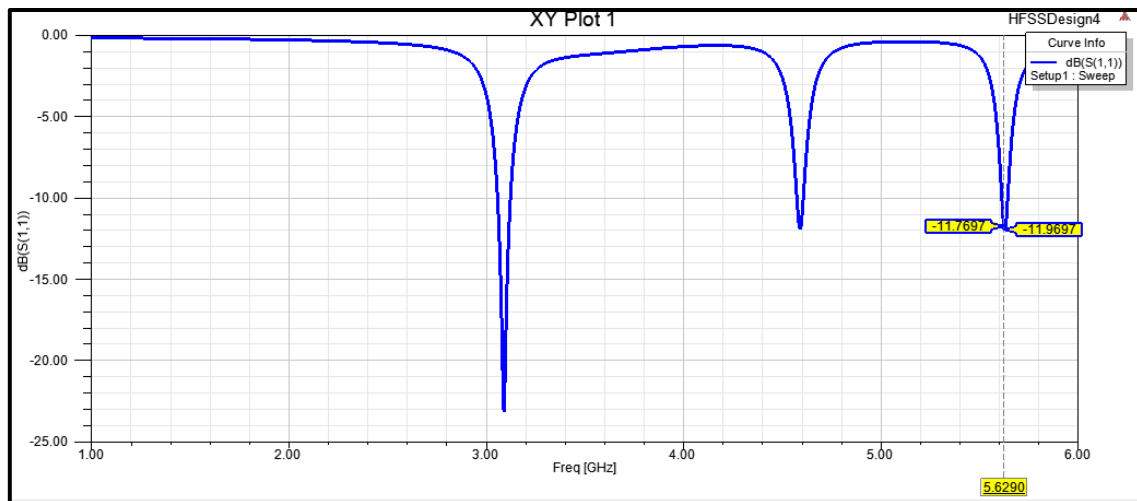


Figure III-15 : paramètre S_{11} avec le slot.

La figure présente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne proposée en fonction de la fréquence. On observe trois fréquences de résonance situées approximativement à 3,1 GHz, 4,6 GHz et 5,6 GHz. Les valeurs de S_{11} à ces fréquences sont inférieures à -10 dB, ce qui indique une bonne adaptation d'impédance et une faible puissance réfléchie.

Ces résultats montrent que l'antenne possède un comportement multibande et qu'elle peut fonctionner efficacement dans plusieurs bandes de fréquences. La meilleure adaptation est obtenue autour de 3,1 GHz, où le minimum de S_{11} atteint environ -24 dB

- **Le VSWR :**

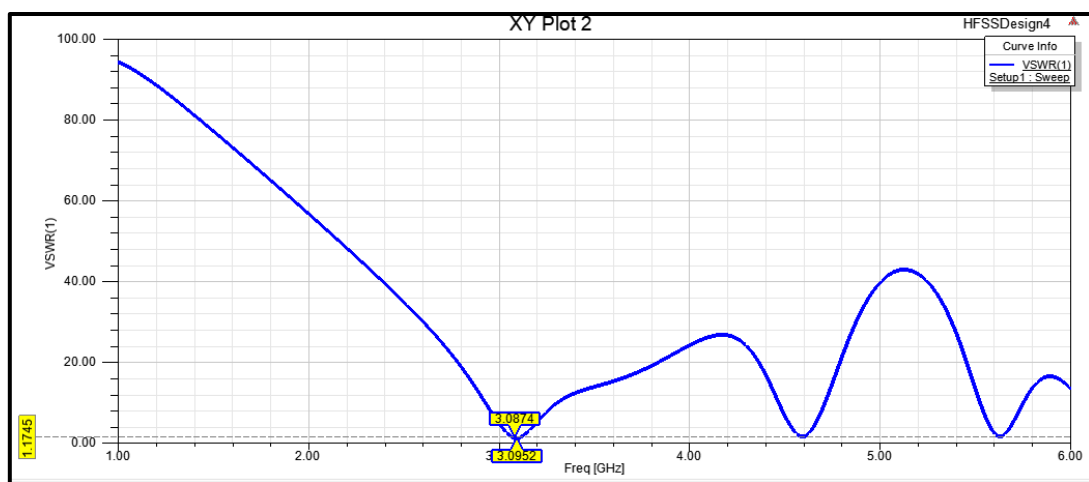


Figure III-16 : de vswr d'antenne avec slot

La courbe du VSWR de l'antenne à fente rectangulaire (Rectangular Slot) montre une excellente adaptation d'impédance au voisinage de **3,0952 GHz**, où la valeur minimale du VSWR atteint **1,0874**. Cette valeur, très proche de l'unité, indique une faible puissance réfléchie et un transfert efficace de l'énergie vers l'antenne.

On observe également que le VSWR reste inférieur à 2 dans une bande étroite autour de cette fréquence, confirmant ainsi un bon fonctionnement de l'antenne dans cette région. En

revanche, le VSWR augmente considérablement en dehors de cette bande, traduisant une dégradation de l'adaptation. Ces résultats montrent que l'intégration de la fente rectangulaire a permis d'améliorer significativement l'adaptation de l'antenne et de définir clairement sa fréquence de résonance.

- **Le diagramme de rayonnement :**

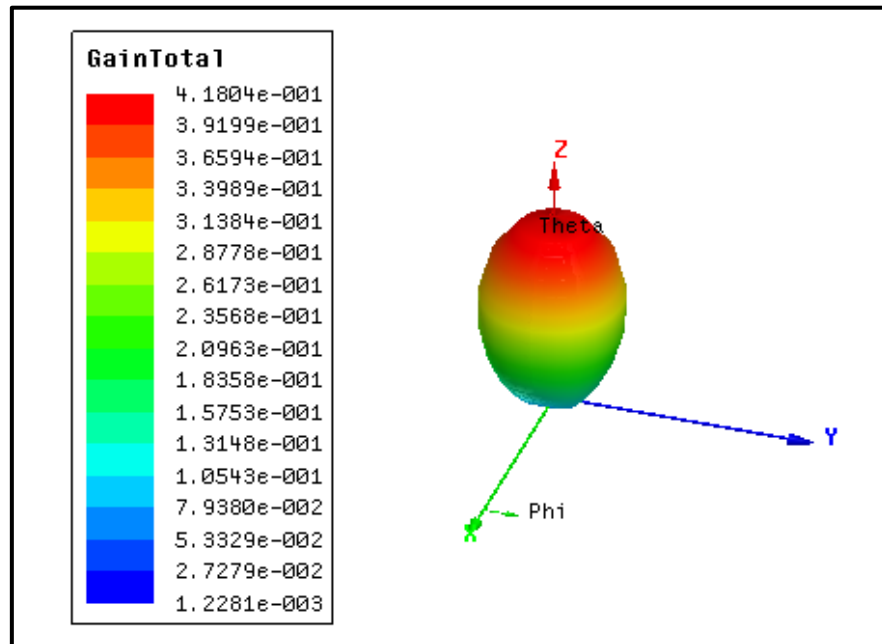


Figure III-17 : diagramme de rayonnement de 3D

La figure représentant le diagramme de rayonnement tridimensionnel (3D Gain Pattern) montre que l'antenne rayonne principalement dans la direction normale à sa surface, suivant l'axe +**Z**. La zone rouge correspond à la valeur maximale du gain, indiquant que l'énergie électromagnétique est concentrée dans cette direction. Le diagramme présente une forme quasi symétrique autour de l'axe principal, avec une diminution progressive du gain vers les directions latérales et arrière, comme l'indique la transition des couleurs du rouge vers le bleu. Ces résultats confirment que l'intégration de la fente rectangulaire (Rectangular Slot) conserve un comportement de rayonnement stable et directif, tout en assurant une bonne concentration de la puissance rayonnée dans la direction souhaitée. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour les applications nécessitant un rayonnement efficace et orienté.

