

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

populaire

République algérienne démocratique et

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de Technologie

Département D'électronique et des Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Réseau et Télécommunication

## Analyse d'antenne patch à base du Graphène

**Présenté Par :**

- 1) Mme. BENMECHERNENE Abir
- 2) Melle. RACHDI Soumia Chahrazed

**Devant le jury composé de :**

Dr. MERADI Abdelhafid	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. MOULESSHOUL Wassila	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. SLIMANE Zohra	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. RABAH Mohammed Amin	M R A	CDS (Oran)	Co-encadrant

*Année Universitaire 2021/2022*

# Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, de nous avoir donné la santé, le courage et la force de faire ce travail.

En premier lieu, nous tenons à remercier notre encadrant Mme SLIMANE Zohra pour son travail acharné, ses précieux conseils, ainsi que notre co-encadrant Monsieur RABAH Mohammed Amin pour ses encouragements et son aide dans le développement de notre travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à monsieur MERADI Abdelhafid, enseignant chercheur à l'université d'Ain Temouchant d'avoir accepté de présider le jury.

Nous tenons à remercier également Mme MOULESSHOUL Wassila, enseignante chercheur à l'université d'Ain temouchent d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous voudrions également remercier aussi tous les professeurs et responsables du département Electronique & Télécommunications.

A toutes nos familles, en particulier nos parents qui nous ont soutenus et conseillés tout au long de notre vie scolaire.

Nous remercions sincèrement tous les membres du jury d'avoir accepté de revoir ce travail. Enfin, nous tenons à remercier nos amis, collègues et tous ceux qui ont participé directement ou indirectement à ce briefing et ont rendu notre environnement de travail agréable.

Merci à tous.

## **Dédicace**

*En tout premier lieu, je remercie ALLAH le Tout Puissant, dem'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Je dédie ce projet à ma chère mère Fadila, Qui n'a jamais cessé de formuler des prières à mon égard. A mon frère Nadir, à ma grand-mère Orkiya que dieu prolonge sa vie, pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.*

*A mon mari Belghitri Akram contribué de près ou de loin pour que ce travail se réalise.*

*A mon binôme, Soumia pour son entente et son sympathie.*

**Benmechernene Abir**

## ***Dédicace***

*Je dédie cet humble travail à mes très chers parents qui ont été à mes côtés pour me soutenir, m'aider à faire des choix importants, s'assurer qu'il ne me reste rien de mon enfance, ils ont tout préparé pour que je puisse étudier dans les meilleures conditions, que Dieu les bénisse et qu'ils vivent longtemps. Dédié à mes grands-parents très aimants. À tous mes oncles et grands-mères à toutes mes collègues de classe avec qui j'ai passé des moments mémorables et spécialement mon binôme et sœur Abir.*

***Rachdi Soumia***

### **Résumé**

L'antenne imprimée est l'une des meilleures structures de l'antenne en raison de son poids léger sa couche fine, un enchevêtrement minimal et son faible coût. Ce travail concerne la simulation et la conception d'une antenne patch carré à base de Graphene, les simulations sont faites sous le simulateur électromagnétique CST.

Le graphène, malgré le fait qu'il soit composé d'une seule couche d'atomes, est considéré comme le matériau le plus solide qui soit : il possède une résistance à la rupture 100 fois supérieure à celle d'une couche d'acier de la même épaisseur, c'est dire qu'il est encore plus fort que le diamant.

## Abstract

The printed antenna is one of the best antenna structures due to its light weight, thin layer, minimal entanglement and low cost. This work concerns the simulation and design of a square patch antenna based on Graphene, the simulations are done under the CST electromagnetic simulator.

Graphene, despite being composed of a single layer of atoms, is considered the strongest material there is: it has a breaking strength 100 times greater than that of a layer of steel of the same thickness, that is to say that it is even stronger than the diamond.

## ملخص

يعد الهوائي المطبوع من أفضل هياكل الهوائيات نظراً لوزنه الخفيف وطبقته الرقيقة وتشابكه القليل وتكلفته المنخفضة. يتعلق هذا العمل بمحاكاة وتصميم هوائي مربع على أساس الجرافين ، ويتم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام جهاز محاكاة كهرومغناطيسي CST. على الرغم من أن الجرافين يتكون من طبقة واحدة من الذرات ، إلا أنه يعتبر أقوى مادة موجودة: فهو يتمتع بقوة كسر أكبر بمائة مرة من تلك الموجودة في طبقة من الفولاذ بنفس السماكة ، أي أنه أقوى من الألماس

# Table des matières

Chapitre 1 Généralités sur les antennes.....	2
1.1. Introduction .....	3
1.2. La définition d'antenne .....	3
1.2.1. Antenne d'émission.....	3
1.2.2. Antenne de réception .....	3
1.2.3. Réciprocité .....	3
1.3. Caractéristiques.....	4
1.3.1. La directivité ( $\theta, \varphi$ ).....	4
1.3.2. Le rendement de l'antenne .....	4
1.3.3. Le gain.....	4
1.3.4. L'Ouverture.....	5
1.3.5. Diagramme de rayonnement .....	5
1.3.6. Impédance d'entrée .....	6
1.3.7. Coefficient de réflexion $S_{11}$ .....	6
1.3.8. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) .....	7
1.3.9. La puissance totale rayonnée .....	7
1.3.10. La résistance de rayonnement.....	8
1.3.11. La bande passante .....	8
1.4. Types d'antennes.....	8
1.4.1. Antennes élémentaires.....	9
1.4.2. Antennes à réflecteurs.....	9
1.4.3. Antenne pour guide d'onde.....	10
1.4.4. Antennes imprimées (micro-ruban).....	11
1.5. Définition du patch .....	11
1.6. Domaine d'application des antennes imprimées.....	11
1.7. Les paramètres géométriques de l'antenne imprimée.....	12
1.7.1. Largeur du patch.....	12
1.7.2. Longueur du patch.....	12
1.8. Les avantages et les inconvénients des antennes patch .....	13
1.9. Les formes d'antenne patch .....	14
1.10. Les types d'alimentation .....	14
1.10.1. L'alimentation par ligne micro-ruban.....	14
1.10.2. Alimentation par sonde coaxiale .....	15

I.10.4. Alimentation par couplage de proximité.....	16
I.11. Les techniques d'adaptation .....	17
I.11.1. L'adaptation par quart d'onde .....	17
I.11.2. L'adaptation avec encoches .....	18
I.12. Conclusion .....	18
II.1. Introduction.....	23
II.2. Histoire du graphène / Découverte du graphène.....	23
II.3. Le carbone .....	24
II.4. Les formes de carbone .....	25
II.4.1. Le diamant .....	25
II.4.2. Le graphite .....	26
II.4.3. Les fullerènes .....	26
II.4.4. Les nanotubes de carbone .....	27
II.4.5. Le graphène .....	28
II.5. Propriétés du graphène.....	28
II.5.1. Propriété électronique.....	28
II.5.2. Propriété de résistance mécanique .....	29
II.5.3. Propriété de transparence optique.....	29
II.5.4. Conductivité thermique .....	30
II.6. Applications.....	30
II.7. Les polaritons plasmoniques de surface (SPP) .....	30
II.8. Propagation des vagues SPP dans le graphène .....	31
II.9. Potentiel chimique du graphène.....	33
II.10. Conclusion .....	33
III.1. Introduction.....	35
III.2. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite .....	35
III.3. Simulation d'une antenne patch rectangulaire .....	36
III.4. Antenne patch sans adaptation .....	38
III.4.1. Le coefficient de réflexion S11 d'une antenne patch sans adaptation .....	39
III.4.2. VSWR d'une antenne patch sans adaptation .....	40
III.5. Adaptation d'antenne patch .....	40
III.6. Nouveau design d'une antenne patch fonctionnant en bande U .....	44
III.6.1. La bande U .....	44
III.7. Application du Graphene.....	46
III.7.1. Le coefficient de réflexion S11.....	46
III.7.2. Rapport d'onde stationnaire (VSWR).....	47

III.7.3. Le gain.....	48
III.7.4. Le diagramme de rayonnement .....	48
III.8. Comparaison entre les paramètres d'antenne patch avec et sans graphène.....	49
III.8.1. La comparaison entre les coefficients de réflexion S11 d'antenne patch avec Graphene (en gris) et sans Graphene (en vert) .....	49
III.8.2. La comparaison entre les VSWR d'antenne patch avec Graphene (en vert) et sans Graphene (en rouge) .....	50
III.8.3. La comparaison entre les gains d'antenne patch avec Graphene (en vert) et sans Graphene (en rouge) .....	51
III.9. Effet de la variation du potentiel chimique et de la température sur une antenne patch normale.....	52
III.10. Le nouveau design avec le Graphene.....	55
III.10.1. Effet de la variation du potentiel chimique et la température sur une antenne patch avec le nouveau design .....	55
III.11. Conclusion .....	58
III.12. Conclusion générale .....	60
<b>Bibliographie .....</b>	<b>61</b>

## Liste des figures

**Figure 1** : le diagramme de rayonnement et l'angle d'ouverture

**Figure 2** : le diagramme de rayonnement de champ pour les antennes dipôles avec une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde.

**Figure 3** : S11 et VSWR.

**Figure 4** : Bande passante.

**Figure 5** : Antenne dipolaire.

**Figure 6** : Antenne à réflecteur parabolique.

**Figure 7** : Antenne cornet.

**Figure 8** : Antenne patch.

**Figure 9** : Les différents types d'éléments rayonnant.

**Figure 10** : Alimentation par ligne micro-ruban.

**Figure 11** : Alimentation par sonde coaxiale.

**Figure 12** : Alimentation par couplage d'ouverture.

**Figure 13** : Alimentation par couplage de proximité.

## Liste des figures

**Figure 14** : Adaptation par quart d'onde.

**Figure 15** : Patch adapté par encoches de longueur.

**Figure 16** : Le carbone.

**Figure 17** : Le graphène.

**Figure 18** : Géométrie des orbitaux hybrides formés par les atomes de carbone.

**Figure 19** : Diamant dans la nature (à gauche) structure du diamant (à droite).

**Figure 20** : Le graphite.

**Figure 21** : Les fullerènes.

**Figure 22** : Les nanotubes de carbone.

**Figure 23** : Représentation du graphène.

**Figure 24** : a) transistor à base de graphène. b) image par microscopie à balayage d'un transistor à base de graphène.

**Figure 25** : Capture d'écran sur le CST.

**Figure 26** : La structure d'une antenne imprimée et les paramètres géométriques de la forme rectangulaire.

**Figure 27** : Antenne Patch sans adaptation.

**Figure 28** :  $S_{11}$  en fonction de la fréquence.

**Figure 29** : VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 30** : Antenne patch adapté avec les deux méthodes, encoche et quart d'onde.

**Figure 31** :  $S_{11}$  en fonction de la fréquence.

**Figure 32** : VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 33** : Le gain en fonction de la fréquence.

**Figure 34** : Le diagramme de rayonnement polaire.

**Figure 35** : Le diagramme de rayonnement en 2D.

## Liste des figures

**Figure 36** : Le diagramme de rayonnement en 3D.

**Figure 37** : Le nouveau design d'une antenne patch.

**Figure 38** : S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 39** : Taux d'ondes stationnaires en fonction de la fréquence.

**Figure 40** : Le gain en fonction de la fréquence.

**Figure 41** : Antenne patch avec le Graphene.

**Figure 42** : S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 43** : VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 44** : Le gain en fonction de la fréquence.

**Figure 45** : Le diagramme de rayonnement.

**Figure 46** : Le diagramme de rayonnement en 3D.

**Figure 47** : S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 48** : le VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 49** : le gain en fonction de la fréquence.

**Figure 50** : S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 51** : VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 52** : Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 53** : VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 54** : Antenne patch après la simulation avec le Graphene.

**Figure 55** : S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 56** : VSWR en fonction de la fréquence.

**Figure 57** : Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence.

**Figure 58** : VSWR en fonction de la fréquence.

## Liste des tableaux

**Tableau 1** : Les paramètres géométriques d'antenne patch.

**Tableau 2** : tableau de comparaison entre les paramètres ( $S_{11}$ , VSWR, le gain) du patch sans et avec Graphene.

**Tableau 3** : un tableau comparatif entre les paramètres d'antenne patch et son nouveau design après la variation du potentiel chimique et la température.

## Liste des abréviations

**C** : célérité de la lumière dans le vide :  $C=3.10^8$  m/s

**CST** : computer simulation technologie

**D** ( $\theta, \phi$ ) : la directivité

**dB** : décibel

**f** : la fréquence

**G** : le gain

**h** : la hauteur du patch

**I** : le courant

**L** : longueur du patch

**n** : l'indice

**Nm** : nano mètre

**NTC** : les nanotubes de carbone

**Pa** : la puissance qu'une antenne isotrope rayonnera

**Pf** : la puissance fournie

**Pr** : puissance rayonnée

**Rr**: la résistance de rayonnement

**S11** : le coefficient de réflexion

**Sp** : hybridation

**SPP** : les polaritons plasmoniques de surface

**Tpa** : terapascales

**V** : la tension

**VSWR**: Voltage Standing Wave Ration

**W** : largeur du patch

**Wi Max**: world interoperability for microwave access

**$\eta$**  : le rendement de l'antenne

**2D** : 2 dimensions

**3D** : 3 dimensions

**$\lambda$**  : longueur d'onde

**$\epsilon_r$**  : permittivité relative

**$\epsilon_{\text{reff}}$**  : permittivité relative efficace

**$\mu_0$**  : perméabilité dans le vide

**$\epsilon_0$**  : permittivité dans le vide

**$2\theta$**  : l'angle d'ouverture

# Introduction Générale

## **Introduction Générale**

Les antennes sont un élément essentiel des systèmes de télécommunication sans fil. Cet élément permet à tous les utilisateurs d'accéder à la radio, à la télévision, au téléphone et à Internet, où qu'ils se trouvent. Les antennes sont situées aux deux extrémités de la liaison.

Dans le premier chapitre, on va présenter les antennes, souligner leur rôle ainsi leurs caractéristiques. Puis, on termine le chapitre en mentionnant les types d'antennes les plus célèbres. Puis on a consacré à une description générale des antennes imprimées, leurs propriétés et leurs caractéristiques, un rappel théorique sur l'antenne imprimée, une présentation sur différentes méthodes d'alimentation et d'adaptation.

Le deuxième chapitre intitulé le graphène, qui traite ses caractéristiques, formes, propriétés (électronique, mécanique, optique, thermique) ainsi que ses applications.

Le troisième chapitre a consacré à la simulation d'une antenne patch sous le simulateur CST, en commençant par l'installation de CST. Dans le dernier on présente les résultats de la simulationsuivis des commentaires et de discussions.

# **Chapitre 1 Généralités sur les antennes**

## **I.1. Introduction**

Dans les systèmes de télécommunication, les antennes sont considérées comme l'un des éléments nécessaires pour assurer la transition entre l'onde guidée (ligne de transmission et le guide d'onde) et l'onde rayonnée. Ce chapitre est dédié aux principes fondamentaux des antennes, il existe plusieurs types d'antennes telles que les antennes paraboliques, les antennes guide d'onde, les antennes élémentaires, les antennes imprimées, et antennes à réflecteurs qui font l'objet de ce chapitre.

## **I.2. La définition d'antenne**

### **I.2.1. Antenne d'émission**

Afin d'assurer la transmission dans l'air, il est nécessaire d'utiliser des équipements pour produire des ondes de rayonnement. Le rôle de l'antenne d'émission est de convertir la puissance électromagnétique guidée du générateur en puissance rayonnée. En ce sens, c'est un transducteur. [1]

### **I.2.2. Antenne de réception**

Au lieu de cela, la puissance rayonnée peut être reçue par l'antenne de réception. En ce sens, l'antenne se comporte comme un capteur et un transformateur qui convertit la puissance rayonnée en puissance électromagnétique dirigée. Il fait le même travail qu'un télescope qui capte la lumière d'une étoile et la convertit. [1]

### **I.2.3. Réciprocité**

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission, avec les mêmes caractéristiques de rayonnement, et son fonctionnement est dit réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus tard. Dans certains cas particuliers ou l'antenne contient des matériaux non linéaires voire anisotropes, ils ne sont pas réciproques. Du fait de la réciprocité des antennes, il n'y a aucune différence de rayonnement en émission ou en réception. Les qualités à annoncer pour l'antenne seront dans les deux modes de fonctionnement et dans la plupart des cas ne sont pas précisées. [1]

### I.3. Caractéristiques

Indifféremment du type d'antenne et de son mode de fonctionnement, les principales caractéristiques des antennes pouvant définir ses performances sont généralement : la directivité, le rendement, le gain, l'ouverture, le diagramme de rayonnement, l'impédance d'entrée, coefficient de réflexion, le VSWR, la puissance totale rayonnée, la résistance de rayonnement, la bande passante.

#### I.3.1. La directivité ( $\theta, \varphi$ )

La directivité ( $\theta, \varphi$ ) d'une antenne dans une direction ( $\theta, \varphi$ ) est le rapport de la puissance rayonnée dans une direction donnée ( $\theta, \varphi$ ) à la puissance qu'une antenne isotrope rayonner. [2]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{(pr/4\pi)} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{pr} \quad (1)$$

#### I.3.2. Le rendement de l'antenne

L'efficacité de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance délivrée à l'antenne.

Soit :

$$\eta = \frac{pr}{pf} \quad (2)$$

Ce rapport est spécifique à la perte interne de l'antenne. [2]

#### I.3.3. Le gain

Le gain de l'antenne dans la direction est compris entre la puissance rayonnée dans une direction donnée P et la puissance qu'une antenne isotrope rayonnera sans perte.