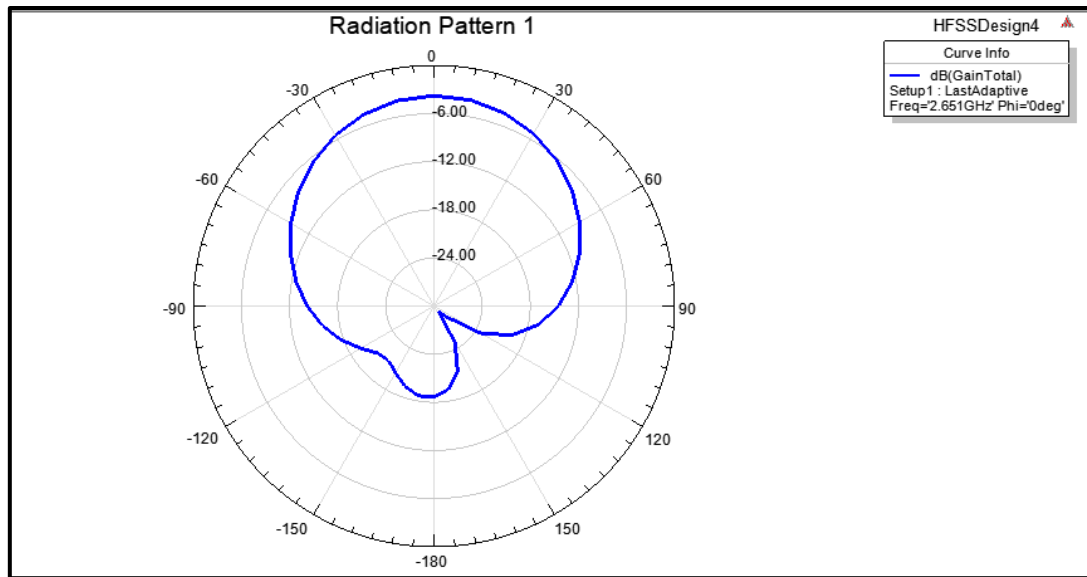


Figure III-18 : diagramme de rayonnement 2D

Les deux résultats correspondent à l'étape du Slot et montrent les caractéristiques de rayonnement de l'antenne avant l'intégration de la structure fractale Sierpinski Carpet. Le diagramme 2D met en évidence la répartition angulaire du rayonnement avec la présence d'un lobe principal dominant, tandis que le diagramme 3D du gain montre une concentration de l'énergie rayonnée principalement selon l'axe Z. Cette étape intermédiaire confirme que l'introduction du Slot améliore progressivement la directivité et la distribution du rayonnement à la fréquence 2.4GHz, bien que les performances ne soient pas encore totalement optimisées avant l'ajout de la géométrie fractale finale.

- **Distribution de la densité de courant surfacique (J_{surf}) de l'antenne à slots :**

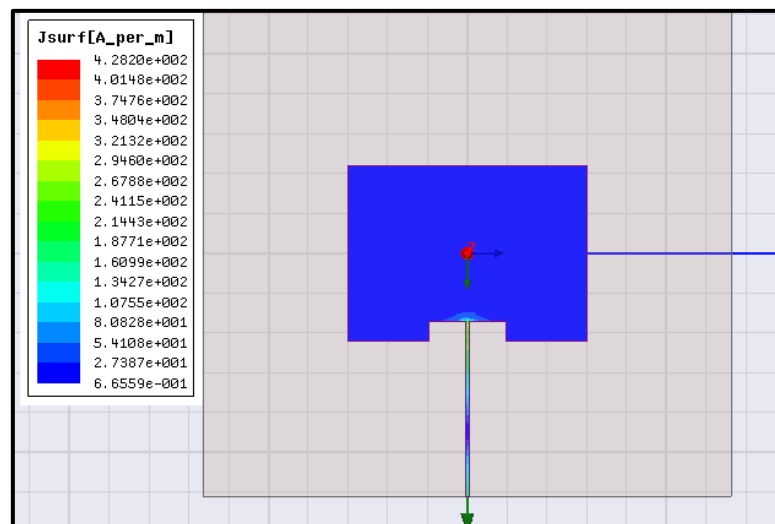


Figure III-19 : Distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet

Cette figure illustre la distribution de la densité de courant surfacique J_{surf} obtenue à partir d'une simulation électromagnétique. On observe que la majorité de la surface conductrice est caractérisée par de faibles valeurs de courant (zones en bleu), tandis qu'une concentration importante apparaît au niveau de la fente (slot) et de la zone d'alimentation. Cette concentration, visible par des couleurs plus chaudes (vert à jaune), indique que cette région constitue la principale zone de rayonnement de la structure.

La ligne verticale correspond à la ligne d'alimentation (feed line), assurant l'injection du signal vers la fente. La distribution observée est cohérente avec le fonctionnement attendu d'une antenne à fente alimentée par ligne microruban, où le courant se concentre principalement autour de la discontinuité géométrique.

Ainsi, les résultats confirment un bon comportement du dispositif en termes de localisation du courant et suggèrent une émission efficace au niveau de la fente

III.5 Miniaturisation par fractalisation de l'antenne patch rectangulaire

Nous allons fractaliser notre antenne rectangulaire de miniaturiser ses dimensions, en utilisant le principe du rectangle de Sierpinski (chapitre II). Le rectangle de Sierpiński de la figure a une dimension fractale égale à $\ln 8 / \ln 3 = 1.89$. C'est comme si nous avons fait huit copies de ce dernier, chacune étant réduite d'un facteur de $1/3$. Le principe de fractalisation du rectangle de Sierpiński est montré sur la figure :

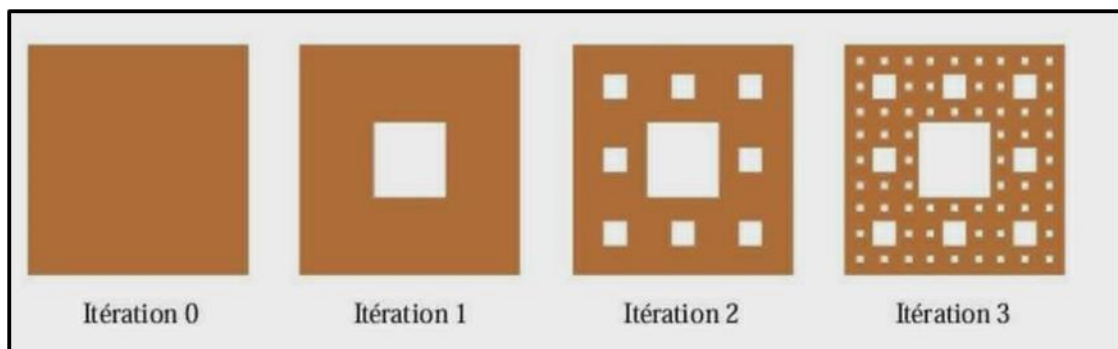


Figure III-20 : nombre d'itération tapis de Sierpinsky

III.5.1 Les itérations de sierpinski Carpet :

III.5.1.1 L'itération 01 du sierpinski Carpet :

Après l'optimisation de l'antenne patch par l'introduction d'une fente centrale (slot), la géométrie fractale de type Sierpinski Carpet a été adoptée afin d'améliorer davantage les performances de l'antenne. Cette géométrie repose sur le principe d'auto-similarité, selon lequel certaines parties du patch sont retirées de manière itérative. Cette modification permet d'augmenter la longueur effective du trajet des courants de surface, de créer plusieurs modes de résonance et de favoriser un fonctionnement multibande. Ainsi, l'utilisation de la structure fractale Sierpinski Carpet contribue à l'amélioration de la bande passante et des caractéristiques de rayonnement de l'antenne.

Itération 01 du tapis de sierpinski Carpet

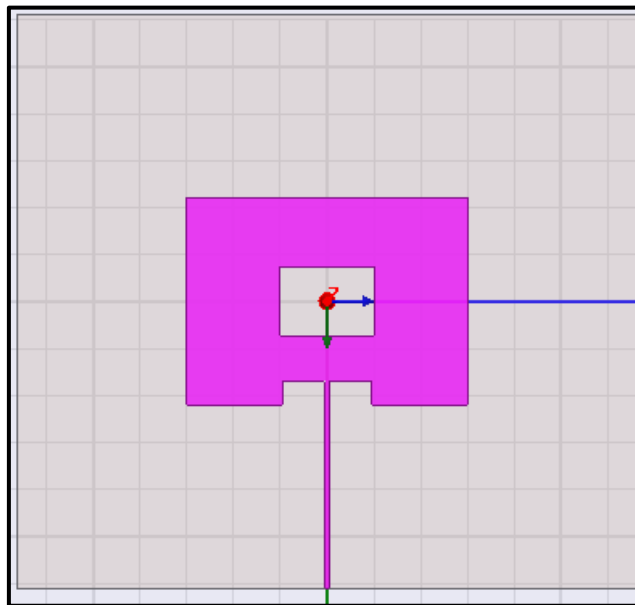


Figure III-21 : antenne sierpinski Carpet itération 01

Dans la première itération du Sierpinski Carpet, le patch est subdivisé en neuf carrés identiques selon une grille 3×3 , puis le carré central est supprimé. Cette opération modifie la distribution des courants de surface et introduit de nouveaux chemins de propagation, ce qui peut engendrer plusieurs fréquences de résonance et améliorer le comportement multibande de l'antenne.

- **Le coefficient de réflexion(S_{11}) 01 :**

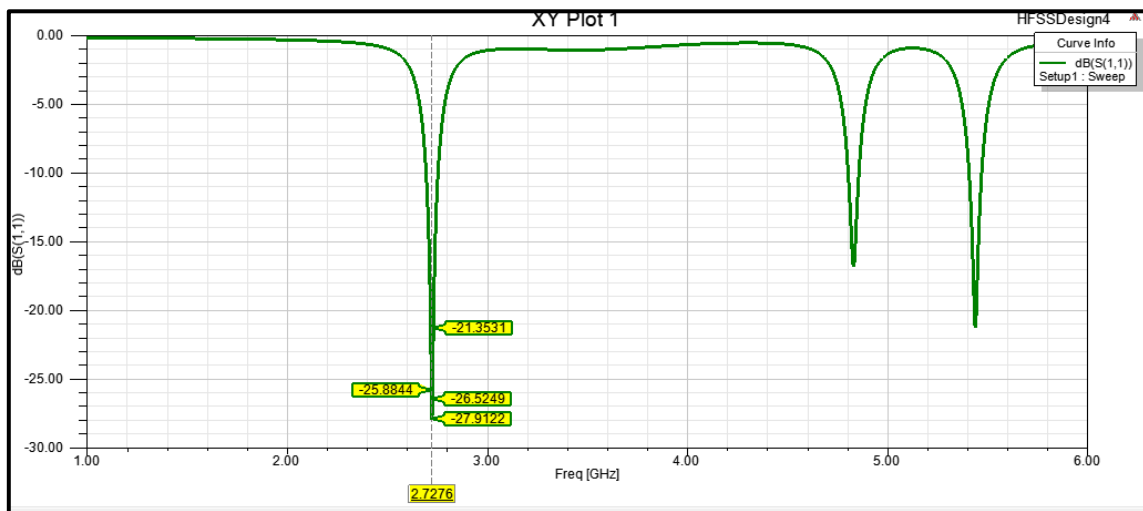


Figure III-22 : coefficient de réflexion S_{11} d'antenne Sierpinski Carpet itération 01

Cette figure présente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne en fonction de la fréquence. On observe plusieurs minima (creux) correspondant aux fréquences de résonance du dispositif. La résonance principale est située autour de **2,72 GHz**, où S_{11} atteint une valeur inférieure à **-25 dB**, indiquant une très bonne adaptation d'impédance et donc une faible réflexion du signal.

D'autres résonances apparaissent également aux alentours de **4,9 GHz** et **5,4 GHz**, ce qui montre que l'antenne présente un comportement **multibande**. Dans ces bandes, les valeurs de S_{11} restent inférieures à **-10 dB**, critère généralement admis pour un bon fonctionnement en antennes.

Ainsi, ces résultats confirment que la structure étudiée offre de bonnes performances en termes d'adaptation et qu'elle peut être utilisée pour des applications fonctionnant sur plusieurs bandes de fréquences.

- **Diagramme de rayonnement 01 :**

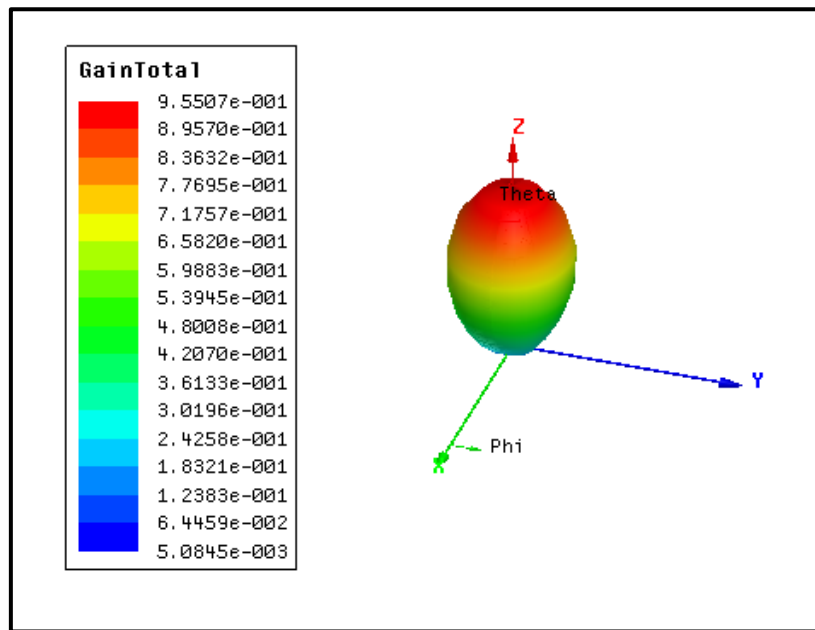


Figure III-23 : diagramme de rayonnement 3D itération 01

La représentation 3D du gain total montre un lobe principal orienté suivant l'axe Z avec une valeur maximale d'environ 0,955. Le diagramme présente une bonne symétrie et une faible présence de lobes secondaires, ce qui traduit une directivité satisfaisante et une distribution efficace de l'énergie rayonnée

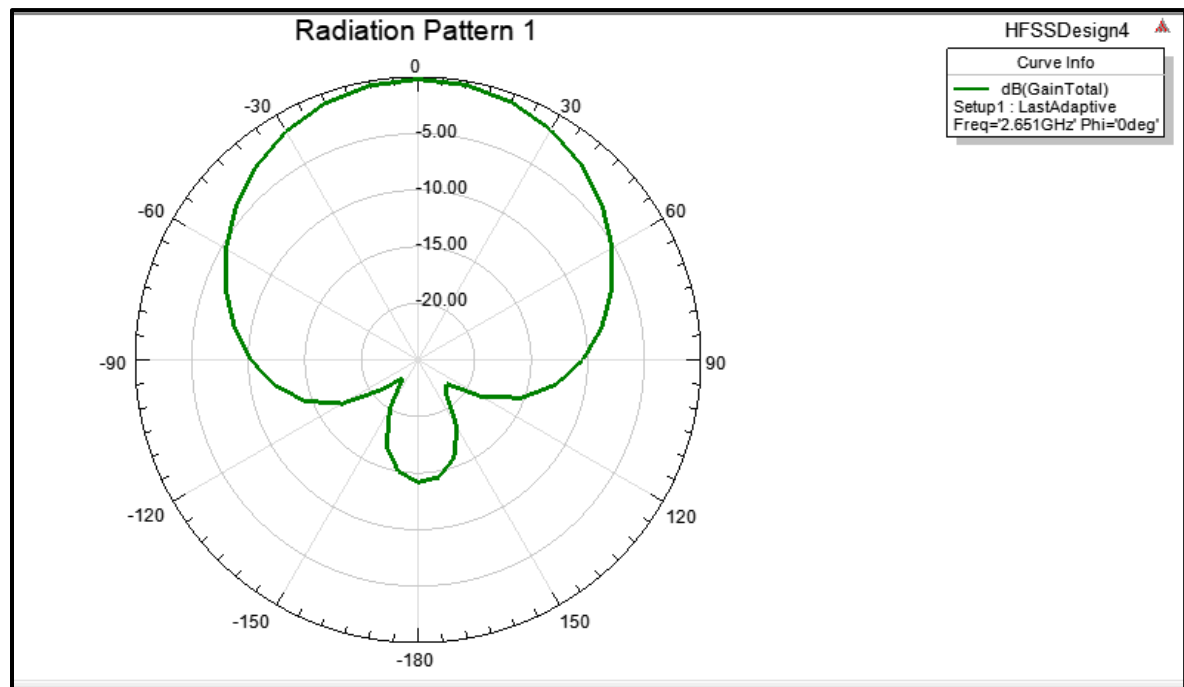


Figure III-24 : diagramme de rayonnement 2D itération 01

Cette figure représente le diagramme de rayonnement de l'antenne en deux dimensions (plan 2D) à la fréquence de **2,65 GHz**. On observe que le rayonnement est principalement dirigé vers l'avant (direction 0°), ce qui indique un comportement **directif** de l'antenne.

Le lobe principal est bien défini et présente un maximum de gain dans l'axe de rayonnement, tandis que les lobes secondaires restent relativement faibles, ce qui traduit une bonne concentration de l'énergie rayonnée. À l'arrière (autour de 180°), le rayonnement est nettement atténué, indiquant un bon rapport avant/arrière.

Ainsi, ce diagramme confirme que l'antenne possède une directivité appréciable avec une distribution de rayonnement adaptée aux applications nécessitant une propagation privilégiée dans une direction donnée

- **VSWR 01 :**

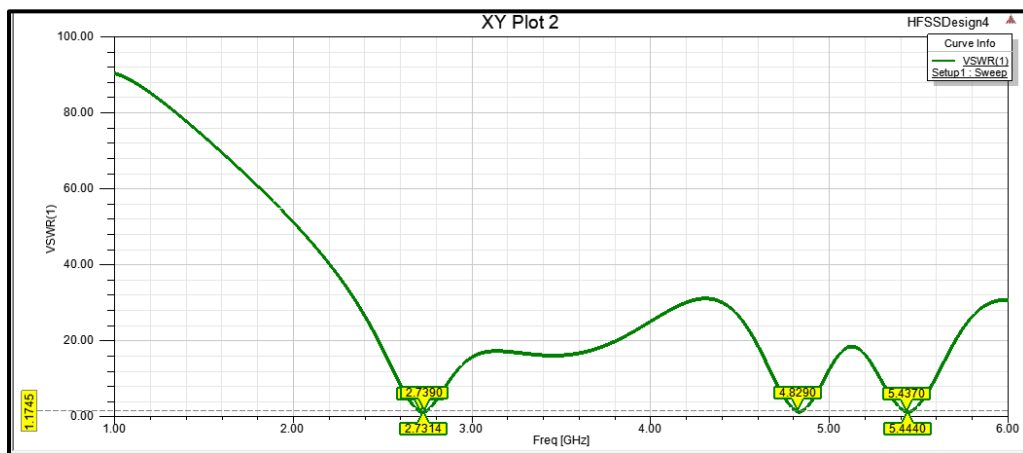


Figure III-25 : VSWR d'antenne de itération1

Le tracé du VSWR met en évidence trois fréquences de résonance situées à 2,73 GHz, 4,83 GHz et 5,44 GHz, pour lesquelles le VSWR est proche de 1, indiquant une excellente adaptation d'impédance. Ces résultats confirment le caractère multibande de l'antenne et son bon fonctionnement aux fréquences de résonance.