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi(P(\theta, \varphi))}{PA} \quad (3)$$

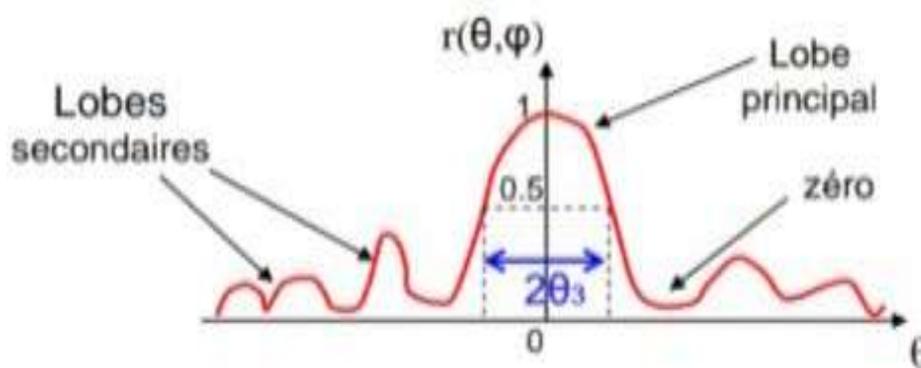
En général, le gain G correspond au gain dans la direction du rayonnement maximal ( $\theta_0, 0$ )

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

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans perte, son gain est de 1 ou 0 "dB", le gain s'exprime en "dB", car l'antenne sert de référence, parfois, on retrouve aussi l'expression "dB", quand une antenne dipôle est la référence. [2]

### I.3.4. L'Ouverture

Si  $G_m$  est le gain maximal d'une antenne pour un plan bien défini, son ouverture est ici l'angle entre deux directions planes qui a la moitié du gain maximum (gain à -3 dB). [2]



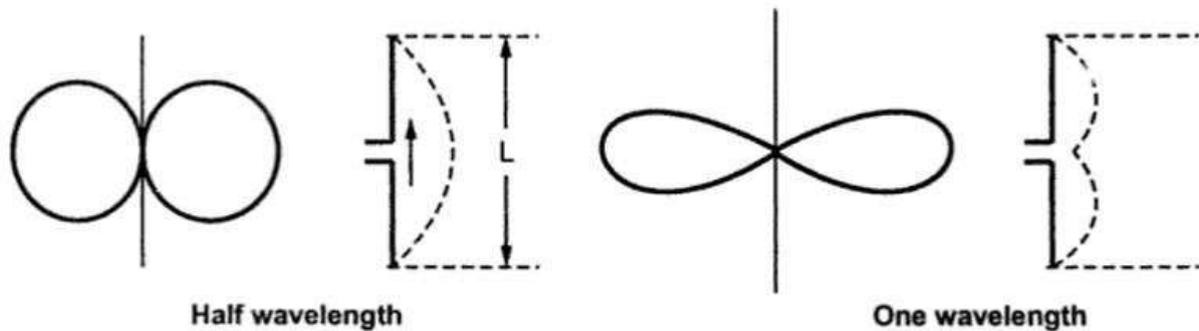
**Figure 1** : le diagramme de rayonnement et l'angle d'ouverture. [2]

### I.3.5. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement ou le diagramme d'antenne est défini comme une fonction mathématique ou une représentation graphique des propriétés de rayonnement de l'antenne en fonction de coordonnées de l'espace. En général, le diagramme de rayonnement est tracé dans un espace 3D. Cependant, étant donné qu'une figure 3D placée sur une surface 2D ne révèle pas certains aspects du diagramme, une autre approche de présentation est adoptée. Au lieu de tracer une figure polaire 3D, un tracé 2D est obtenu en considérant l'intersection de deux plans orthogonaux avec ce diagramme de rayonnement. Ces plans sont généralement les plans dans

le plan de l'antenne et perpendiculaires à la surface de l'antenne et sont connus comme le plan E et le plan H respectivement. [3]

L'image suivante montre le diagramme de rayonnement de champ pour les antennes dipôles avec une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde. [4]



**Figure 2 :** le diagramme de rayonnement de champ pour les antennes dipôles avec une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde. [4]

### I.3.6. Impédance d'entrée

#### I.3.6.1. L'impédance d'une antenne

On considère une antenne émettrice, l'antenne équivaut à la charge à l'entrée du courant existant  $I_{in}$  et de la tension  $V_{in}$ . [2]

Le rapport de ces deux grandeurs donne l'impédance  $Z_{in}$

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + j X_{in} \quad (5)$$

$R_{in}$  : La partie réactive de l'antenne, qui représente la puissance conservé dans les régions proches du champ rayonné.

$X_{in}$  : La partie active est reliée aux champs rayonnés et une puissance perdue par effet de joules

### I.3.7. Coefficient de réflexion $\Gamma$

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  met en évidence l'absorption d'énergie de l'antenne, c'est en fonction de ce paramètre que nous nous basons sur le processus d'optimisation.

La réflectance peut être déterminée comme suit : [2]

$$S_{11} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad (6)$$

Avec :

$V_r$  : Amplitude de l'onde réfléchie.

$V_i$  : Amplitude de l'onde incidente.

La réflectance est généralement exprimée en décibels et notée  $|S_{11}|$  et se définit comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad (7)$$

### **I.3.8. Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)**

Pour que les antennes -antenne fonctionnent efficacement, la transmission maximale doit être entre l'émetteur et l'antenne, cette transmission ne se produirait pas sans correspondance entre l'entrée et l'émetteur. [2]

Le VSWR est donné par Markov par :

$$VSWR = \frac{(1+|S_{11}|)}{(1-|S_{11}|)} \quad (8)$$

### **I.3.9. La puissance totale rayonnée**

C'est une puissance rayonnait dans l'espace. Elle est calculée en intégrant U par rapport à l'angle solide de l'espace visible, c'est à dire  $4\pi$ .

$$PTOT = \iint P(\theta, \varphi) d\theta d\varphi (\omega/m^2) \quad (9)$$

### I.3.10. La résistance de rayonnement

Lorsque la puissance rayonnée est liée à la puissance dissipée par la charge, la résistance au rayonnement de la fonction caractéristique peut être déterminée.

$$R_r = \frac{80\pi^2 d\varphi^2}{\lambda^2} \quad (10)$$

### I.3.11. La bande passante

La bande passante de l'antenne correspond à la bande de fréquence dans laquelle le transfert d'énergie de la source vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal.

Afin d'optimiser la bande passante, il est possible d'agir directement sur l'antenne pour modifier son impédance ou ajoutez un élément d'adaptation.

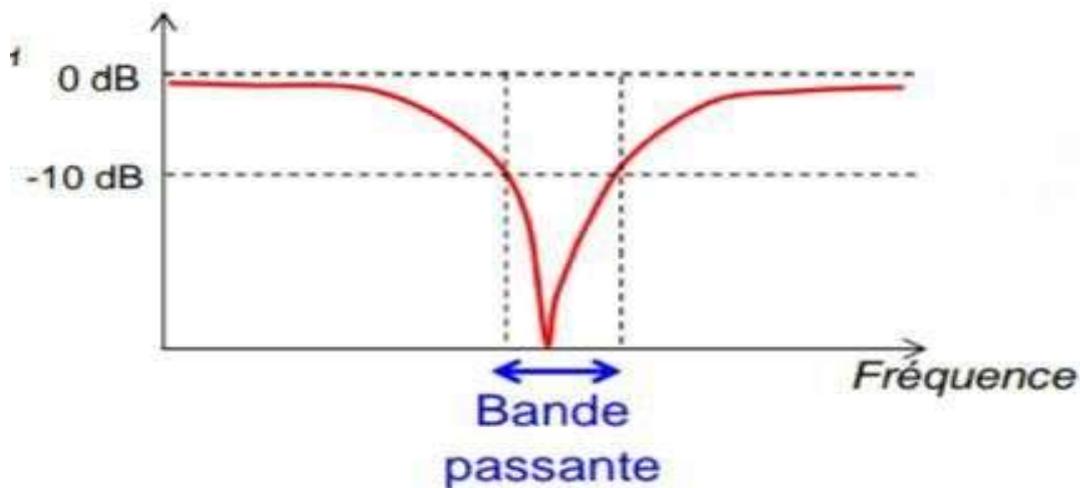


Figure 4 : Bande passante. [2]

## I.4. Types d'antennes

Maintenant que nous avons vu un peu de choses sur les antennes en général et pourquoi nous utilisons des antennes, poursuivons et examinons les différents types d'antennes. Il existe plusieurs types d'antennes et chaque ouvrage de littérature a sa propre classification des antennes.

### **I.4.1 Antennes élémentaires**

Plus simple et moins chère ce type d'antenne n'a dans sa classe qu'une polarisation linéaire, on peut parler d'antennes isotropes, dipôles ou doubles demi-ondes d'une longueur l'élément fait la moitié de sa longueur, et une antenne monopôle est constituée d'un conducteur élément d'un quart de longueur d'onde. [2]



**Figure 5 :** Antenne dipolaire. [5]

### **I.4.2. Antennes à réflecteurs**

L'antenne à réflecteur est la plus populaire dans les systèmes d'antenne des engins spatiaux en raison de sa simplicité structurelle et de sa légèreté. Il s'agit également d'une conception éprouvée. Le principal inconvénient est que le réflecteur doit être décalé pour éviter de bloquer le point d'alimentation. Ce décalage élimine la symétrie de rotation de l'ouverture optique, et la plage de balayage est limitée à quelques largeurs de bande. Une antenne à réflecteur peut être constituée de plusieurs réflecteurs, dont la surface peut être parabolique, hyperbolique, ellipsoïde ou sphéroïde. L'antenne à réflecteur la plus populaire est la parabolique. [6]



**Figure 6 :** Antenne à réflecteur parabolique. [7]

#### **I.4.3. Antenne pour guide d'onde**

Une antenne cornet utilisée dans les micro-ondes est une ouverture rayonnante excitée par un directeur ou monopôle, qui a une forte directivité et un gain élevé.

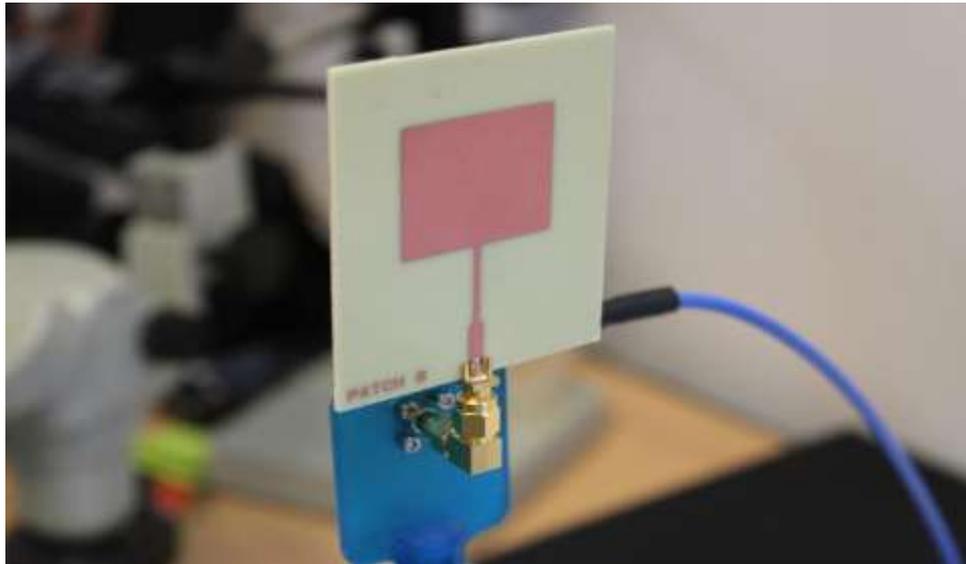
On a également trouvé des antennes à fentes constituées de réseaux de fentes rayonnantes, qui sont des réseaux de dipôles ouverts sur des rails. C'est facile à fabriquer, et on l'utilise de plus en plus, notamment dans les radars de surveillance maritime. [2]



**Figure 7 :** Antenne cornet. [8]

#### **I.4.4. Antennes imprimées (micro-ruban)**

Connue sous le nom d'antenne patch, une antenne imprimée est un type d'antenne qui a été développé et utilisé de plus en plus fréquemment, constitué d'un diélectrique avec un plan de masse métallique d'un côté et une gravure métallique de l'autre pour supporter les courants de surface qui génèrent rayonnement électromagnétique. Ainsi, le courant est transféré du générateur à l'entrée par la ligne micro-ruban. [2]



**Figure 8 :** Antenne patch. [9]

#### **I.5. Définition du patch**

Une antenne patch microstrip est constituée d'un patch conducteur de n'importe quelle géométrie plane ou non plane sur d'un côté d'un substrat diélectrique et d'un plan de masse de l'autre côté. Il s'agit d'une antenne résonante imprimée populaire pour les liaisons sans fil micro-ondes à bande étroite qui nécessitent une couverture semi-hémisphérique. En raison de sa configuration plane et de sa facilité d'intégration à la technologie des microbandes, l'antenne patch microbande a fait l'objet de nombreuses études, souvent utilisée comme éléments d'un réseau. [10]

#### **I.6. Domaine d'application des antennes imprimées**

Les domaines d'applications des antennes imprimées sont de plus en plus variés, les principales applications sont : [10]

- La communication mobile et par satellite

- Le système de positionnement global
- Identification par radiofréquence (RFID)
- Interopérabilité mondiale pour l'accès aux micro-ondes (WiMax)
- Le radar

## I.7. Les paramètres géométriques de l'antenne imprimée

### I.7.1. Largeur du patch

La largeur du patch a peu d'effet sur la fréquence de résonance et le diagramme de rayonnement de l'antenne. D'autre part, elle agit sur l'impédance d'entrée de l'antenne (sur les bords) et sa bande passante à la résonance : [11]

$$RIN = \frac{90sr^2}{sr - 1(L/W)^2} \quad (11)$$

Afin de permettre à l'antenne de bien fonctionner, la largeur réelle est de :

$$W = \left(\frac{c}{2f_{01}}\right) \sqrt{\frac{2}{sr+1}} \quad (12)$$

Où le terme  $f_{01}$  représente la fréquence de résonance fondamentale de l'antenne. Par contre, l'histogramme est légèrement atténué, il montre quelques lobes secondaires. [11]

Avec :  $c$  la vitesse de la lumière ( $c=3 \times 10^8$ m/s)

### I.7.2. Longueur du patch

La longueur du patch caractérise les fréquences de résonance de l'antenne.

En plus de cela, n'oubliez pas de soustraire les deux longueurs  $L$  correspondant au débordement des champs. [11]

$$L = \left( \frac{\lambda_{\text{g dielectric}}}{2} \right) - 2\Delta L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{r eff}}}} - 2\Delta L \quad (13)$$

La longueur  $L$  doit être inférieure à la longueur d'onde dans le diélectrique.

A cette fréquence de fonctionnement,  $\Delta$  dépend de la constante diélectrique efficace.

L'effet de débordement du champ électrique rend le patch plus grand que sa taille physique.

Par conséquent, L'augmentation  $L$  du côté du patch. [11]

$$\Delta L = 0.421 \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (14)$$

Alors la dimension effective du patch sera :

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (15)$$

## I.8. Les avantages et les inconvénients des antennes patch

L'antenne patch microstrip présente plusieurs avantages par rapport aux antennes micro-ondes conventionnelle avec une similitude de gamme de fréquences de 100 MHz à 100 GHz identique dans les deux types, les différents avantages et inconvénients sont les suivants :

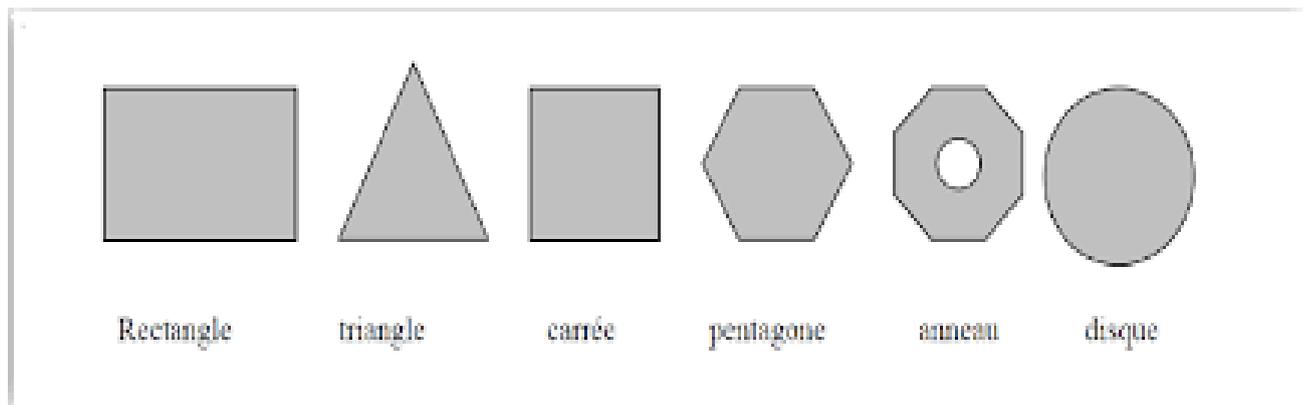
- Un poids léger et peu de volume.
- Probabilité d'incorporer directement des composants dynamiques sur un substrat similaire (oscillateurs, modulateurs...).
- Simples, solides et peu encombrant.
- La capacité de se conformer aux surfaces courbes (ailerons, missiles, etc.).
- En raison du faible coût de production, ils peuvent être produits en grande quantité.
- Une fine couche et un enchevêtrement minimal.
- Ils peuvent être polarisés linéairement ou circulairement en changeant simplement le lieu d'alimentation.

Cependant elles présentent certains inconvénients tels que : [11]

- Faible productivité.
- Faible capacité de transmission.
- La pureté de polarité est difficile à obtenir.
- Une bande passante faible. (1 à 5%).