Distribution de la densité du courant de surface (Jsurf) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 01

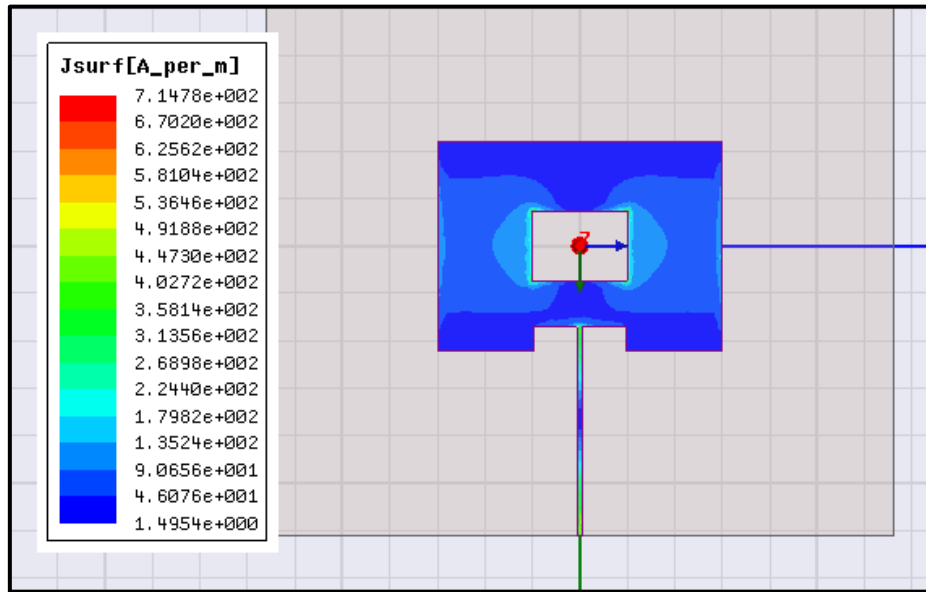


Figure III-26 : Distribution de la densité du courant de surface (Jsurf) de l'antenne Sierpinski Carpet à itération1

La distribution du courant surfacique montre une forte concentration du courant au niveau de la ligne d'alimentation et des bords de la structure fractale centrale, avec une valeur maximale d'environ 7.5×10^2 . Cette répartition met en évidence les zones actives responsables du rayonnement et confirme le bon fonctionnement de l'antenne à la fréquence de résonance étudiée.

III.5.2 Itération 02 de tapis de sierpinski Carpet :

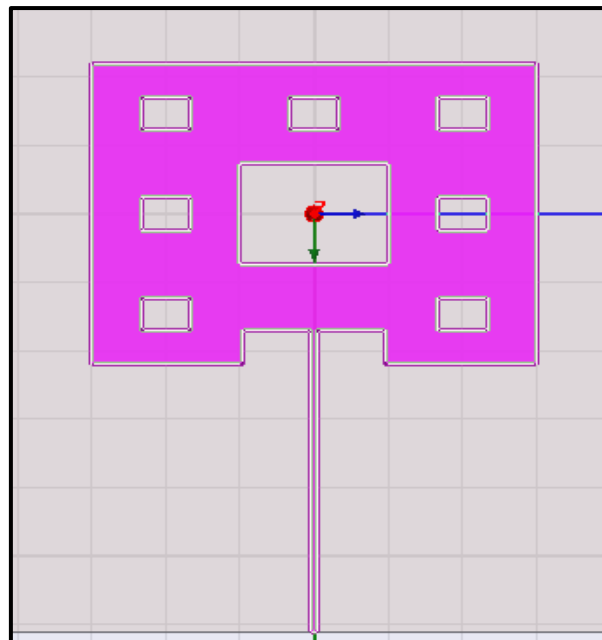


Figure III-27 : antenne sierpinski Carpet itération 02

La deuxième itération est obtenue à partir de la structure de la première itération en introduisant un carré central de grande dimension ainsi que sept ouvertures carrées supplémentaires réparties symétriquement autour de celui-ci. Cette configuration augmente la complexité géométrique de l'antenne et allonge le trajet du courant de surface sur le patch. L'ajout de ces ouvertures modifie la distribution du courant et des champs électromagnétiques, ce qui permet d'améliorer les performances de l'antenne en termes d'adaptation d'impédance, de fréquence de résonance et de bande passante. Cette structure fractale contribue également à la miniaturisation de l'antenne tout en conservant de bonnes caractéristiques de rayonnement.

- **Le coefficient de réflexion (S_{11})02 :**

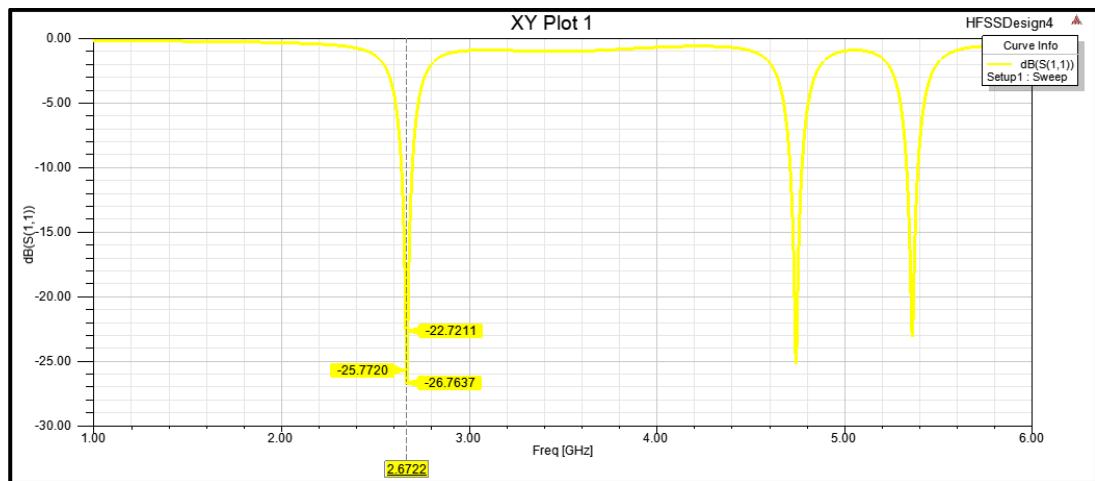


Figure III-28 : coefficient de réflexion d'antenne Sierpinski Carpet itération 02

La figure représente le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne fractale de type Sierpinski Carpet. Les résultats obtenus montrent la présence de plusieurs fréquences de résonance dans la bande étudiée comprise entre 2,4 GHz et 5,5 GHz. La première résonance est observée à 2,67 GHz avec une valeur de S_{11} égale à -26,76 dB, indiquant une excellente adaptation d'impédance. Deux autres résonances apparaissent aux environs de 4,8 GHz et 5,4 GHz avec des valeurs inférieures à -10 dB. Ces résultats confirment le comportement multibande de l'antenne et démontrent l'efficacité de la géométrie fractale dans la génération de plusieurs modes de résonance. L'antenne présente ainsi de bonnes performances de fonctionnement sur différentes bandes de fréquences comprises dans l'intervalle étudié.

Diagramme de rayonnement 02 :

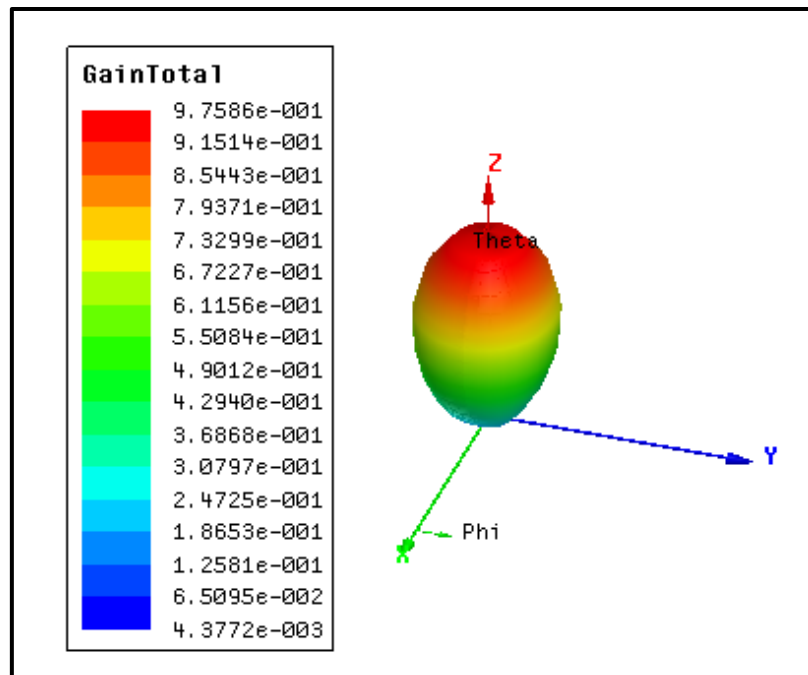


Figure III-29 : diagramme de rayonnement 3D d'itération 02

La figure présente le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 2 dans la bande de fréquences comprise entre 2,4 GHz et 5,5 GHz. Le diagramme montre un rayonnement principalement dirigé selon l'axe Z, avec un lobe principal bien défini et une répartition relativement symétrique. La valeur maximale du gain atteint environ 0,98 (gain normalisé), indiquant une bonne concentration de l'énergie rayonnée dans la direction principale. L'itération 2 améliore la distribution du courant sur la structure fractale, ce qui favorise le fonctionnement multibande et contribue à maintenir des performances de rayonnement stables sur l'ensemble de la bande étudiée. Les lobes secondaires restent faibles, traduisant une bonne directivité et une efficacité de rayonnement satisfaisante.