### I.9. Les formes d'antenne patch

L'antenne patch microstrip peut avoir n'importe quelle forme, mais les formes rectangulaires, circulaires, triangulaires et elliptiques sont les plus courantes. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont généralement photogravés sur le substrat diélectrique. Il y a d'autres formes comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure 9** : les différents types d'éléments rayonnant. [12]

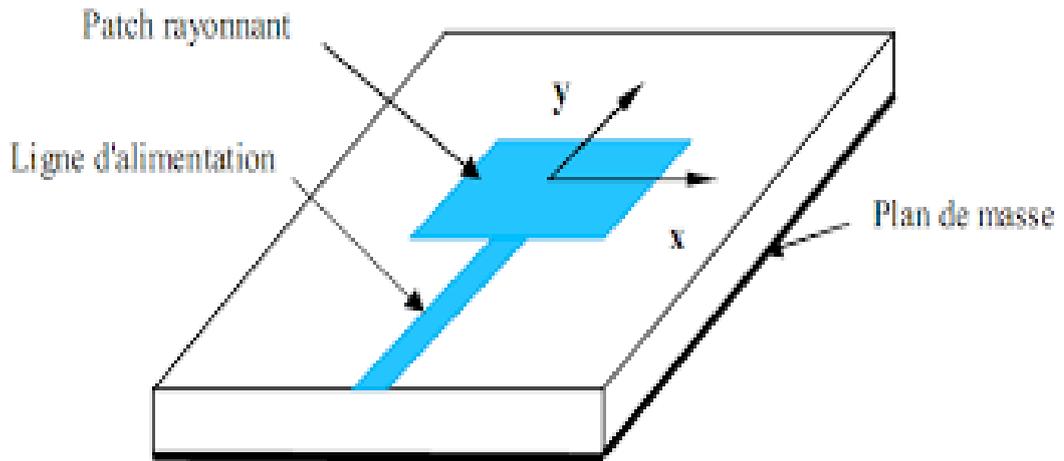
### I.10. Les types d'alimentation

Il existe de nombreuses techniques d'alimentation et les quatre techniques les plus populaires sont coaxiale, la ligne microruban, le couplage d'ouverture et le couplage de proximité.

#### I.10.1. L'alimentation par ligne micro-ruban

L'alimentation par ligne micro-ruban est l'une des méthodes les plus faciles à fabriquer puisqu'il s'agit d'une simple bande conductrice se connectant au patch

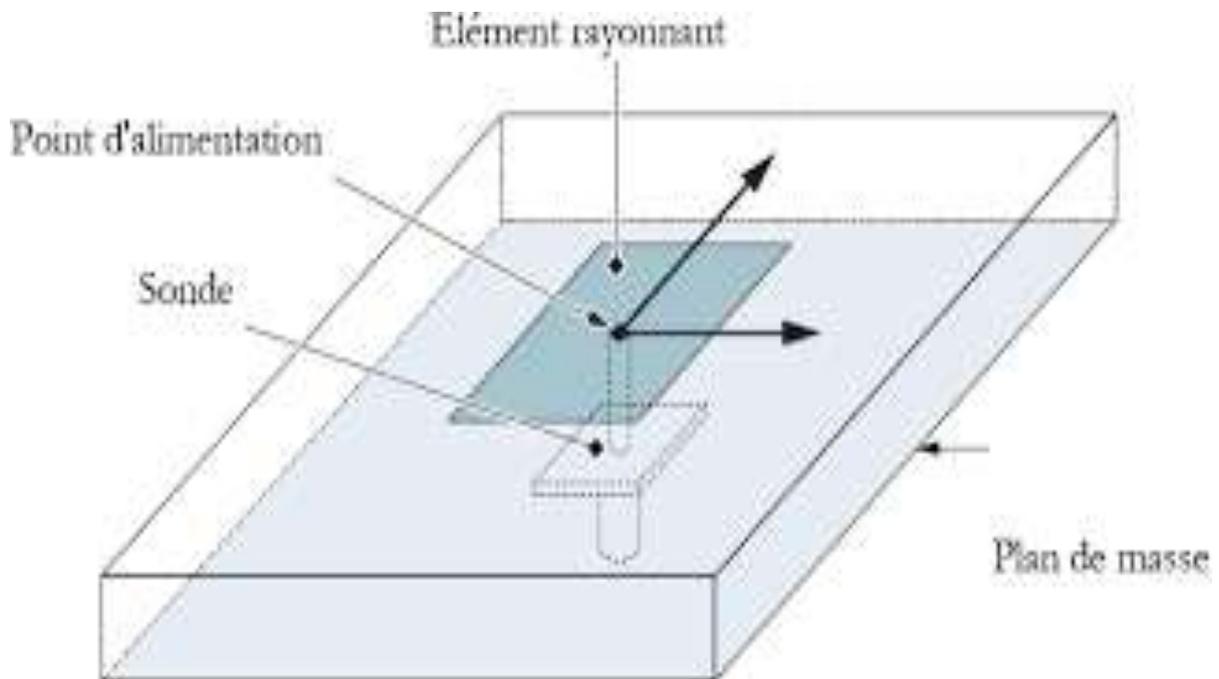
et peut donc être considérée comme une extension du patch. Elle est simple à modéliser et facile à adapter en contrôlant la position d'insertion. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que lorsque l'épaisseur du substrat augmente, les ondes de surface et le rayonnement parasite d'alimentation augmentent, ce qui limite la bande passante. [10]



**Figure 10 :** Alimentation par ligne micro-ruban. [13]

### I.10.2. Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est une méthode d'alimentation dans laquelle le conducteur intérieur du coaxial est fixé au rayonnement de l'antenne tandis que le conducteur extérieur est connecté au plan de masse. Les avantages de l'alimentation coaxiale est facile à fabriquer, facile à adapter, faible rayonnement parasite. Et ses inconvénients sont une bande passante étroite, difficile à modéliser, surtout pour les substrats épais. [10]



**Figure 11 :** Alimentation par sonde coaxiale. [14]

### I.10.3. Alimentation par couplage d'ouverture

L'alimentation à couplage d'ouverture est constituée de deux substrats différents séparés par un plan de masse. Sur la face inférieure se trouve une ligne d'alimentation microstrip dont l'énergie est couplée au patch par une fente sur le plan de masse séparant les deux substrats. Cette disposition permet une optimisation indépendante du mécanisme d'alimentation et de l'élément rayonnant. Normalement, le substrat supérieur utilise un substrat épais à faible constante diélectrique tandis que pour le substrat inférieur, il s'agit d'un substrat à haute constante diélectrique. Le plan de masse qui se trouve au milieu, isole l'alimentation de l'élément de rayonnement et minimise l'interférence du rayonnement parasite pour la formation du motif et la pureté de la polarisation. L'avantage est de permettre une optimisation indépendante de l'élément du mécanisme d'alimentation. [10]

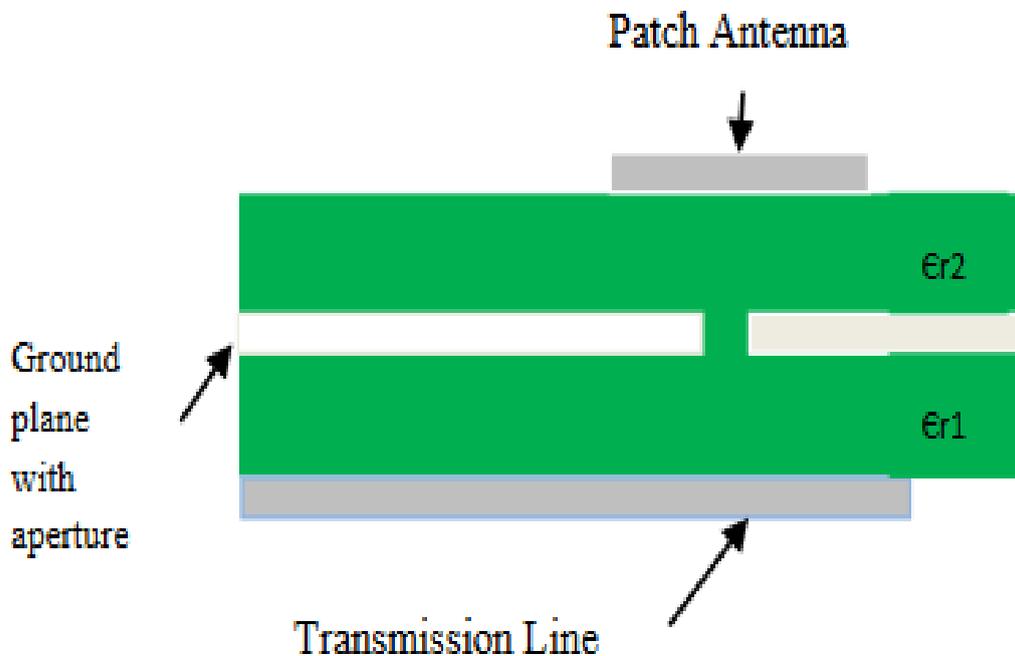


Figure 12 : Alimentation par couplage d'ouverture. [10]

### I.10.4. Alimentation par couplage de proximité

Le couplage de proximité présente la plus grande largeur de bande, à faible rayonnement parasite. Cependant, la fabrication est difficile, le rapport largeur/longueur du patch est utilisé pour contrôler l'adaptation, son mécanisme de couplage est capacitif par nature. L'inconvénient majeur de cette technique d'alimentation est qu'elle est difficile à fabriquer en raison des deux couches diélectriques qui doivent être correctement alignées. Il y a également une augmentation de l'épaisseur totale de l'antenne [10].

## I.11. Les techniques d'adaptation

### I.11.1. L'adaptation par quart d'onde

Dans la construction des circuits hyperfréquences, l'adaptation est souvent recherchée, il s'agit de passer à une impédance différente (généralement l'impédance caractéristiques) sont obtenus à partir de la fin du circuit. [15]

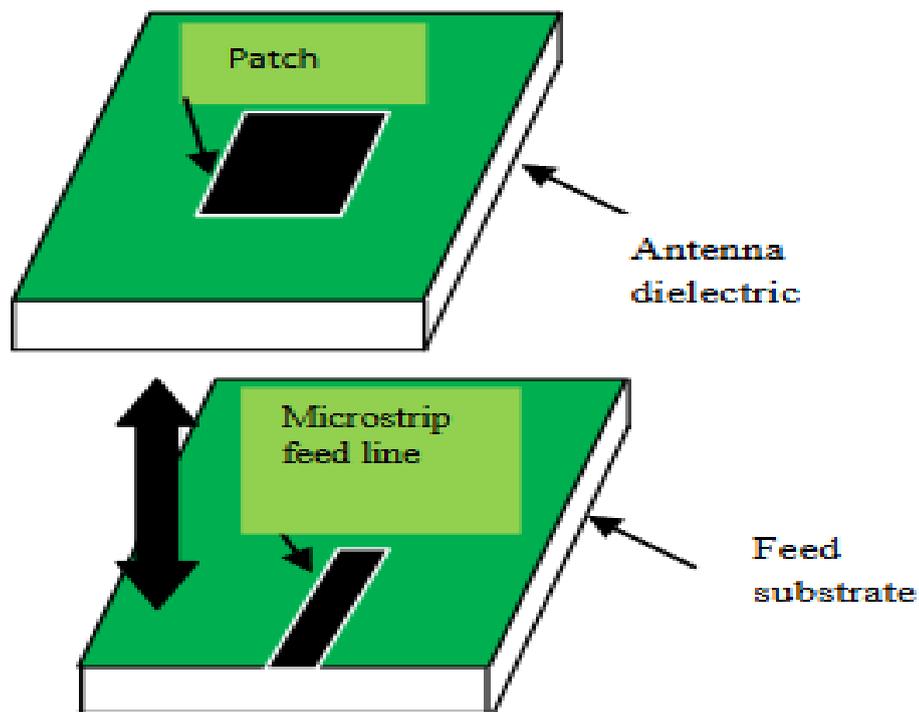


Figure 13 : Alimentation par couplage de proximité. [10]

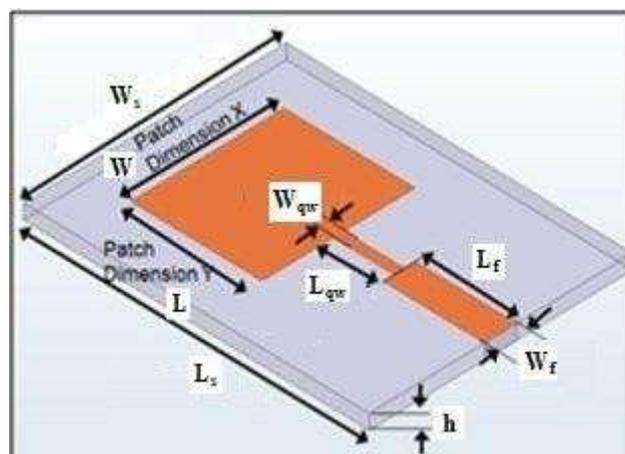
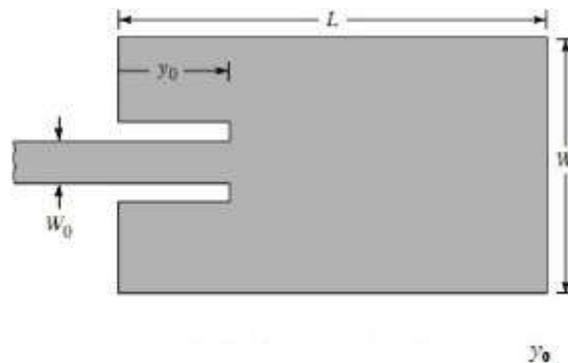


Figure 14 : adaptation par quart d'onde.

### I.11.2. L'adaptation avec encoches

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du patch (agissant comme des stubs) [15]



**Figure 15 :** patch adapté par encoches de longueur.

### I.12. Conclusion

En conclusion, on peut dire qu'une antenne a des propriétés et caractéristiques, qui sont valorisées, il existe plusieurs techniques pour les mettre en œuvre et pour s'assurer que cela fonctionne, nous devons choisir la technologie la plus approprié dépend de l'application envisagée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue globale sur les antennes, les types, leur application, les techniques d'alimentation et ses différentes caractéristiques, nous avons également fait un rappel théorique sur l'antenne imprimée (patch), ses différentes formes, leurs avantages et inconvénients, les paramètres géométriques, les domaines d'applications ainsi que leurs types d'alimentation.

# **Chapitre 2**

# **Le Graphène**

## II.1. Introduction

Le carbone est l'élément de base de la vie sur terre et l'un des principaux composants des êtres vivants. Ainsi, la chimie organique trouve son origine dans la chimie que l'on peut définir comme le carbone et ces composés. Le carbone peut créer des liaisons chimiques de trois géométries et longueurs différentes, simples, doubles ou triples. Ces trois liaisons différentes conduisent à la formation de diverses structures allotropiques du carbone, sous forme de carbone amorphe (charbon) et cristallin, de diamant, de graphite et de graphène.



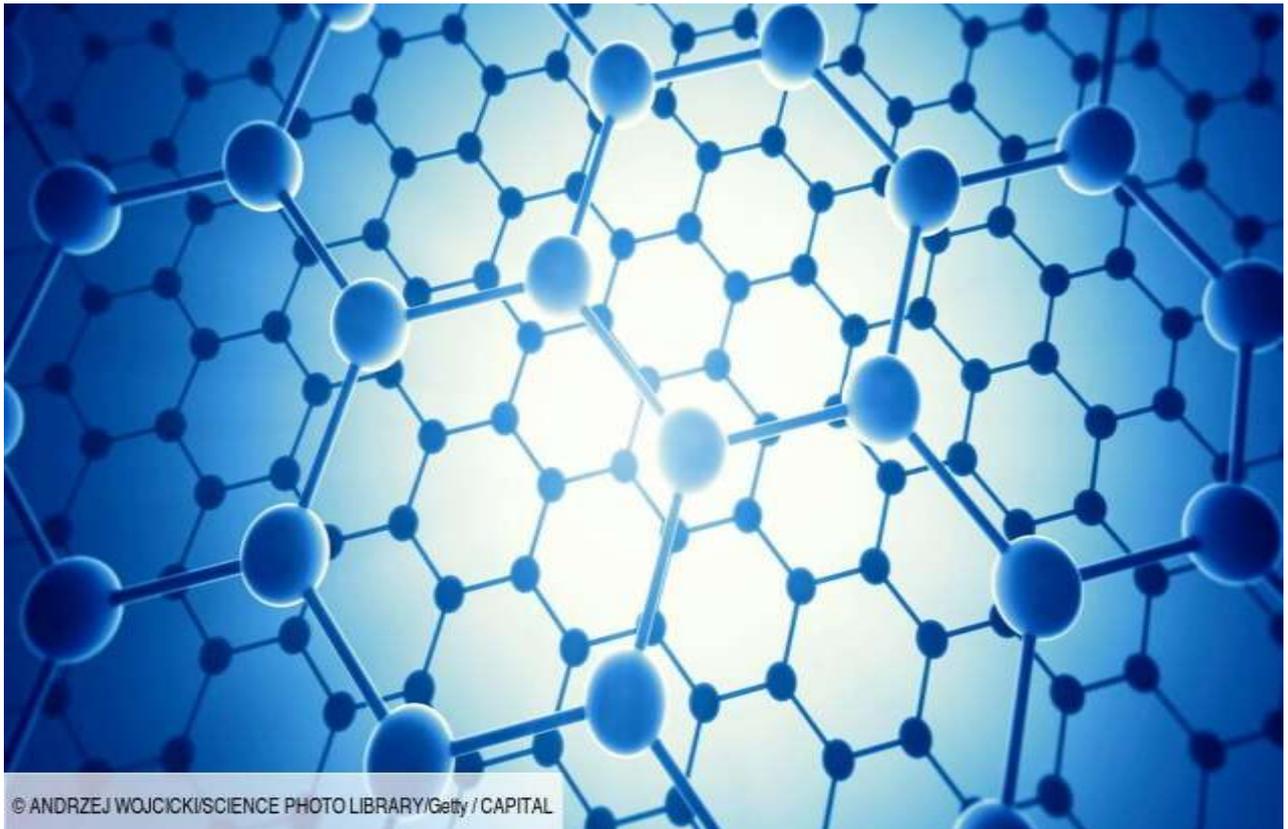
**Figure 16 :** le carbone. [16]

## II.2. Histoire du graphène / Découverte du graphène

Le graphène a été découvert par les professeurs de l'Université de Manchester Andrei Heim et Konstantin Novoselov en 2004 et a remporté le prix Nobel en 2010. Les chercheurs n'y croyaient pas, mais ont utilisé du ruban adhésif d'un rouleau de ruban adhésif pour y coller les fragments de graphite, puis ils ont plié le ruban avec la face adhésive recouverte de graphite. En le dépliant, ils ont réduit son épaisseur. Et ainsi de suite... Au final, il ne reste qu'une seule

couche de graphite. La découverte d'André Heim lui a valu un prix Nobel : le cristal de carbone le plus fin, d'un seul atome d'épaisseur. Depuis 2004, il suscite un engouement extraordinaire et suscite des recherches allant des plus élémentaires aux plus pratiques.

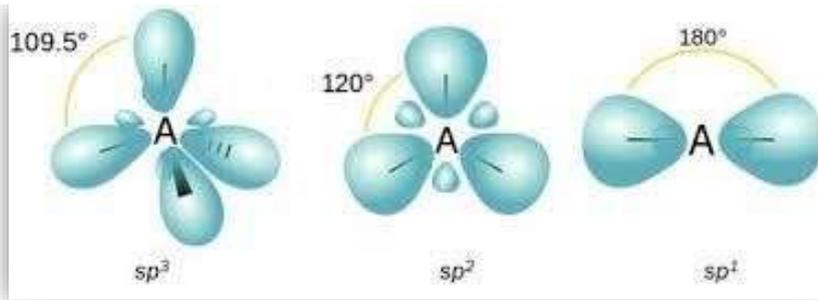
Aujourd'hui, la recherche sur le graphène dispose de moyens très importants, notamment en Europe, où l'Union européenne a investi 1 milliard d'euros en 10 ans.



**Figure 17** : le graphène. [17]

### **II.3. Le carbone**

Le carbone est un élément chimique portant le symbole C et le numéro atomique 6. Il est non métallique et tétravalent, ce qui signifie que quatre électrons sont disponibles pour former des liaisons chimiques covalentes, ce qui lui permet de former trois hybridations différentes Les clés  $sp^1$ ,  $sp^2$  et  $sp^3$ , dont la géométrie est comme indiqué ci-dessous. Il appartient au groupe 14 du tableau périodique. Le carbone ne constitue qu'environ 0,025 % de la croûte terrestre. Le carbone est l'un des rares éléments connus depuis l'Antiquité. [18]:



**Figure 18 :** géométrie des orbitaux hybrides formés par les atomes de carbone. [19]

## II.4. Les formes de carbone

Le carbone peut prendre plusieurs formes tels que : le diamant, le graphite, le fullerène, les nanotubes de carbone et le graphène. [19]

### II.4.1. Le diamant

Le diamant est un allotrope du carbone. Il s'agit d'une forme solide de carbone qui a une forme tridimensionnelle. En outre, chaque atome de carbone est lié à quatre autres atomes de carbone par une liaison chimique covalente. Cette structure cristalline est appelée structure "diamant cubique". En outre, parmi tous les matériaux naturels, ce composé présente la dureté et la conductivité thermique les plus élevées. C'est pourquoi le diamant est couramment utilisé dans l'industrie pour les outils de coupe et de polissage. [20]



**Figure 19 :** diamant dans la nature (à gauche) structure du diamant (à droite). [19]

#### II.4.2. Le graphite

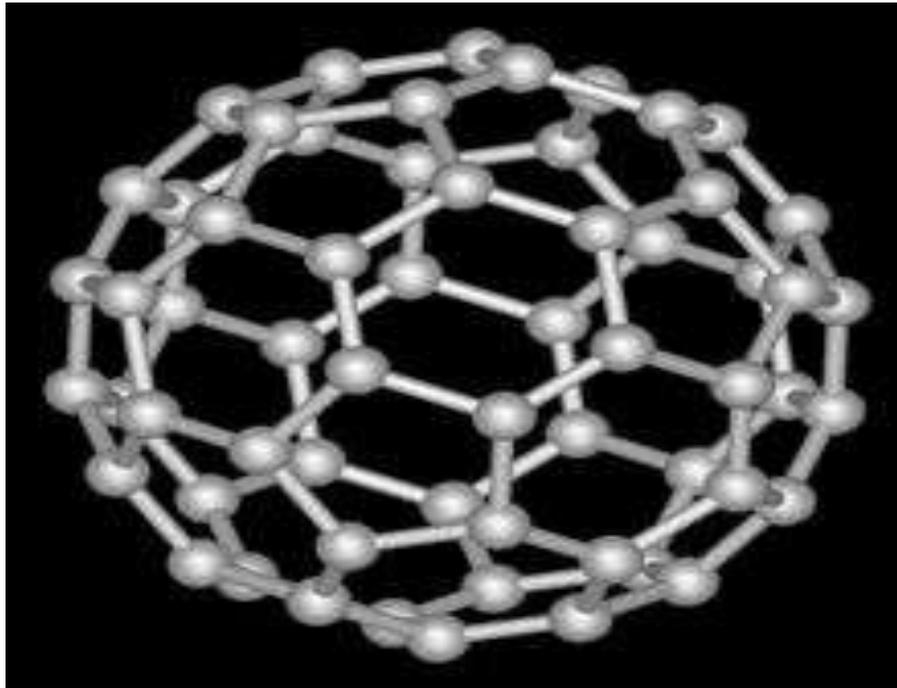
Le graphite est la forme de carbone la plus stable à pression et température ambiante. Il se présente sous la forme d'un solide noir, doux, souple, brillant et métallique. Il est constitué d'atomes de carbone hybridés  $SP^2$  en couches superposées d'une structure plane. Dans chaque couche, les atomes sont disposés dans une grille "en nid d'abeilles". [19] Nous pouvons trouver ce composé comme constituant dans les roches métamorphiques et ignées. Il s'agit d'un minéral qui présente des caractéristiques extrêmes, utiles pour les besoins industriels. Par exemple, il est extrêmement mou, et peut donc se fendre sous une légère pression. De plus, il a une gravité spécifique très faible. En revanche, cette substance est extrêmement résistante à la chaleur. Elle est quasiment inerte au contact de tout autre matériau. [21]



**Figure 20 :** le graphite. [22]

#### II.4.3. Les fullerènes

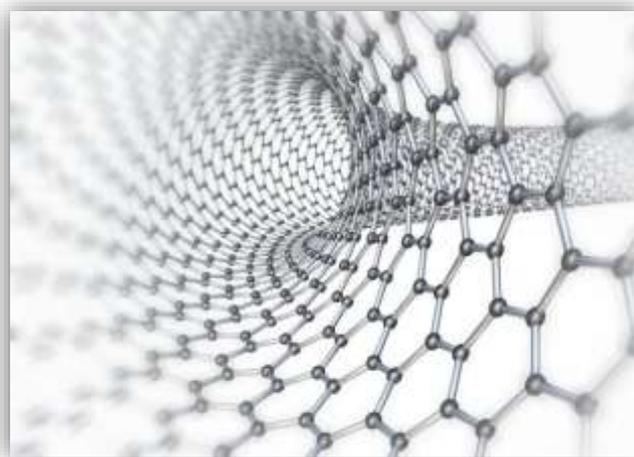
Les fullerènes sont des molécules composées de carbone dont les formes rappellent des sphères, des ellipsoïdes, des tubes (appelés nanotubes) ou des anneaux. Les fullerènes sont similaires au graphite et se composent de feuilles collées d'anneaux hexagonaux, mais contiennent des anneaux pentagonaux et parfois heptagonaux, qui empêchent la feuille de s'aplatir. [23]



**Figure 21** : les fullerènes. [24]

#### **II.4.4. Les nanotubes de carbone**

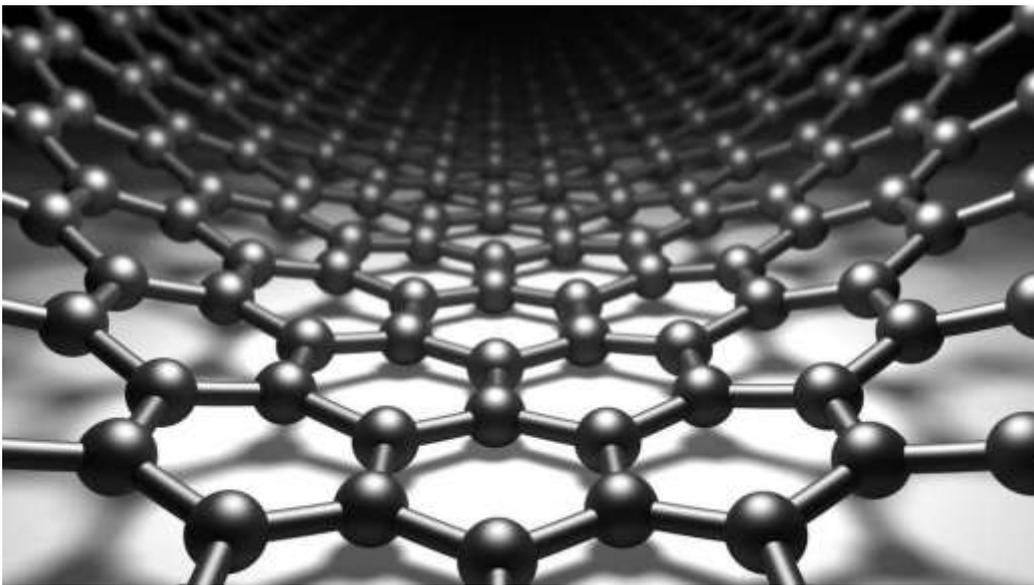
Les nanotubes de carbone (NTC) sont des molécules cylindriques constituées de feuilles enroulées d'atomes de carbone en simple couche (graphène). Ils peuvent être à paroi unique (SWCNT) avec un diamètre inférieur à 1 nanomètre (nm) ou à parois multiples (MWCNT), constitués de plusieurs nanotubes reliés entre eux de manière concentrique, avec des diamètres atteignant plus de 100 nm. Leur longueur peut atteindre plusieurs micromètres, voire des millimètres. [25]



**Figure 22** : les nanotubes de carbone. [26]

#### **II.4.5. Le graphène**

Le graphène a été isolé expérimentalement du graphite pour la première fois en 2004, et sa découverte a suscité un énorme intérêt scientifique aux niveaux fondamental et appliqué. Le graphène est un cristal bidimensionnel (2D) constitué d'un simple plan d'atomes de carbone, qui est hybride  $sp^2$  et régulièrement réparti sur un réseau hexagonal en forme de nid d'abeille, qui est une couche d'épaisseur atomique et représente l'unité de base du graphite. Il est une substance remarquable en soi, dotée d'une multitude de propriétés étonnantes qui lui ont valu le titre de "matériau miracle". [19]



**Figure 23** : représentation du graphène. [27]

#### **II.5. Propriétés du graphène**

Le graphène possède des propriétés inhabituelles qui ont l'avantage de répondre à un certain nombre de défauts présents dans d'autres matériaux, comme les nanotubes, le graphite, etc.

Ces propriétés comprennent :

##### **II.5.1. Propriété électronique**

L'une des raisons pour lesquelles les chercheurs en nanotechnologie travaillant sur l'électronique moléculaire sont si enthousiastes à l'égard du graphène réside dans ses propriétés électroniques : il s'agit de l'un des meilleurs conducteurs électriques sur Terre. La disposition atomique unique des atomes de carbone dans le graphène permet à ses électrons de se déplacer

facilement à une vitesse extrêmement élevée sans risque important de dispersion, ce qui permet d'économiser une énergie précieuse généralement perdue dans d'autres conducteurs.

Les scientifiques ont découvert que le graphène reste capable de conduire l'électricité même à la limite d'une concentration de porteurs nominale nulle, car les électrons ne semblent pas ralentir ou se localiser. Les électrons qui se déplacent autour des atomes de carbone interagissent avec le potentiel périodique du réseau en nid d'abeille du graphène, ce qui donne naissance à de nouvelles quasi-particules qui ont perdu leur masse, ou masse au repos (les fermions de Dirac sans masse). Cela signifie que le graphène ne cesse jamais de conduire. On a également constaté qu'ils se déplacent beaucoup plus rapidement que les électrons des autres semi-conducteurs. [28]

### **II.5.2. Propriété de résistance mécanique**

Les premières mesures de propriétés mécaniques ont été publiées en 2008, elles parlaient de forces de rupture de l'ordre de 40 Nm<sup>-1</sup>, le graphène a une excellente stabilité, ce qui a été obtenu par la réalisation de films de graphène en suspension en l'absence de substrat Il a été prouvé que cela affirme la stabilité de ce dernier, un matériau 100 fois plus résistant que l'acier. En plus de sa résistance mécanique, il a la particularité d'être le matériau le plus élastique, avec une élasticité égale à 0,5 terapascals (Tpa), il peut donc être plié puis déplié. [29]

### **II.5.3. Propriété de transparence optique**

Les propriétés optiques du graphène sont aussi fascinantes que les propriétés apparaissent car, si elles répondent remarquablement bien aux lois fondamentales, elles réservent également le potentiel de découverte de nouveaux phénomènes. D'une part, les propriétés physiques du système garantissent que l'absorption de la lumière sur une large gamme d'énergies peut être décrite par des constantes fondamentales. Les mesures montrent que le graphène a une atténuation d'environ 2,3 % pour la lumière visible, et la bonne transmission de la lumière indique ses importantes applications électro-optiques. Combiné à la conductivité métallique élevée du graphène, il est en effet envisagé de remplacer le matériau semi-conducteur ITO (Indium tin Oxide) pour la fonction de transparence contrôlée électroniquement des écrans à cristaux liquides à partir de graphène dans des films à faible transparence (80%). [29]

#### **II.5.4. Conductivité thermique.**

Le graphène est connu comme un cristal bidimensionnel et sa conductivité thermique dépasse celle du diamant. La conductivité thermique augmente à  $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$  en raison de l'absence d'interaction avec d'autres couches, et une étude récente montre que les monocouches de graphène exfoliées sur silicium peuvent maintenir une conductivité thermique plus élevée que le cuivre, c'est de loin le meilleur conducteur thermique connu, une propriété qui ouvre de nombreuses possibilités d'applications en électronique, où la chaleur est l'un des principaux problèmes rencontrés pour réduire la taille et augmenter la densité des composants. [29] Puisque la densité de porteurs du graphène non dopé est relativement faible, la contribution électronique à la conductivité thermique (loi de Wiedemann-Franz) est négligeable. [30]

#### **II.6. Applications**

Les nanomatériaux à base de graphène ont de nombreuses applications prometteuses dans les domaines liés à l'énergie. Voici quelques exemples récents : Le graphène améliore à la fois la capacité énergétique et le taux de charge des batteries rechargeables ; le graphène activé permet d'obtenir des supercondensateurs de qualité supérieure pour le stockage de l'énergie ; les électrodes en graphène pourraient conduire à une approche prometteuse pour la fabrication de cellules solaires légères, flexibles et peu coûteuses ; et les tapis de graphène multifonctionnels sont des substrats prometteurs pour les systèmes catalytiques.

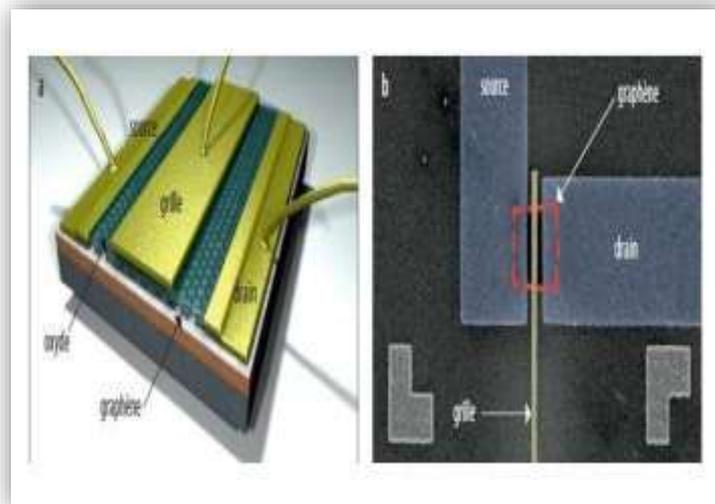
Ces exemples mettent en évidence les quatre principaux domaines liés à l'énergie dans lesquels le graphène aura un impact : les cellules solaires, les supercondensateurs, les batteries en graphène et la catalyse pour les piles à combustible. [31]

#### **II.7. Les polaritons plasmoniques de surface (SPP)**

Les polaritons plasmoniques de surface (SPP) aux interfaces métal-diélectrique se sont avérés être une technique fiable pour l'étude des films minces, permettant de déduire des propriétés telles que les constantes optiques et diélectriques, l'épaisseur du film, et les inhomogénéités aux interfaces avec une grande précision ~pour une vue d'ensemble. De plus, il a été découvert récemment que les SPP jouent un rôle crucial dans le développement de l'énergie.

SPP jouent un rôle crucial dans la transmission extraordinairement élevée de la lumière à travers des réseaux de trous sub-longueur d'onde. Grâce aux SPP, la lumière peut être concentrée et contrôlée sur des échelles de longueur beaucoup plus petites que la longueur d'onde.

En conséquence, un nouveau domaine de recherche prometteur appelé plasmonique a vu le jour, l'un de ses principaux objectifs étant la fabrication de circuits photoniques à l'échelle nanométrique. [32]



**Figure 24 :** a) transistor à base de graphène. b) image par microscopie à balayage d'un transistor à base de graphène. [29]

## II.8. Propagation des vagues SPP dans le graphène

Le graphène présente d'excellentes conditions pour la propagation des polaritons plasmoniques de surface (SPP), des ondes électromagnétiques guidées le long d'une interface métal-diélectrique qui sont générées par un rayonnement haute fréquence incident générées par un rayonnement incident à haute fréquence. En effet, une couche de graphène libre supporte des ondes SPP à magnétisme transversal SPP avec un indice de mode effectif  $n_{eff}$  donné par :

$$n_{eff}(\omega) = \sqrt{1 - 4 \frac{\mu_0}{s_0} \frac{1}{\sigma(\omega)^2}} \quad (16)$$

Où  $\sigma(\omega)$  est la conductivité du graphène en fonction de la fréquence. Il devient alors clair, pour modéliser la propagation des ondes SPP dans les graphènes, nous devons d'abord étudier la conductivité du graphène. Puisque les graphènes ont une taille envisagée de l'ordre de quelques

micromètres. Nous ne tenons pas compte dans cette analyse des effets de bord dans la conductivité du graphène.