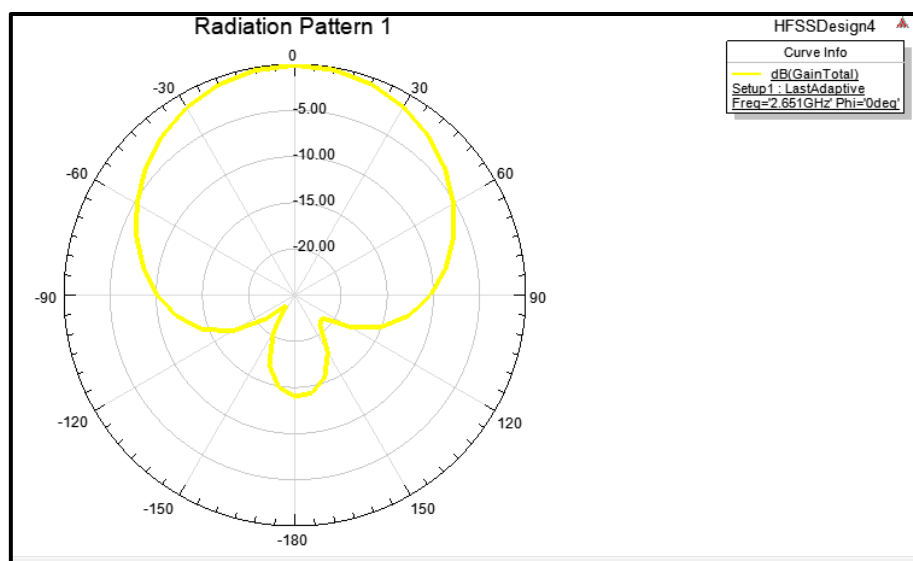


Figure III-30 : diagramme de rayonnement 2D d'itération02

La figure représente le diagramme de rayonnement bidimensionnel de l'antenne fractale à la fréquence de résonance de 2,65 GHz. On observe un lobe principal orienté dans la direction de 0°, indiquant que la majeure partie de l'énergie rayonnée est concentrée dans cette direction. Le diagramme présente également un lobe arrière de faible amplitude, ce qui montre que le rayonnement est principalement dirigé vers l'avant. Cette caractéristique est typique des antennes patch et traduit une bonne directivité. La forme du diagramme confirme que l'antenne assure une distribution de rayonnement stable et adaptée aux applications de communication sans fil dans la bande de fréquences étudiée.

- **VSWR02 :**

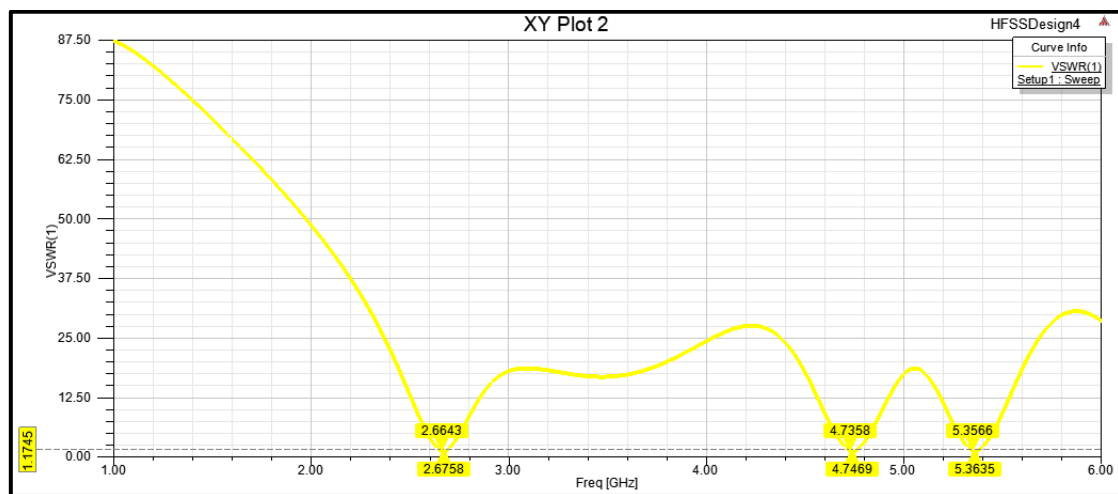


Figure III-31 : VSWR d'antenne sierpinski Carpet d'itération 02

Le tracé du VSWR de l'antenne Sierpinski Carpet (itération 2) met en évidence trois fréquences de résonance principales autour de 2,68 GHz, 4,75 GHz et 5,56 GHz. Les faibles valeurs du VSWR à ces fréquences indiquent une bonne adaptation d'impédance et confirment le caractère multibande de l'antenne dans la plage 2,4–5,5 GHz.

- **Distribution de la densité du courant de surface (Jsurf) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 2 :**

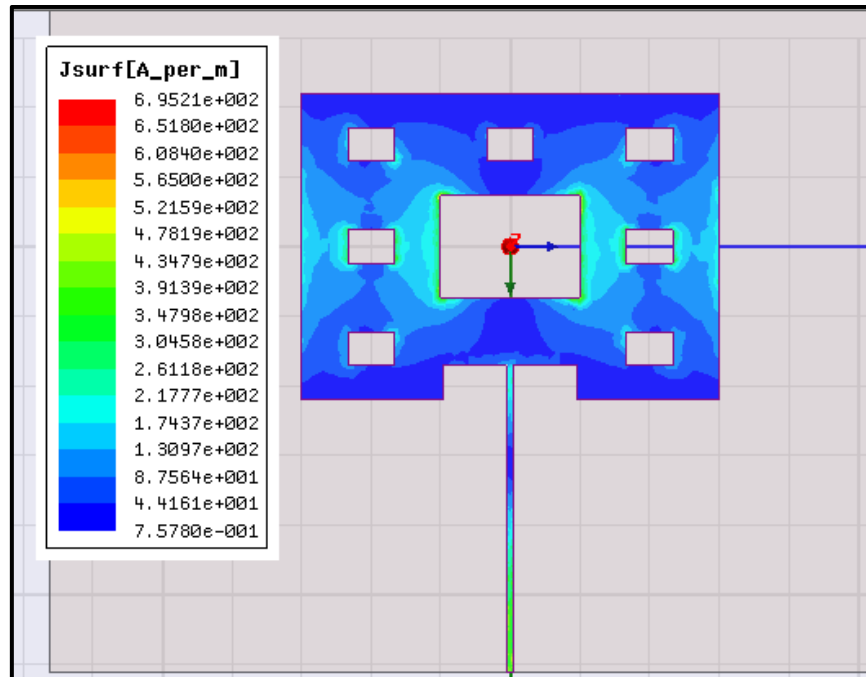


Figure III-32 : Distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 2.

La figure illustre la distribution de la densité du courant de surface (J_{surf}) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 2. Les zones de forte densité de courant sont localisées principalement autour du patch central, des bords des ouvertures fractales et de la ligne d'alimentation. La présence des cellules fractales modifie les trajectoires du courant et augmente la longueur électrique de l'antenne, favorisant l'apparition de plusieurs modes de résonance. Cette distribution confirme le comportement multibande de la structure et met en évidence l'influence de la géométrie fractale sur les performances électromagnétiques de l'antenne.