Selon ce modèle, la conductivité de surface d'une couche de graphène infinie est calculée à l'aide du formalisme de Kubo [32]. Dans la région de fréquence qui nous intéresse (inférieure à 5 THz), la contribution intrabande de type Drude domine et elle est représentée sous une forme locale comme suit :

$$\sigma(\omega) = \frac{2 e^2}{\pi h} \frac{K_b T}{h} \ln \left[ 2 \cosh \left[ \frac{\mu c}{2 K_b T} \right] \right] \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \quad (17)$$

Où  $\tau$  est le temps de relaxation,  $T$  la température et  $\mu c$  le potentiel chimique. Une fois que la conductivité du graphène a été calculée, la propagation des ondes SPP dans les graphènes peut être étudiée.

En effet, dans un graphène, le bord de la tache de graphène agit comme un miroir et le graphène se comporte comme un résonateur pour les modes SPP. Le couplage du rayonnement électromagnétique incident avec les modes SPP correspondants conduit à des résonances dans le graphène. La condition de résonance est donnée par :

$$m \frac{\lambda}{2 n_{eff}} = L + 2 \delta L \quad (18)$$

Où  $m$  est un nombre entier déterminant l'ordre de la résonance,  $\lambda$  est la longueur d'onde du rayonnement incident,  $L$  est la longueur du graphène et  $\delta L$  est une mesure de la pénétration du champ à l'extérieur du graphène. Cette équation détermine un ensemble de  $m$  fréquences de résonance  $\omega_m$  correspondant à  $m$  modes du résonateur.

Nous considérons des graphènes d'une taille de quelques micromètres, suffisamment petits pour qu'ils puissent être intégrés dans un nanosystème. Comme l'indice de mode effectif  $n_{eff}$  dans le graphène est de l'ordre de  $10^2$ , selon ce modèle, la première fréquence de résonance des graphènes se situe dans la bande térahertz, soit environ deux ordres de grandeur en dessous de ce que l'on attendrait d'une antenne métallique inférieure de même taille. Cette différence fondamentale constitue l'une des principales raisons pour lesquelles les graphènes sont considérés comme la technologie permettant les communications sans fil entre nanosystèmes.

Ensuite, les propriétés de rayonnement des graphènes sont explorées plus en détail au moyen d'une étude paramétrique de leur fréquence de résonance basée sur la simulation. [32]

## **II.9. Potentiel chimique du graphène**

L'énergie potentielle chimique est définie comme l'énergie qui peut être absorbée ou libérée en raison du changement du nombre de particules de votre espèce. C'est la forme d'énergie potentielle contenue dans la liaison chimique qui est libérée lorsque les produits chimiques sont décomposés et que de nouveaux produits sont formés.[33]

## **II.10. Conclusion**

Ce chapitre a été dédié au nouveau matériau révolutionnaire, le graphène dont les propriétés mécaniques, électriques et thermiques sont uniques. En effet, il s'agit d'un matériau très léger extrêmement mince plus résistant à la rupture que l'acier avec une élasticité et imperméabilité incroyables. Il est doté d'une très haute conductivité électrique, les électrons se déplacent dans le graphène à une vitesse qui peut atteindre 200 fois plus que sa vitesse dans le silicium à la température ambiante. En outre, le graphène présente d'excellentes conditions pour la propagation des polaritons plasmoniques de surface (SPP). Ces propriétés exceptionnelles du graphène permettent d'envisager plusieurs applications dans la bande de fréquence allant de quelques dizaines de GHz vers quelques THz. Dans ce qui suit, nous allons présenter une nouvelle conception d'antenne patch fonctionnant en bande U à base de graphène.

# **Chapitre 3**

## **Applications et résultats**

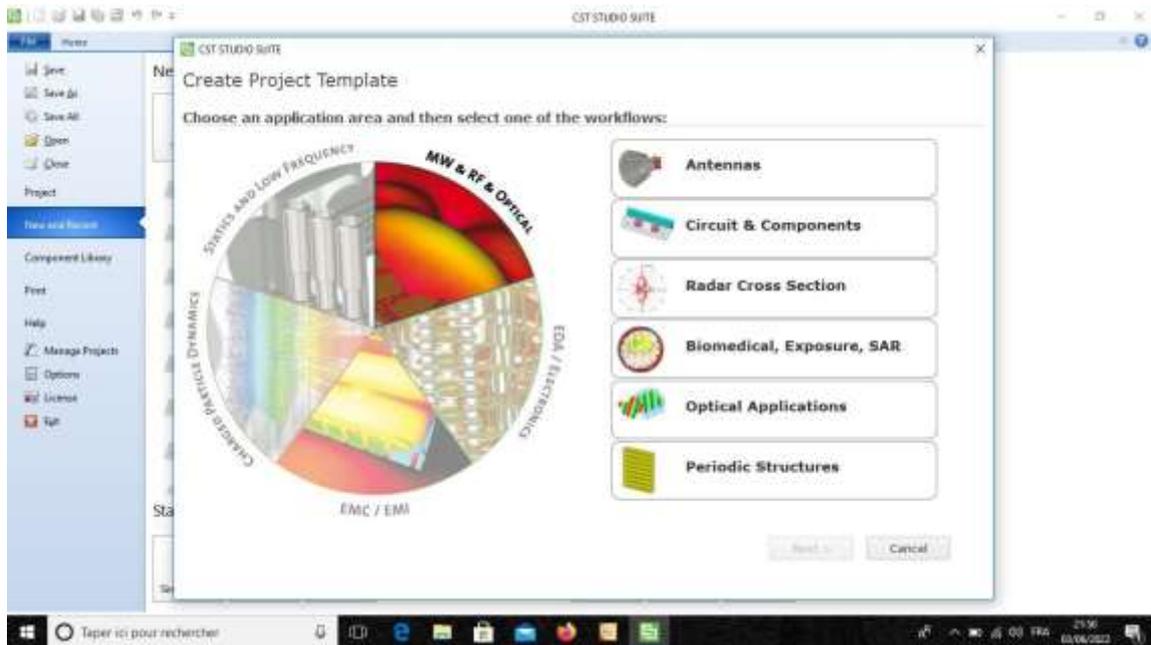
### **III.1. Introduction**

Après avoir étudié les antennes patch qui ont fait le but du troisième chapitre de ce mémoire, nous nous sommes consacrés dans ce chapitre à la présentation et à la simulation à l'aide du logiciel CST pour avoir une antenne patch à la fréquence résonance de 51GHz. La simulation est un processus très important avant n'importe quelle production, elle nous permet d'éviter les erreurs durant la réalisation et de tester les structures sur ordinateur avant d'initialiser l'implémentation physique.

La fréquence de la bande U était à l'origine utilisée pour la signalisation dans les réseaux télégraphiques, mais avec les progrès technologiques, la télégraphie est devenue de plus en plus obsolète au fil de la communication rapide des ans. Les fréquences de la bande U sont donc pour la plupart inutilisées à l'heure actuelle. Les fréquences plus élevées de la bande U, c'est-à-dire au-dessus de 55 GHz, qui font également partie de la bande V, sont utilisées pour certaines communications sans fil à haute capacité et en visibilité directe (LOS). En fait, la bande U est entièrement considérée comme une partie de la gamme inférieure de la bande V, ce qui en fait une bande unique allant de 40 à 75 GHz.

### **III.2. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite**

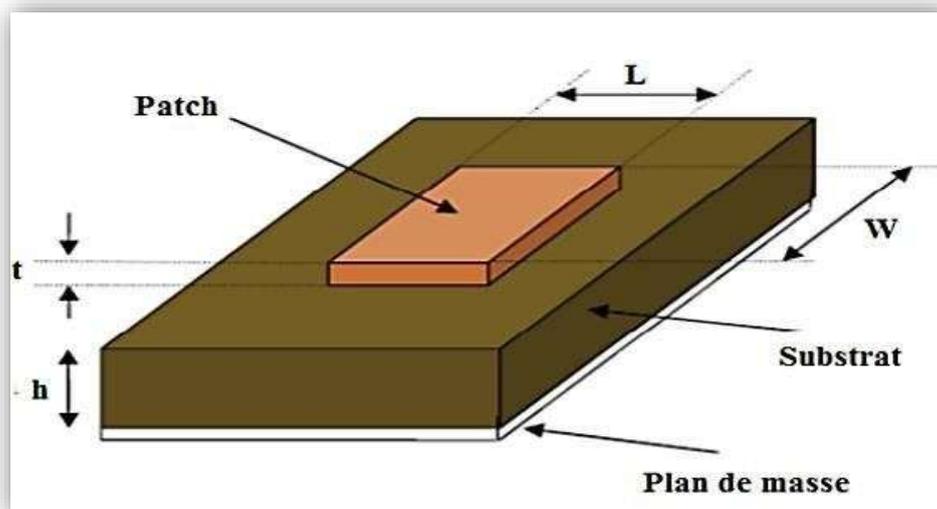
Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. CST Microwave Studio est un outil de simulation 3D spécialisé pour l'analyse rapide et précise de la dynamique des particules chargées dans des champs électromagnétiques 3D. Puissant et polyvalent, il convient à des tâches allant de la conception de magnétrons et du réglage de tubes électroniques à la modélisation de sources de particules et de composants d'accélérateurs. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles. C'est l'une des caractéristiques clé de ce simulateur. [34]



**Figure 25 :** Capture d'écran sur le CST.

### III.3. Simulation d'une antenne patch rectangulaire

L'antenne à étudier est une antenne patch rectangulaire, alimentée et adaptée par une ligne micro ruban ( $50 \Omega$ ), elle fonctionne à une bande de fréquence U (40 à 60 GHz). Le substrat utilisé est de type SILICONE avec une permittivité  $\epsilon_r$  de 3.9 et une hauteur  $h=0.03\text{mm}$ . La structure d'une antenne imprimée et les paramètres géométriques de la forme rectangulaire sont représentés à la figure suivante :



**Figure 26 :** La structure d'une antenne imprimée et les paramètres géométriques de la forme rectangulaire.

Les formules de calcul des paramètres de l'antenne patch rectangulaire sont données comme suit :

**Données**

Fr en Hz (fréquence de résonance)

H en m (hauteur de substrat)

$\epsilon_r$  : (la constante diélectrique du substrat)

C : la célébrité de la lumière  $3 \times 10^8$

$ms^{-1}$  **Objectif** : calcul de

W : largeur du patch en m

L : longueur du patch en m

**Etape 1** : calcul de W

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \tag{19}$$

**Etape 2** : calcul de  $\epsilon_{eff}$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1} \tag{20}$$

**Etape 3** : calcul de  $\Delta L$

$$\Delta L = 0.412 \times h \times \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \times (\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \times (\frac{w}{h} + 0.8)} \tag{21}$$

**Etape 4** : calcul de L

$$L = \frac{c}{2fr \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \tag{22}$$

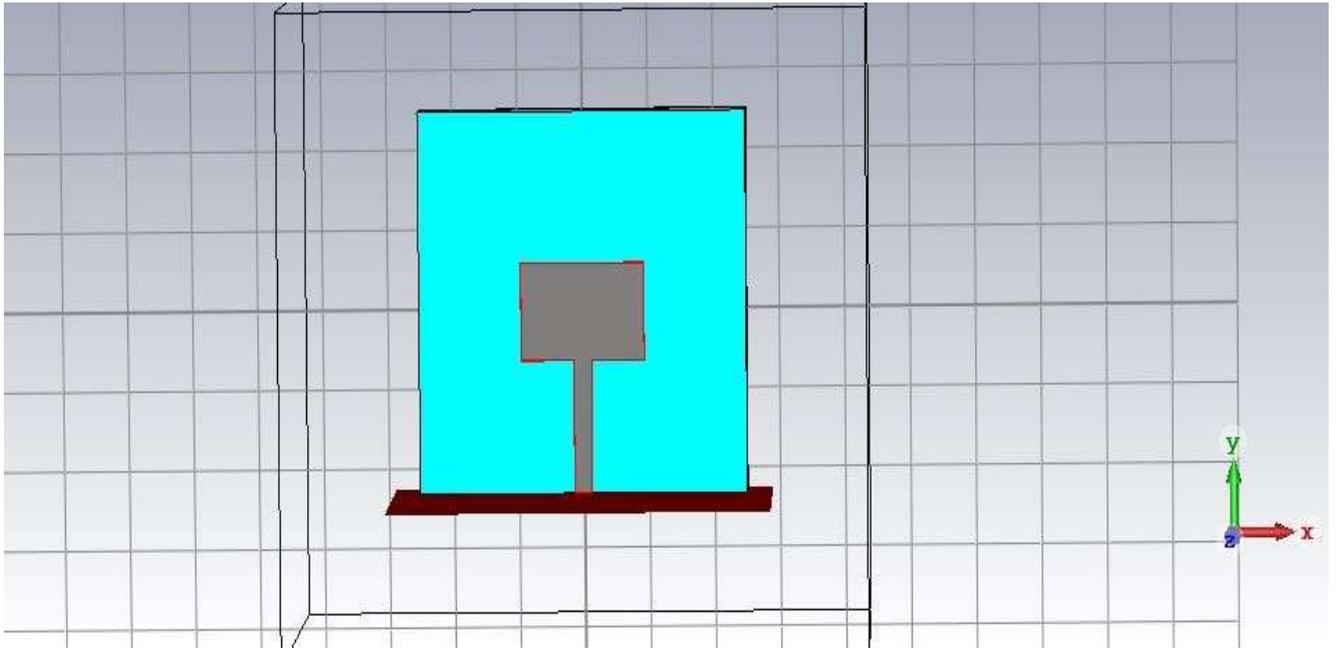
Après ces calculs on a obtenu les paramètres géométriques indiqués dans le tableau suivant :

Noms	Valeurs(mm)	Symboles
Largeur du substrat	5	Wg
Longueur du substrat	5	Lg
Hauteur du plan de masse	0.035	Hs
Hauteur du substrat	0.508	Ht
Largeur du patch	1.8790487205881	Wp
Epaisseur du patch	0.035	Ht
Longueur du patch	1.2176545821026	Lp
Largeur de la ligne micro-ruban	1.0623660324188	Wf
Longueur de la ligne micro-ruban	1.2466988773058	Lf
Largeur du plan de masse	5	Wg
Longueur du plan de masse	5	Lg

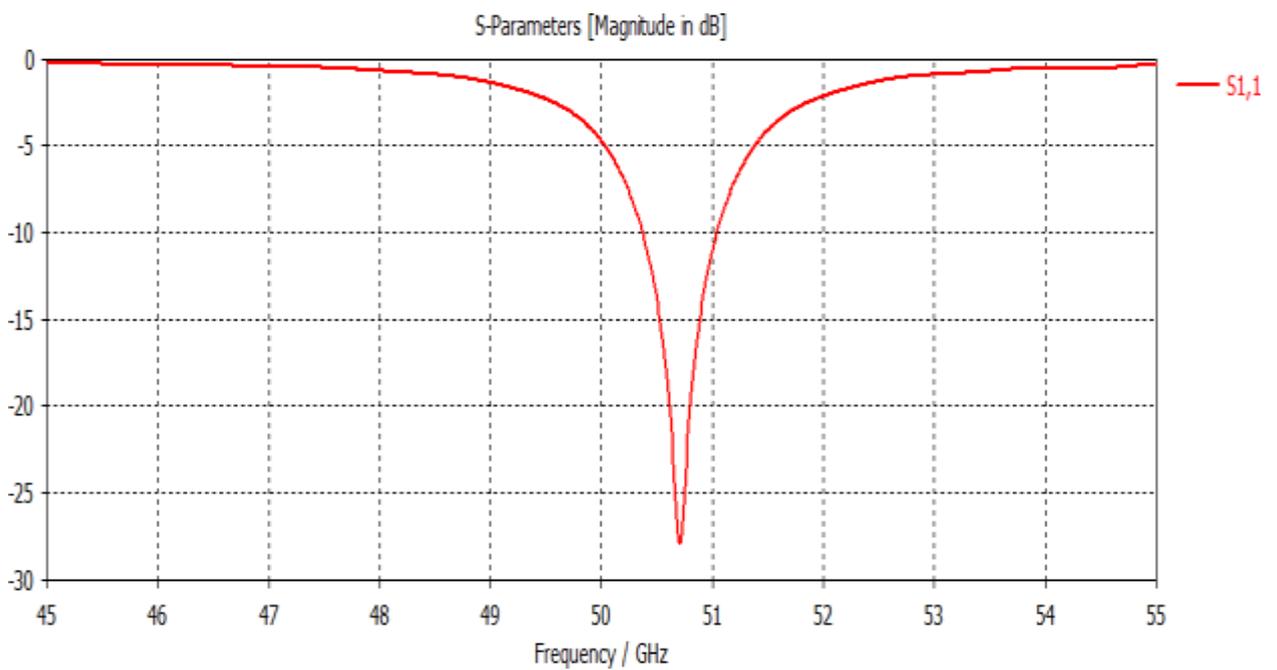
**Tableau 1** : Les paramètres géométriques d'antenne patch.

### III.4. Antenne patch sans adaptation

La figure 26 décrit une antenne patch alimentée sans adaptation avec une masse en cuivre d'hauteur de 0.035 mm et un substrat d'hauteur de 0.508 mm.



**Figure 27 :** Antenne Patch sans adaptation.



### III.4.1. Le coefficient de réflexion S<sub>11</sub> d'une antenne patch sans adaptation de fréquence

La figure suivante montre que l'antenne n'est pas adaptée en fréquence.

**Figure 28 :** S<sub>11</sub> en fonction de la fréquence.

### III.4.2. VSWR d'une antenne patch sans adaptation de fréquence

La figure 28 montre clairement qu'on a une adaptation.