III.5.3 Itération 03 du tapis de sierpinski Carpet :

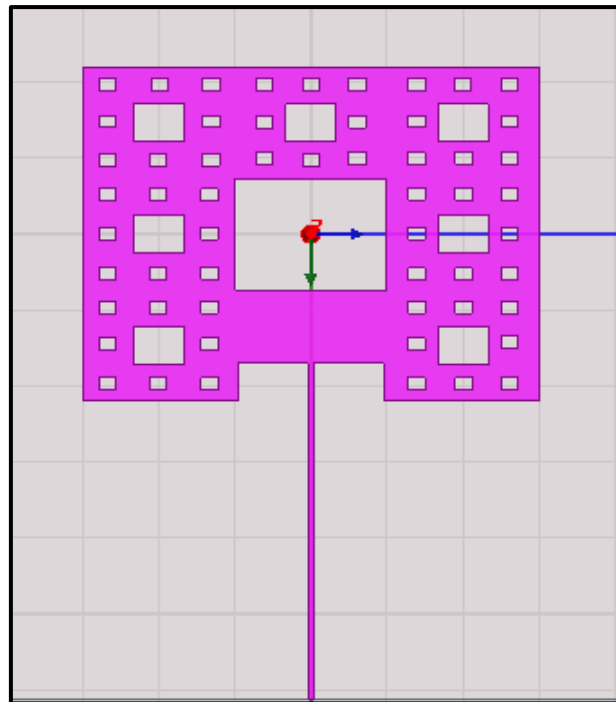


Figure III-33 : : antenne sierpinski Carpet itération 03

La troisième itération est obtenue à partir de la structure de la deuxième itération en appliquant une nouvelle fois le même processus de subdivision sur chacun des carrés restants. Cette opération génère un troisième niveau de fentes de très petites dimensions, réparties uniformément sur toute la surface du patch. La version se distingue par le maintien de la portion centrale au niveau du port d'excitation. Cette complexité géométrique accrue augmente davantage la longueur effective du trajet des courants de surface, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement sur plusieurs bandes de fréquences simultanément tout en conservant des dimensions compactes.

- **Coefficient de réflexion (S_{11}) 03 :**

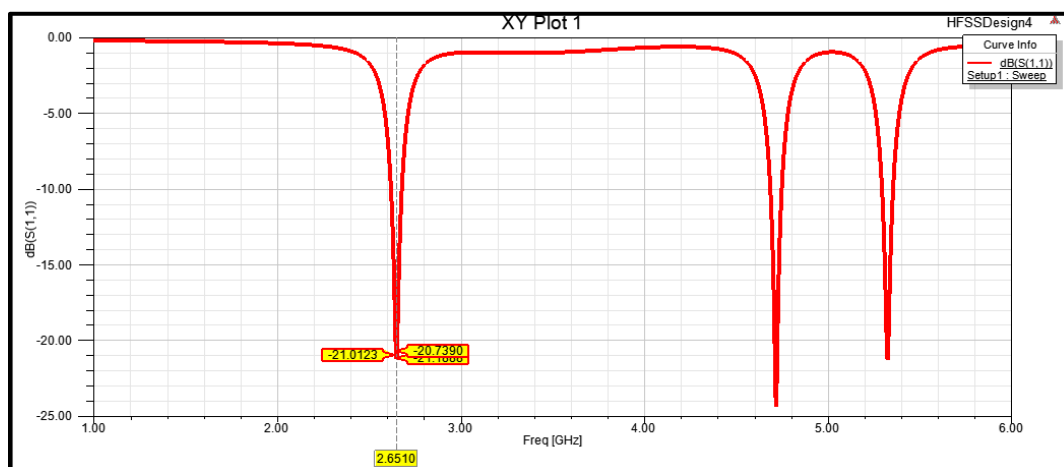


Figure III-34 : coefficient de réflexion d'antenne Sierpinski Carpet itération 03

La courbe S_{11} de l'antenne fractale Sierpinski Carpet (itération 3) présente des résonances marquées autour de 2,65 GHz et 5,5 GHz, avec des valeurs inférieures à -20 dB, indiquant une bonne adaptation d'impédance. Ces résultats confirment le fonctionnement multibande de l'antenne pour les applications sans fil.

- **Diagramme de rayonnement 03 :**

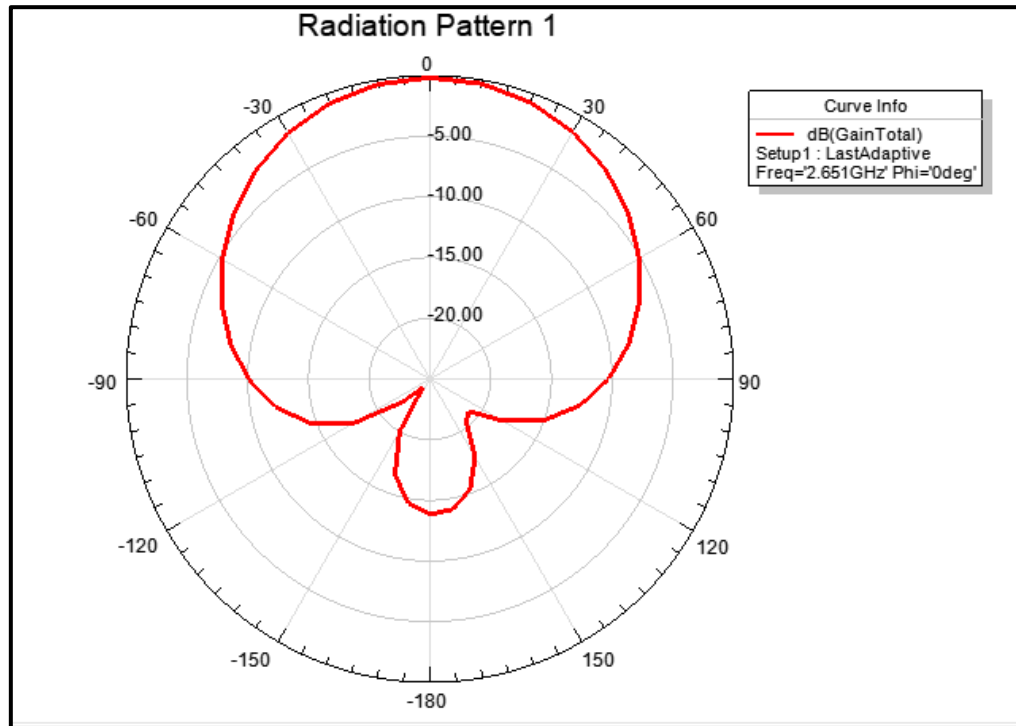


Figure III-35 : diagramme de rayonnement 2D itération 03

Le diagramme de rayonnement à 2,651 GHz présente un lobe principal orienté vers l'avant, indiquant une bonne directivité dans cette direction. La présence de faibles lobes secondaires à l'arrière montre que la majeure partie de l'énergie rayonnée est concentrée dans le lobe principal, ce qui traduit un comportement de rayonnement satisfaisant pour l'antenne Sierpinski Carpet d'itération 3.

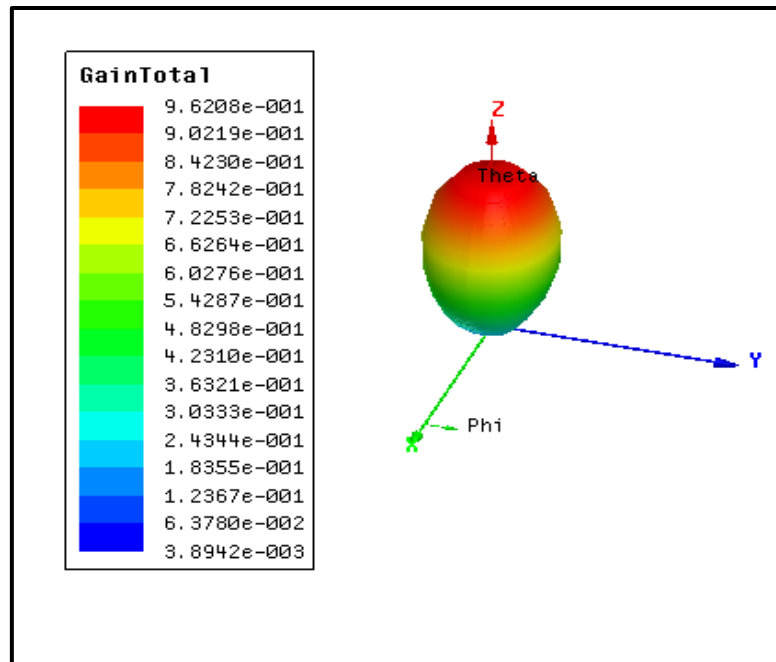


Figure III-36 : diagramme de rayonnement 3D itération 3

La représentation 3D du gain montre un rayonnement principalement dirigé selon l'axe Z, avec un lobe principal unique et une répartition quasi omnidirectionnelle autour de cet axe. Le gain maximal est concentré dans la zone rouge, ce qui indique une bonne efficacité de rayonnement à la fréquence de résonance. Cette forme est caractéristique d'une antenne présentant une directivité modérée et un comportement stable.