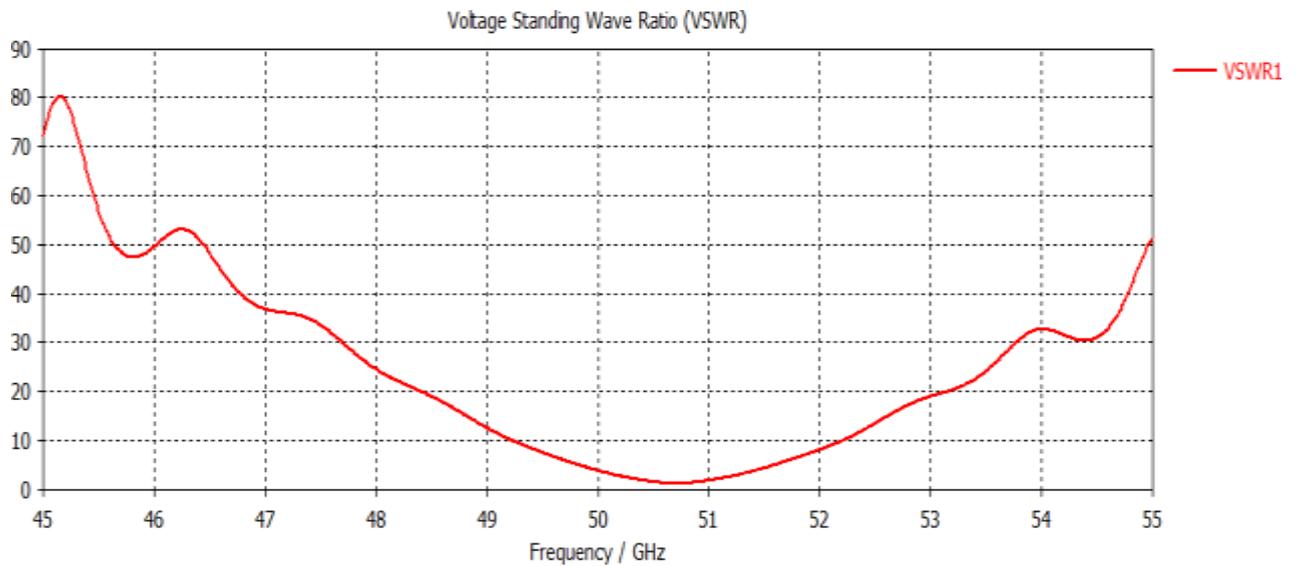


Figure 29 : VSWR en fonction de la fréquence.

### III.5. Adaptation d'antenne patch

Pour adapter notre patch, il faut utiliser soit la méthode avec encoches, soit la méthode en quart d'onde, la figure suivante représente l'antenne patch après l'adaptation avec les deux méthodes simulées dans le CST :

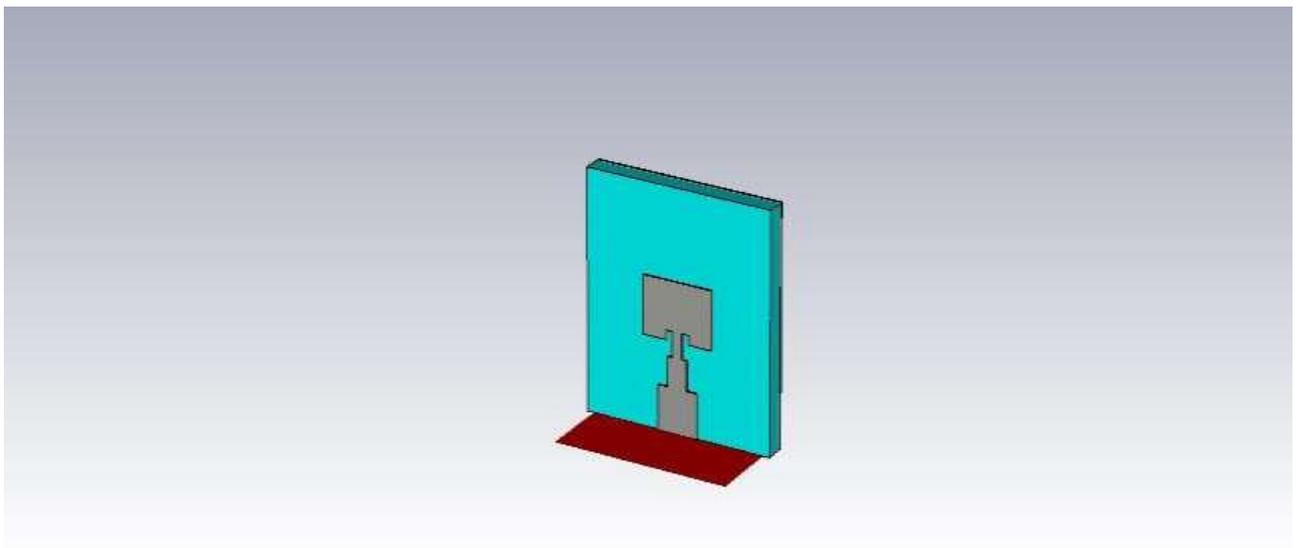
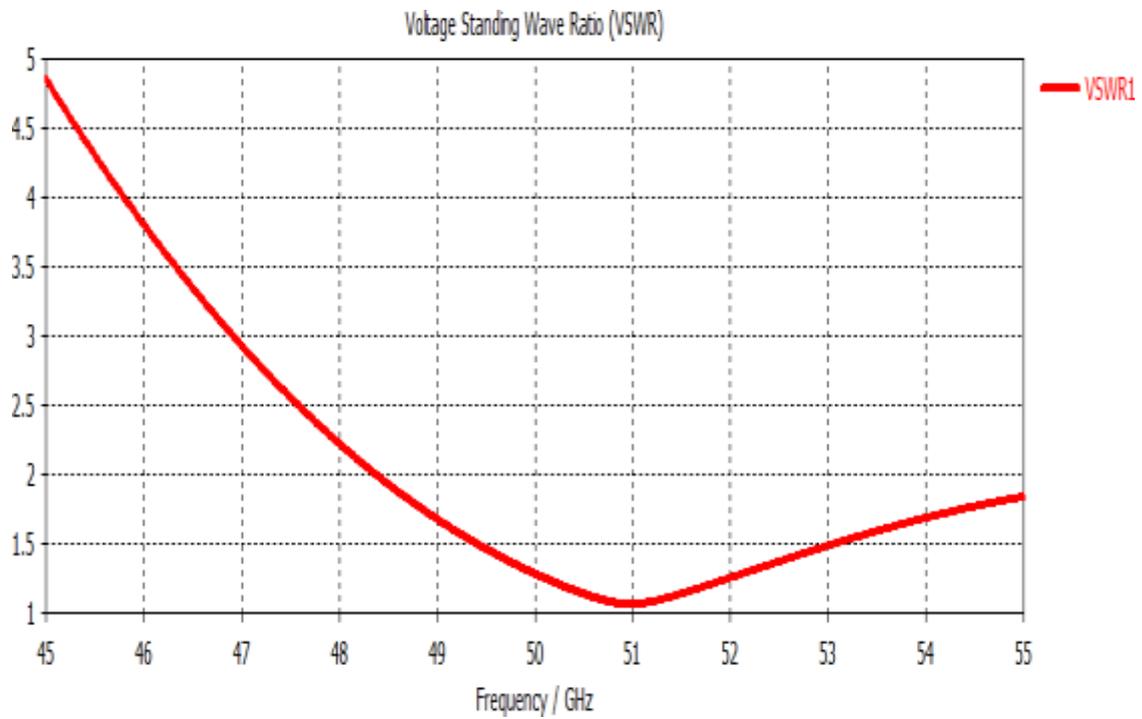


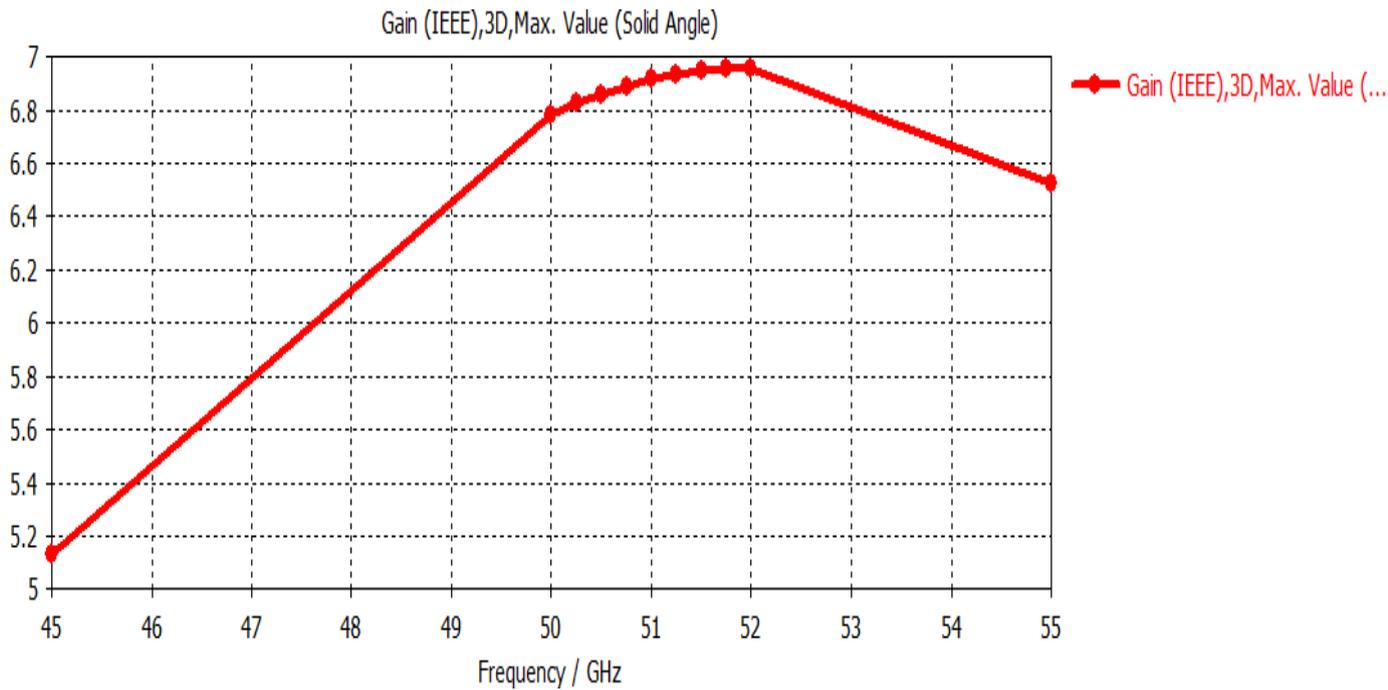
Figure 30 : Antenne patch adapté avec les deux méthodes, encoche et quart d'onde.

Dans cette partie, on va représenter les résultats de simulation obtenus en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'ondes stationnaires et le diagramme de rayonnement.

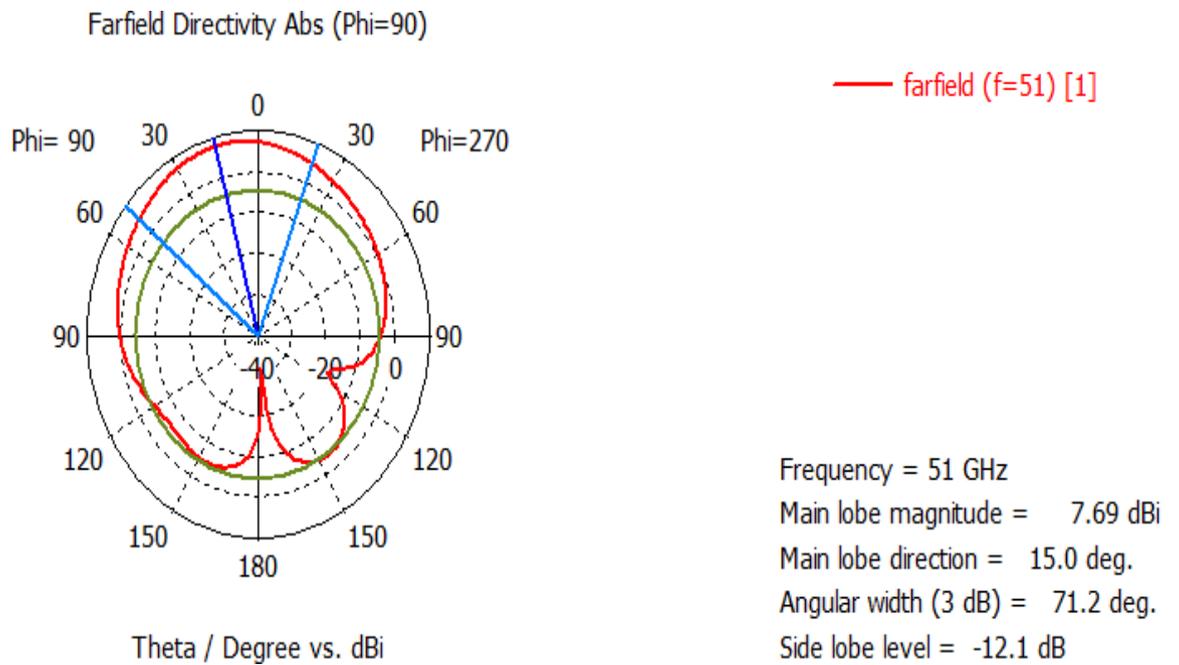
**Figure 31** : S11 en fonction de la fréquence.



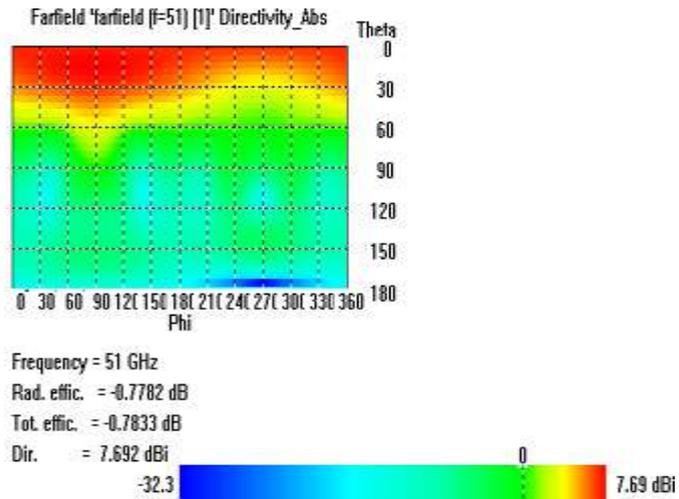
**Figure 32 : VSWR en fonction de la fréquence.**



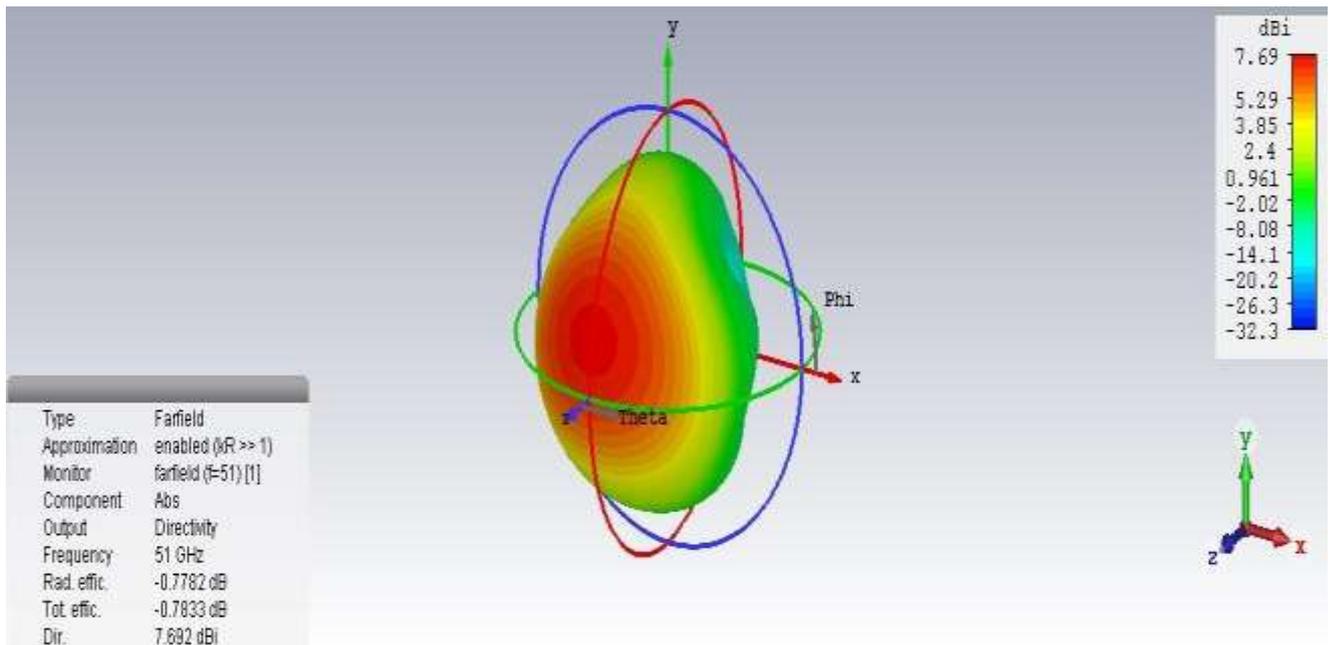
**Figure 33 : le gain en fonction de la fréquence.**



**Figure 34 : le diagramme de rayonnement polaire.**



**Figure 35** : le diagramme de rayonnement en 2D.



**Figure 36** : le diagramme de rayonnement en 3D.

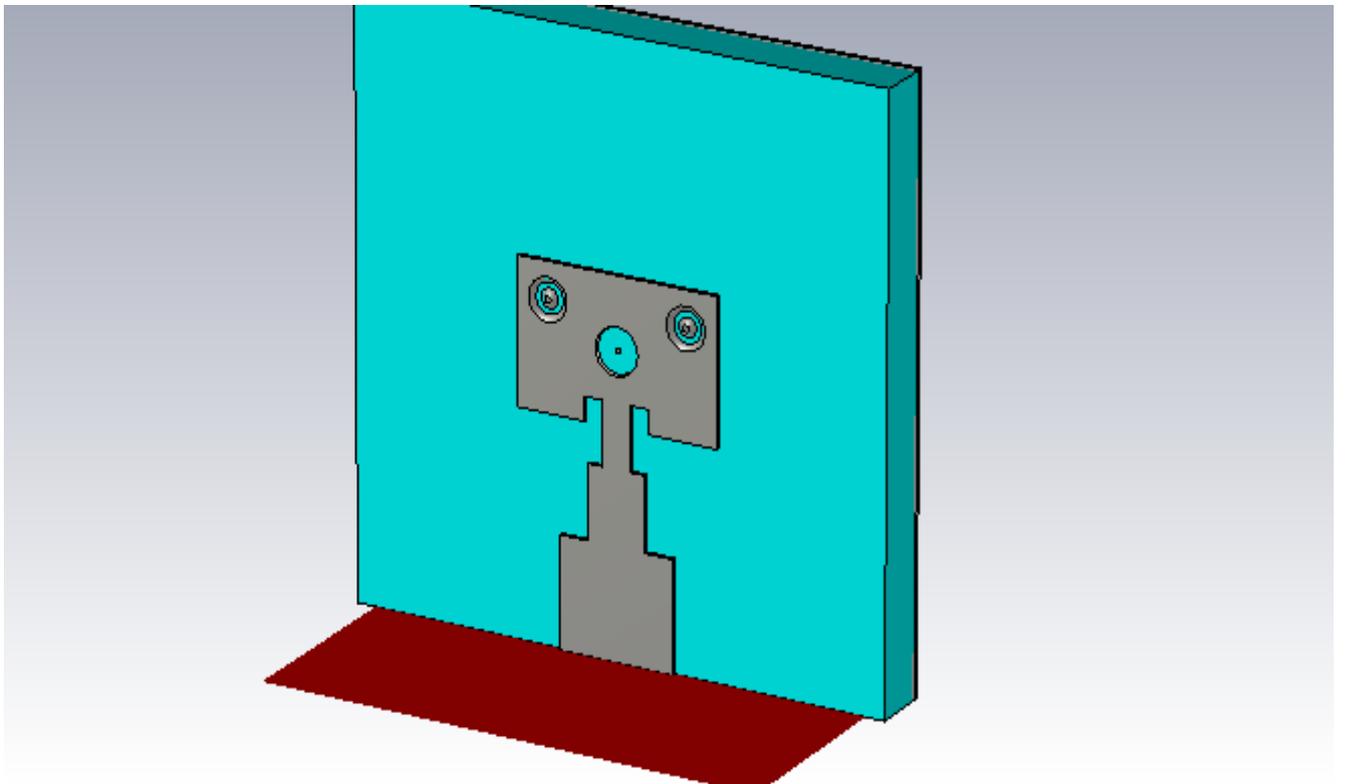
D'après les résultats précédents, l'antenne est bien adaptée avec S11 de -30 dB, VSWR de 1.1, le gain de 6.3 dBi, il est clair que l'énergie est concentrée dans la direction d'une ouverture de 71.2 degrés à -3 dB.