VSWR :

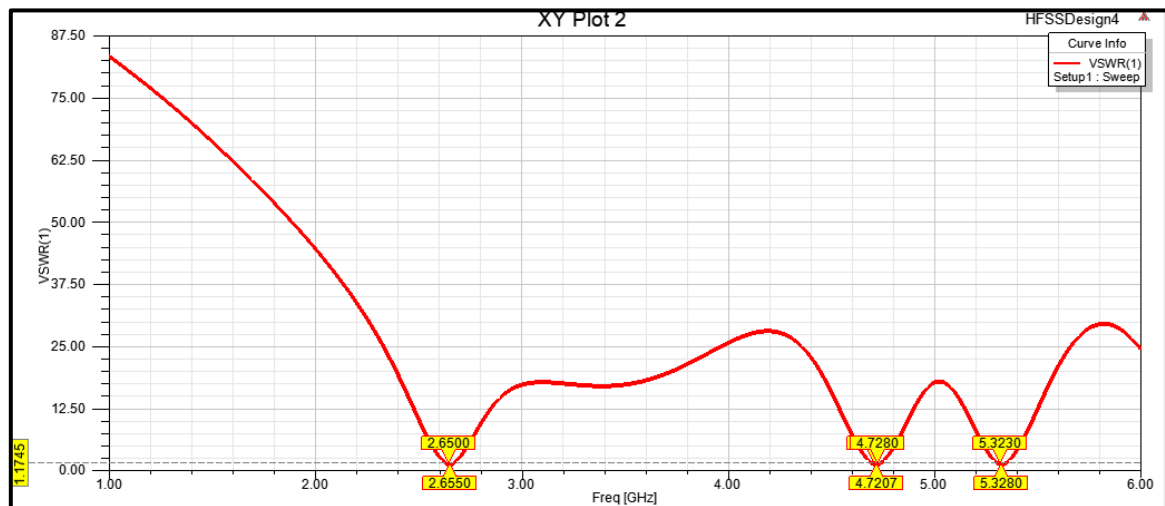


Figure III-37 : VSWR d'itération 03

L'antenne Sierpinski Carpet d'itération 03 présente un comportement multibande avec des fréquences de résonance situées approximativement à 2,65 GHz, 4,72 GHz et 5,32 GHz. Les minima de VSWR observés à ces fréquences traduisent une bonne adaptation d'impédance et une faible réflexion de puissance. La troisième itération améliore les propriétés Multibandes grâce à l'augmentation des chemins de courant induits par la structure fractale. Cette antenne

est donc adaptée aux applications sans fil dans les bandes ISM et WLAN proches de 2,4 GHz et 5 GHz

- **Distribution de la densité du courant de surface (Jsurf) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 03 :**

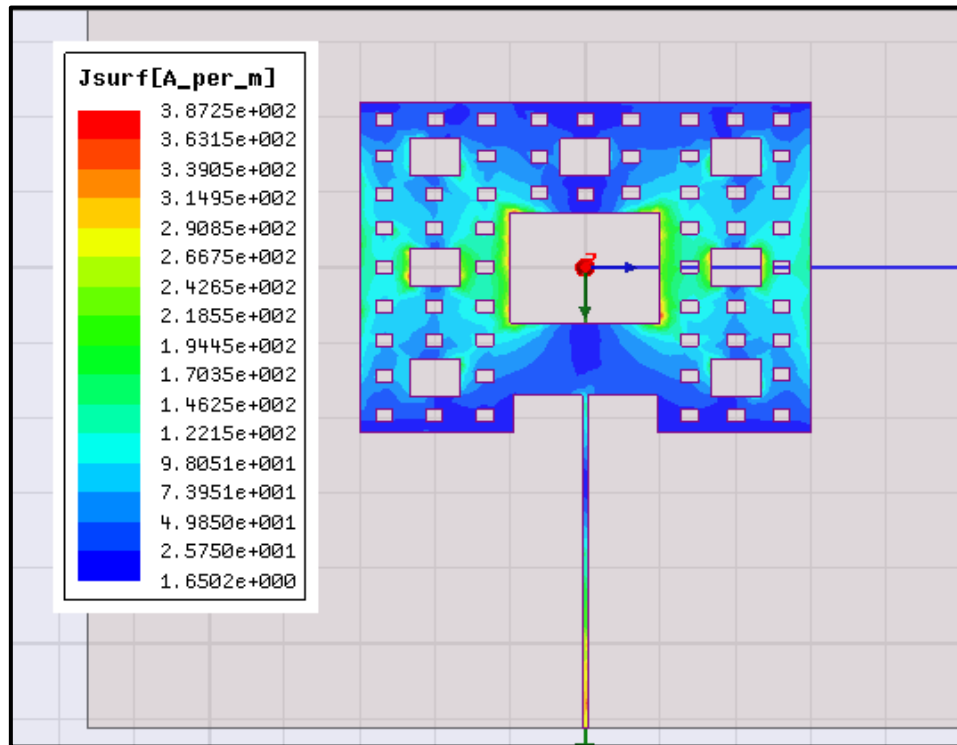


Figure III-38 : Distribution de la densité du courant de surface (Jsurf) de l'antenne Sierpinski Carpet à l'itération 03

La figure montre la distribution de la densité de courant de surface de l'antenne Sierpinski Carpet d'itération 3. Les fortes concentrations de courant apparaissent principalement autour du patch central, des bords des cellules fractales et de la zone d'alimentation. Cette répartition met en évidence l'influence de la géométrie fractale sur le trajet des courants, augmentant la longueur électrique et favorisant l'apparition de plusieurs modes de résonance. Le comportement observé confirme les propriétés Multibandes de l'antenne ainsi que son aptitude à fonctionner dans les bandes de fréquences visées autour de 2,4 GHz et 5 GHz.

III.6 Optimisation de l'antenne

Afin d'améliorer les performances de l'antenne patch rectangulaire initiale, nous avons procédé à une démarche d'optimisation progressive en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons ajusté les dimensions géométriques du patch ainsi que celles de la ligne d'alimentation afin d'obtenir une meilleure adaptation d'impédance à la fréquence cible de 2,4 GHz. Cette optimisation a été réalisée par simulation itérative sous HFSS, en modifiant les paramètres un à un tout en observant l'évolution du coefficient de réflexion S_{11} .

Dans un second temps, l'introduction d'une fente rectangulaire (slot) au niveau de la jonction entre le patch et la ligne d'alimentation a constitué une étape clé dans le processus

d'optimisation. Cette technique nous a permis de modifier la distribution des courants de surface et d'ajuster l'impédance d'entrée vers la valeur souhaitée de 50Ω . Les dimensions optimales de la fente ont été déterminées après plusieurs simulations, avec une longueur de 13.5mm et une largeur de 9.6mm

Enfin, l'application de la géométrie fractale Sierpinski Carpet à travers trois itérations successives représente la dernière phase d'optimisation. Chaque itération a permis d'affiner les fréquences de résonance, d'élargir la bande passante et d'améliorer le comportement multibande de l'antenne. L'itération 3 s'est révélée la plus performante, avec des résonances bien définies autour de 2,65 GHz et 5,5 GHz et des valeurs de S_{11} inférieures à -20 dB.

III.7 Analyse des résultats

Dans cette section, nous allons analyser et comparer les résultats obtenus pour les différentes structures simulées, depuis l'antenne patch initiale jusqu'à l'antenne fractale Sierpinski Carpet à l'itération 3.

Le tableau suivant résume les principales fréquences de résonance et les valeurs du coefficient de réflexion S_{11} pour chaque structure :

Structure	Fréquence de résonance	$S_{11min}(dB)$	VSWR	Comportement
Patch simple itération00	2.4GHz	$> -10dB$	> 2	Mono-bande, adaptation insuffisante
Itération 01	2.72GHz /4.9GHz/5.4GHz	-25dB	1.08	Multibande, très bonne adaptation
Itération 02	2.67GHz/4.9GHz/5.4GHz	-26.76dB	≈ 1	Multibande, excellente adaptation
Itération 03	2.65GHz /4.72GHz/5.32GHz	$< -20dB$	≈ 1	Multibande, bonne adaptation

D'après ces résultats, on constate clairement que l'introduction de la fente rectangulaire a permis d'obtenir un comportement multibande que l'antenne initiale ne possédait pas. En passant de la structure avec slot aux différentes itérations fractales, on observe que la fréquence de résonance principale se rapproche progressivement de la valeur cible de 2,4 GHz, passant de 3,1 GHz à 2,65 GHz à l'itération 3.

Concernant le diagramme de rayonnement, toutes les structures présentent un lobe principal orienté selon l'axe Z, ce qui est caractéristique des antennes patch. Le gain normalisé augmente légèrement d'une itération à l'autre, avec une valeur maximale atteinte à l'itération 2 (0,98). La distribution du courant de surface confirme dans tous les cas que les zones actives sont concentrées autour des fentes et de la ligne d'alimentation, ce qui valide le bon fonctionnement électromagnétique de la structure.

En conclusion, la géométrie fractale Sierpinski Carpet a démontré son efficacité dans l'amélioration des performances de l'antenne, notamment en termes de miniaturisation, de fonctionnement multibande et d'adaptation d'impédance.

III.8 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble de la démarche de conception, de simulation et d'optimisation d'une antenne microruban fractale de type Sierpinski Carpet fonctionnant dans la bande 2,4–5,5 GHz. Nous avons commencé par la présentation du logiciel de simulation HFSS et de ses différents outils, puis nous avons calculé les dimensions théoriques de l'antenne patch rectangulaire de base.

La simulation de l'antenne initiale a montré que celle-ci ne satisfaisait pas pleinement les critères d'adaptation à la fréquence de 2,4 GHz. Nous avons donc procédé à son optimisation par l'introduction d'une fente rectangulaire, ce qui a permis d'obtenir un comportement multibande avec une bonne adaptation d'impédance. Par la suite, l'application progressive de la géométrie fractale Sierpinski Carpet sur trois itérations a permis de rapprocher la fréquence de résonance principale de la valeur cible de 2,4 GHz tout en conservant les résonances secondaires autour de 5 GHz, ce qui correspond aux bandes ISM et WLAN utilisées dans les systèmes de communication sans fil modernes.