## III.6. Nouveau design d'une antenne patch fonctionnant en bande U

### III.6.1. La bande U

La bande U, est une gamme de fréquences allant de 40 à 60 GHz. Cette bande de fréquences se situe entre la bande Q de l'IEEE (33-50 GHz) et la bande V (50 à 75 GHz). Comme la gamme de fréquences de la bande U est partagée par les bandes Q et V, elle partage également la plupart des mêmes applications.

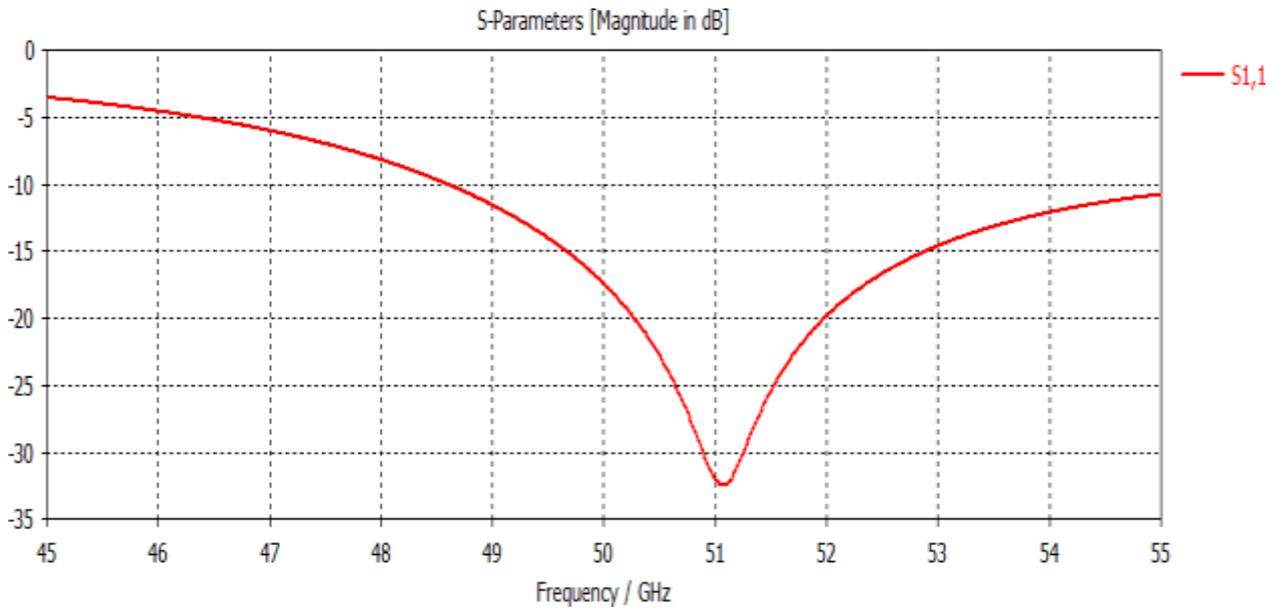
Notre objectif est de concevoir une nouvelle conception d'antenne fonctionnant dans la bande U et après la simulation on a obtenu un nouveau design de notre antenne avec des nouvelles caractéristiques comme illustré ci-dessous :



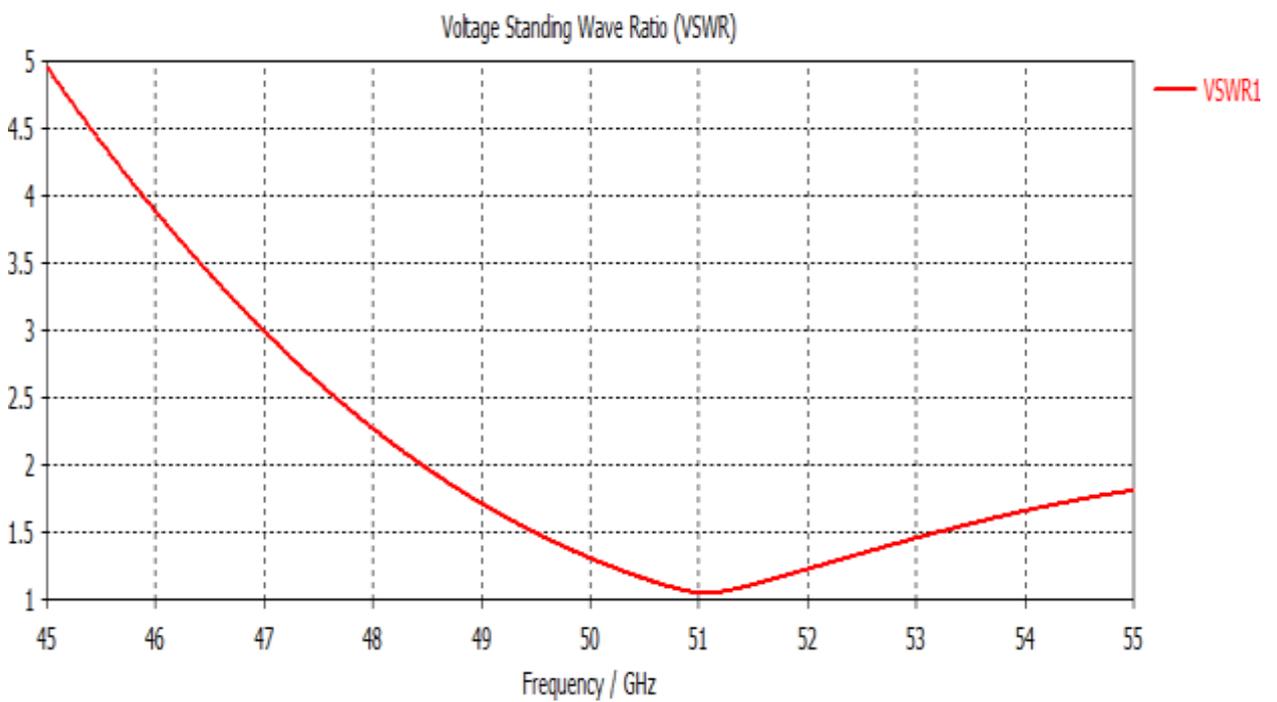
**Figure 37** : le nouveau design d'une antenne patch.

Dans cette partie on représente les résultats de la simulation de nouvelle structure d'antenne patch :

Premièrement, le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , qui va nous permettre de visualiser le niveau d'adaptation à la fréquence de résonance désirée pour cette antenne, est égal à -32 dB.

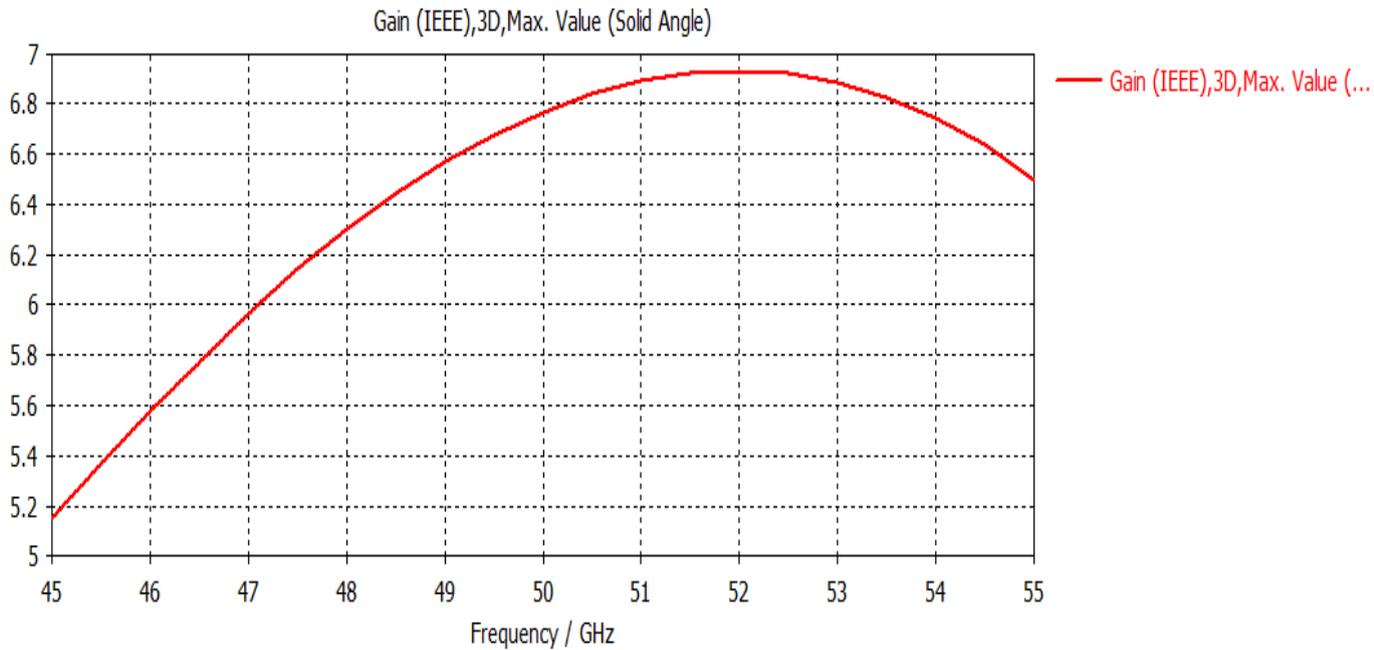


**Figure 38 :** S11 en fonction de la fréquence.



**Figure 39 :** Taux d'ondes stationnaires en fonction de la fréquence.

La figure 38 montre simplement que, la valeur VSWR est nettement inférieure à 1.5.

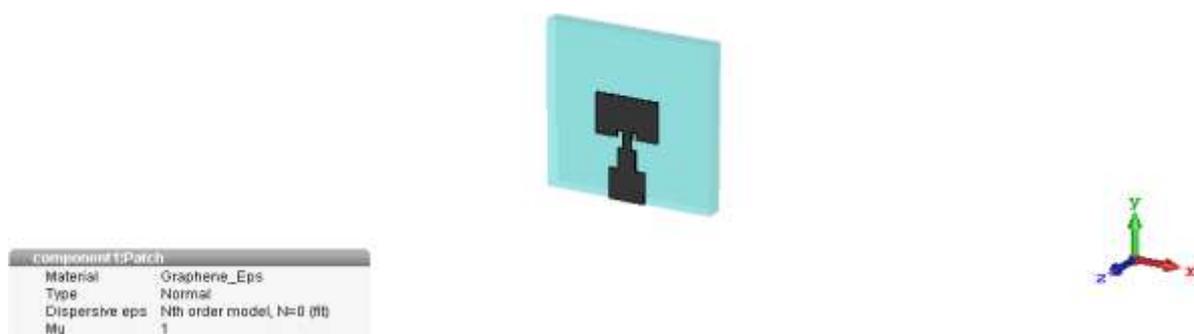


**Figure 40** : le gain en fonction de la fréquence.

Concernant le gain, le graphe atteint une valeur maximale de 6.9 dBi.

### III.7. Application du Graphene

La figure ci-dessous représente l'antenne patch après la simulation avec le Graphene.



**Figure 41** : antenne patch avec le Graphene.

#### III.7.1. Le coefficient de réflexion S11

Le résultat obtenu pour le coefficient de réflexion d'antenne patch après l'application du Graphene dans la bande [40-80 GHz] est représenté dans la figure suivante :

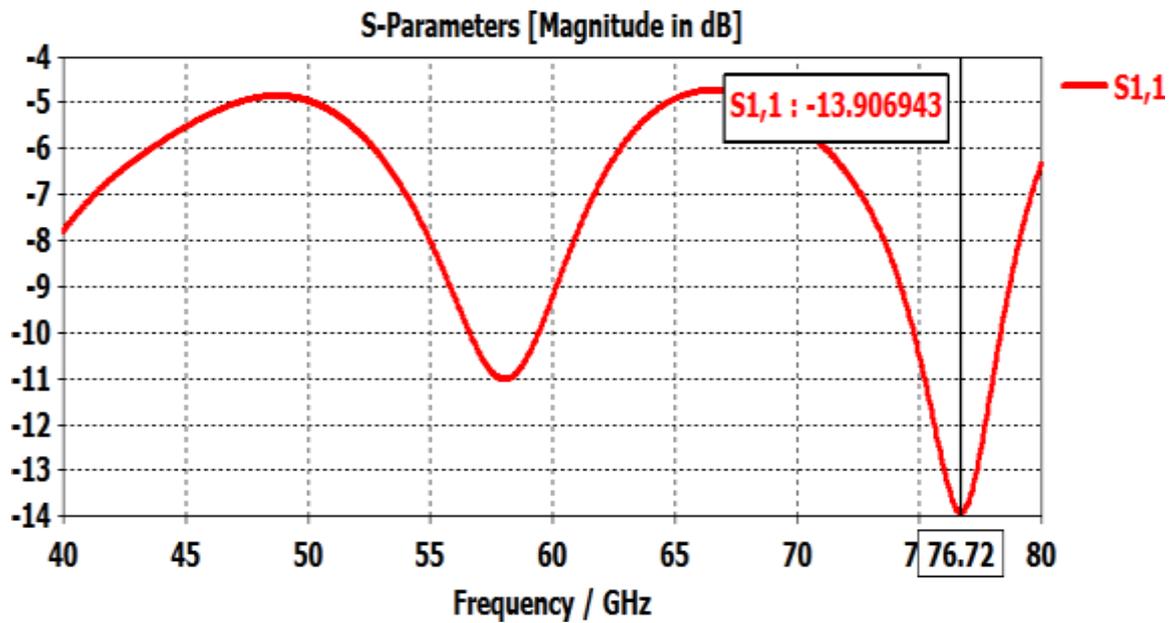


Figure 42 : S11 en fonction de la fréquence.

Dans ce cas, la figure illustre une adaptation de -13.9 dB à une fréquence de 76.72 GHz.

### III.7.2. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La figure 43 montre qu'après l'application du Graphene, le VSWR devient 1.5 à une fréquence de 76.72 GHz.

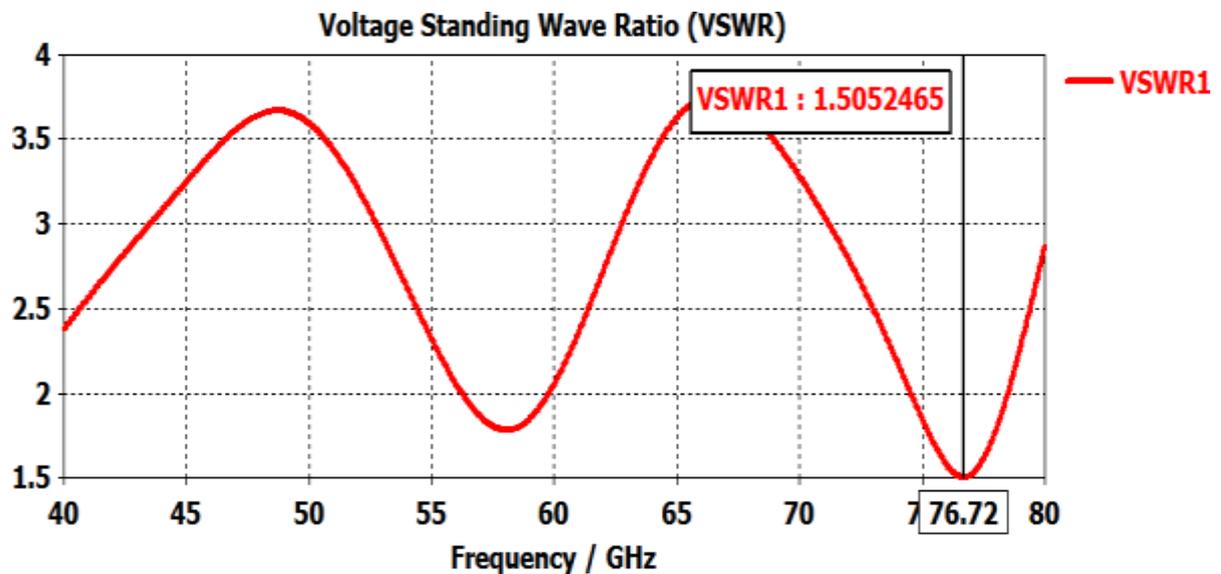


Figure 43 : VSWR en fonction de la fréquence.