Les résultats obtenus confirment l'intérêt de l'approche fractale dans la conception d'antennes compactes et Multibandes, et montrent que l'itération 3 du Sierpinski Carpet représente le meilleur compromis entre miniaturisation et performances électromagnétiques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail avait pour objectif la conception, la modélisation et l'optimisation d'une antenne fractale de type Sierpinski Carpet destinée aux applications Multibandes dans les systèmes de communication sans fil. L'ensemble de la démarche a été réalisé à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique ANSYS HFSS.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales relatives aux antennes, notamment les paramètres essentiels tels que le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité, la bande passante et l'adaptation d'impédance. Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude de la géométrie fractale et à ses applications dans le domaine des antennes, en mettant en évidence les propriétés particulières du tapis de Sierpinski.

Le troisième chapitre a constitué le cœur de notre travail. Nous y avons présenté la conception d'une antenne patch rectangulaire de base, puis son optimisation par l'introduction d'une fente rectangulaire et l'application de la géométrie fractale Sierpinski Carpet à travers trois itérations successives. Les résultats de simulation ont montré que l'antenne proposée présente de bonnes performances en termes d'adaptation d'impédance, avec des valeurs de S_{11} inférieures à -20 dB, et qu'elle fonctionne efficacement sur plusieurs bandes de fréquences couvrant les bandes ISM à 2,4 GHz et WLAN à 5 GHz.

Comme perspectives futures, il serait intéressant de procéder à la fabrication physique du prototype de l'antenne et de comparer les mesures expérimentales aux résultats de simulation. Il serait également possible d'explorer d'autres géométries fractales ou d'augmenter le nombre d'itérations afin d'obtenir un fonctionnement sur un plus grand nombre de bandes de fréquences

Bibliographie et référence

Bibliographie et Références

- [1] s. fersiti et f. z. mahieddine , «antennes à plan de masse parstielle de type hilbert pour un fonctonnement ultra large bande,» université aboubakar belkaid , tlemcen, 2018.
- [2] M. R. E. ,. F. m. j. a. j. c. j. j. f. v. j. L. Llop chévez Miguel, «Antenas(telecomunicaciones),» universidad tecnologica de san juan del rio , Mexique .
- [3] s. mlihi et t.-h. fengal, «antenne de téléphonie mobile, caractérisation et optimation,» université abdelrahman mira , bējaia, 2016.
- [4] a. Birane et a. Si saber, «antenne fractales reconfigurables,» université saad dahlab , blida, 2019/2020.
- [5] H. Ben moussa , s. Mokkdadi et s. AOUINE , «conception et simulation d'une antenne large bande,» université Elchahi Hamma Lakhdar , EL-Oued, 2021.
- [6] S. F. BOUBEKEUR et . F. Z. KHELIL, «Conception et simulation d'antenne imprimée a Formes fractales ultra large bande,» université Belhej bouchaib, ain temouchent, 2023.
- [7] s. TEDJANI et K. Mohammedi, «etude et conception d'antenne fractale,» unoversité echahid larbi tebssi , tebessa, 2023.
- [8] A. Meftahi et R. OUzzir, «conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionelles,» université Abou beke belkaid , Telemcen, 2017.
- [9] N. . S. MISSAOUI et H. LEKCIR, «Conception d'une interface graphique sous Matlab en vue de l'étude d'une antenne cornet conique,» Université Mohamed Khide, Biskra, 2022.
- [10] M. fatiha, «Conception d'un réseau d'antennes microstrip et,» université Moulay tahar , Saida , 2024.
- [11] p. odile et coll, «les antennes théorie,» chez *conception et applications*.
- [12] S. Abi et M. zouaghi , «Etude et simulation d'une antenne fractale ultra large bande,» université 8 mai 1945, Guelma, 2017.
- [13] I. GANDOURA et . S. LAMER , «CONCEPTION ET REALISATION DES ANTENNES FRACTALES IMPRIMEES ULTRA LARGE BANDE (ULB) A BANDE REJETEE,» Université 8Mai 1945 , Guelma, 2019.
- [14] f. z. Dahel et f. Boulenuar , «conception d'une antenne fractale miniature et large bande,» univesité belhaj bouchaib, ain tmouchnet, 2022.
- [15] r. nait seghier et l. mouna , «antenne fractale planaire pour des applications sans fils,» université mohammed el-ibrahimi , bouredj boy arreridj, 2022.

- [16] W. GUENNAD et I. HATTAB , «Etude et Conception d'antennes Originales Fractales A Base des Méta-Matériaux Pour les Applications Sans-Fil,» Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen .
- [17] D. AMEZIANE, «Etude et Optimisation d'Antennes Fractales plaquées,» UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID, tlemcan, 2009.
- [18] t. e. beloucif et a. haddad , «conceptin et simulation d'une antenne fractale imprimée à base de triangle de sierpinski,» université 8 mai 1945, guelma, 2012.
- [19] A. Reha et B. ouadiaa, «Le Comportement Des Antennes Fractales De Types « Courbe De Sierpinsky»,» *Méditerranéen Télécommunications Journal*, 2016..
- [20] N. S. a. V. Sharma, «a Journey of Antenna from Dipole to Fractal: A Review,» *Journal of Engineering Technology July*, 2017.
- [21] n. parthsarathi, a. navneet, y. pankaj , v. rahul et c. ganrav, «design and analysis of sierpinski carpet fractal antenna,» *nternational Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 3, n° %15, mai 2015.
- [22] f. z. dahel et f. boulanouar, «Conception d'une antenne fractale miniature et large bande,» Université de Belhadj Bouchaib, Aïn Témouchent, 2021/2022.
- [23] A. CHAMI, «Miniaturisation et intégration d'antennes imprimées pour systèmes ULB pulsés,» Université Nice Sophia Antipolis, PARIS, 2011.
- [24] K. R. CARVER et J. W. Mink, «Microstrip Antenna Technology,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vols. %1 sur %2ap-29, pp. 2-24, 1989.
- [25] j. L. Volakis, C.-C. Chen et K. Fujimoto, *Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications*, New York: McGraw-Hill, 2010.
- [26] V. G. Veselago, «The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ,» *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [27] S.-J. Liao, K.-L. Wong et L.-C. Chou, «Small-size uniplanar coupled-fed PIFA for 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN operation in the laptop computer,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, pp. 1023-1028, 2009.
- [28] R. B. Waterhouse, S. D. Targonski et D. M. Kokotoft, «Design and performance of small printed antennas,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, n° %111, pp. 1629-1633, 1998.
- [29] T. Taga, K. Hirasawa et M. Haneish, nalysis of planar inverted-F antennas and antenna design for portable radio equipment In : *Analysis, Design, and Measurement of Small*

and Low Profile Antennas, Boston: Analysis, Design, and Measurement of Small and Low Profile Antennas, 1992.

- [30] K.-L. Wong, Planar Antennas for Wireless Communications, New York, USA: John Wiley & Sons (Wiley-Interscience) , 2003.
- [31] S. A. Bokhari, J.-F. Zürcher, j. R. Mosig et E. F. Gardiol, «A small microstrip patch antenna with a convenient tuning option,» IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, n° 11, pp. 1521-1528, 1996.
- [32] S. Villégier, P. Le Thuc, R. Staraj et G. Kossiavas, «Dual-band planar inverted-F antenna,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 38, n° 11, pp. 40-42, 2003.
- [33] S. Drabowitch et C. Ancona, Antennes – Tome 2 : Applications, Paris: Éditions Masson, 1986.
- [34] J.-W. Wu, C.-R. Lin et J.-H. Lu, «A planar meander-line antenna for triple-band operation of mobile handsets,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 41, n° 15, pp. 380-386, 2004.
- [35] S.-V. Ágata et . D. S.-H. Agapito , «Printed antennas for dual-band GSM/DCS 1800 mobile handsets,» *Electronics Letters Institution of Engineering and Technology (IET)*, vol. 34, n° 12, pp. 140-141, 1998.
- [36] T. E. Team, «what is multiband antenna,» techdods know your world, 10 05 2026. [En ligne]. Available: <https://www.techdogs.com/td-dictionary/word/multiband-antenna#:~:text=A%20Multiband%20Antenna%20is%20an,frequency%20range%20of%20radio%20waves>. [Accès le 2026].
- [37] J. Wiley, «Antenna Theory : Analysis and design,» 3rd edition, constantine A BANALIS , 2005.
- [38] H. B. I. Gaha, «Analyse et Conception des Antennes Fractales,» Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Institut National Polytechnique (Toulouse), france, 2007.
- [39] I. GANDOURA et S. LAMER, «CONCEPTION ET REALISATION DES ANTENNES FRACTALES IMPRIMEES ULTRA LARGE BANDE (ULB) A BANDE REJETEE,» Université 8Mai 1945, Guelma, 2019.