### III.7.3. Le gain

La figure 43 montre les résultats simulés de l'antenne patch avec le Graphene donnant un gain de 11.50 dBi à 76.72 GHz.

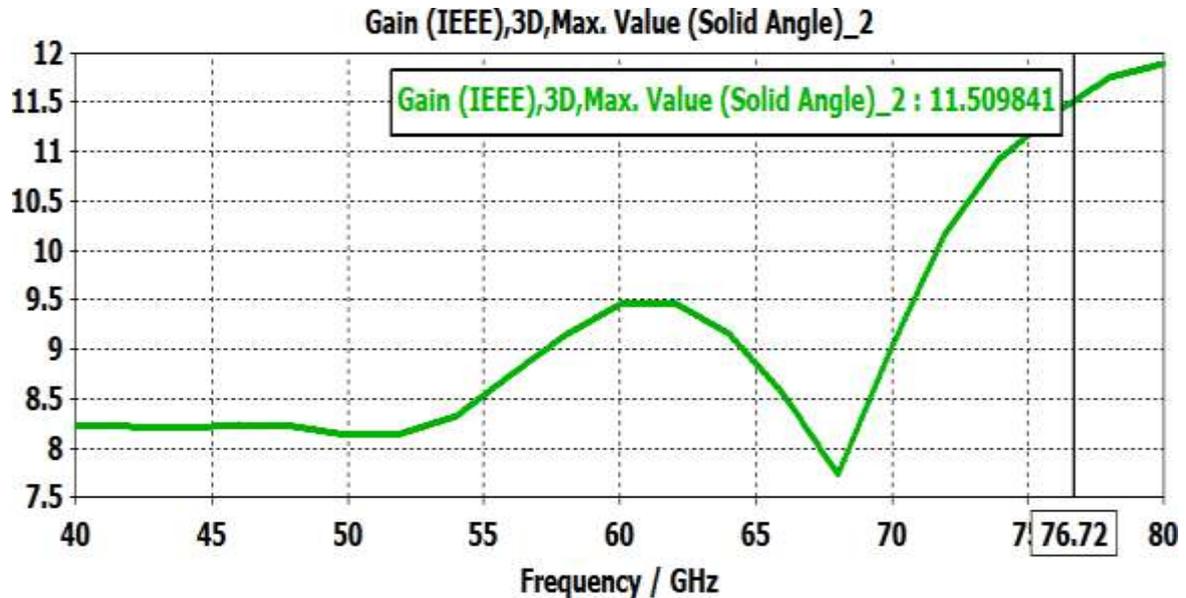


Figure 44 : le gain en fonction de la fréquence.

### III.7.4. Le diagramme de rayonnement

CST permet de visualiser les diagrammes de rayonnement 3D de l'antenne. C'est une représentation qui nous informe sur la directivité de l'antenne. Il nous donne la possibilité de visualiser le rayonnement sur un plan polaire, ceci nous donne une idée sur l'angle d'ouverture. L'antenne simulée avec CST nous a donné un diagramme de rayonnement avec un angle d'ouverture de 56.1°, c'est une bonne ouverture pour un réseau d'antenne.

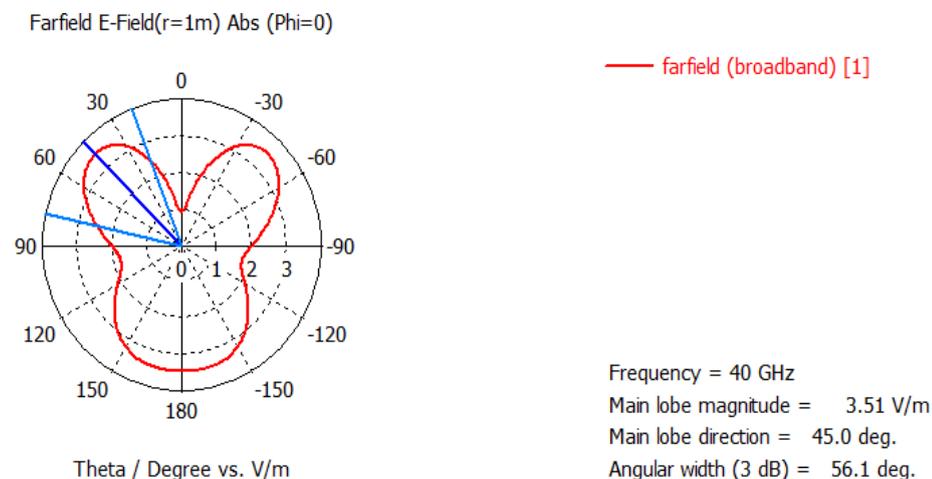
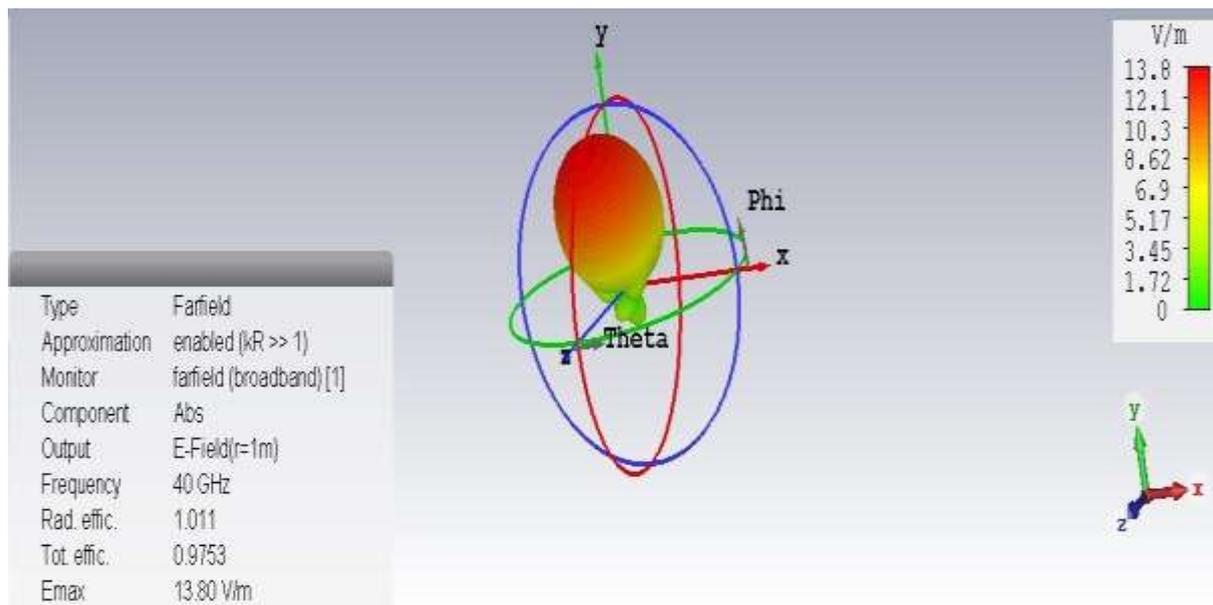


Figure 45 : le diagramme de rayonnement.



**Figure 46** : le diagramme de rayonnement en 3D.

### III.8. Comparaison entre les paramètres d'antenne patch avec et sans graphène

#### III.8.1. La comparaison entre les coefficients de réflexion S11 d'antenne patch avec Graphene et sans Graphene

La figure 47 montre que :

- Pour le S11 sans Graphene égal à -26.64 dB à une fréquence de 51.7 GHz qui présente une adaptation par rapport à la fréquence résonance.
- Pour le S11 avec graphène égal à -14.01 dB à une fréquence de 76.41 GHz.

On remarque que le S11 croisse vers les hautes fréquences à cause du Graphene.

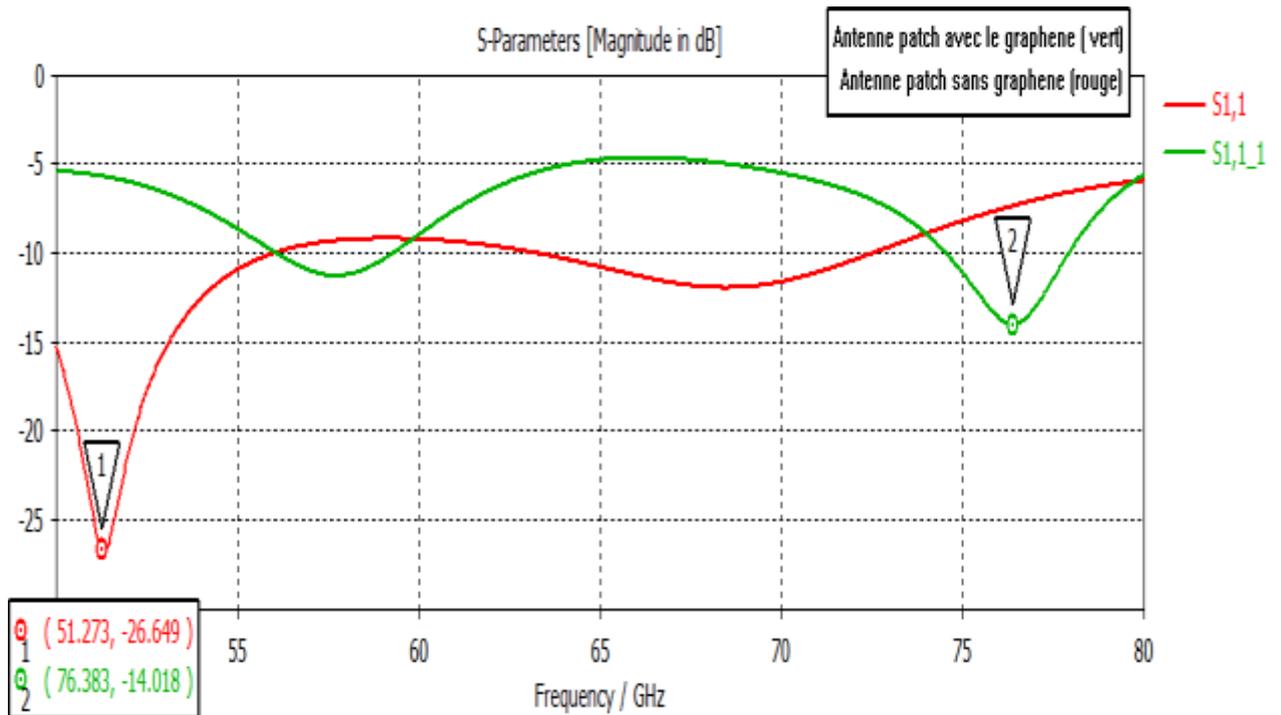


Figure 47 : S11 en fonction de la fréquence.

### III.8.2. La comparaison entre les VSWR d'antenne patch avec Graphene et sans Graphene

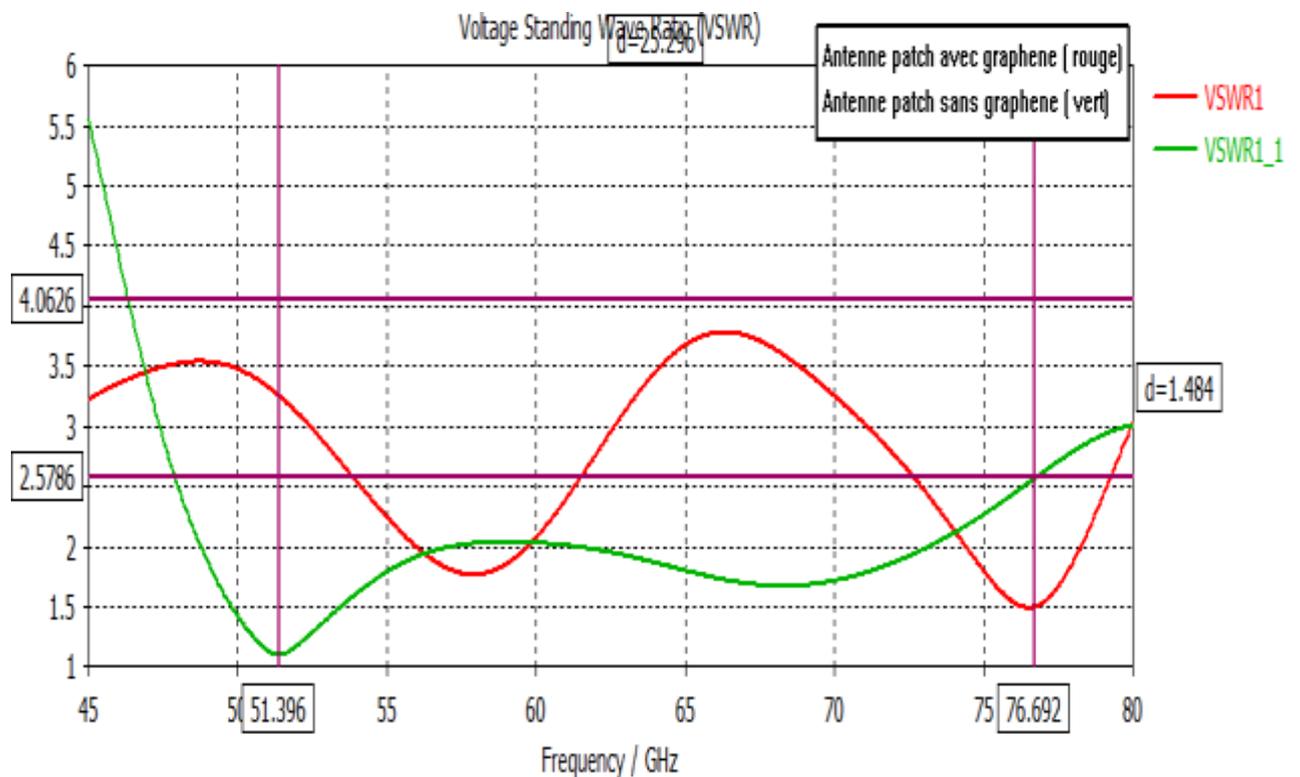


Figure 48 : le VSWR en fonction de la fréquence.

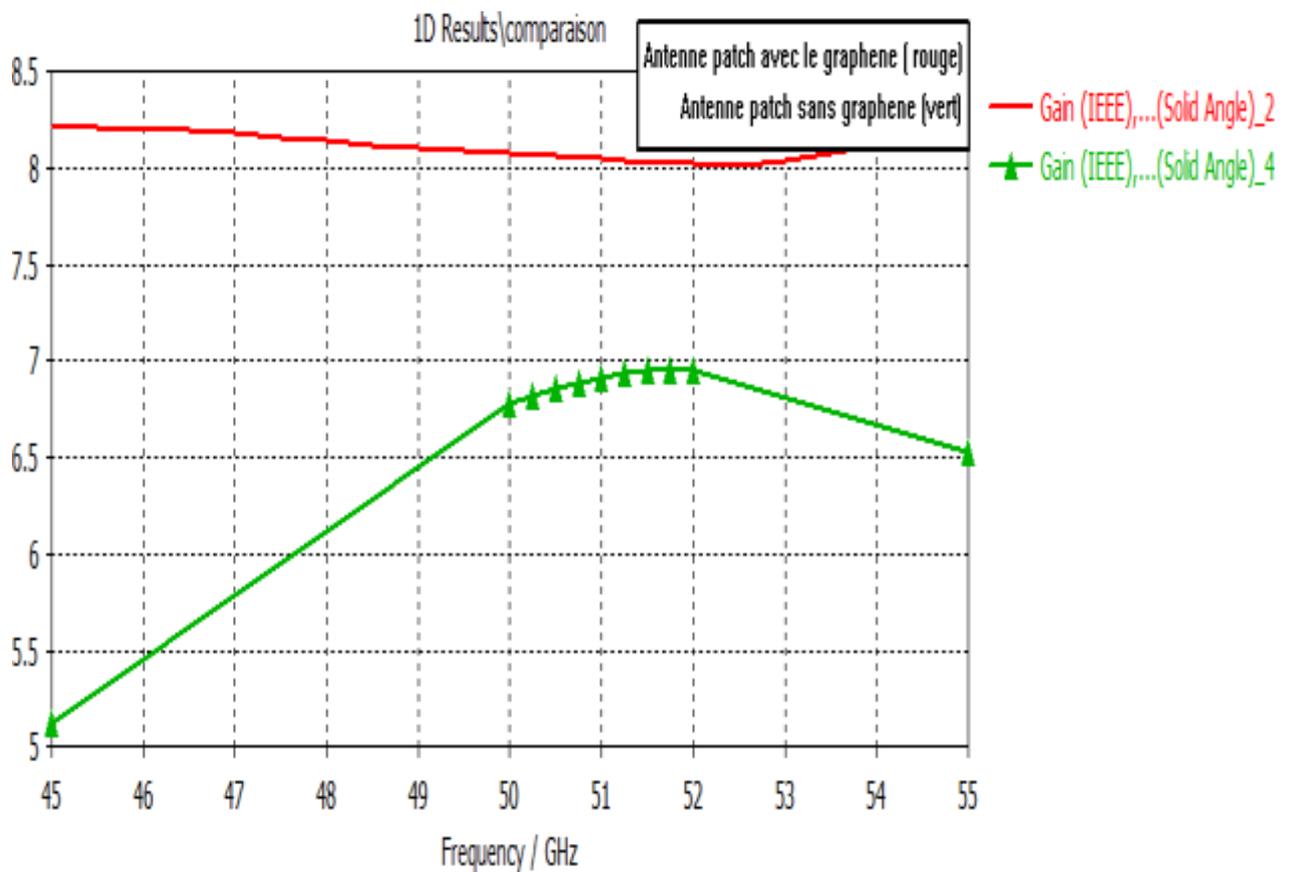
A partir de la figure 48, On observe une variation entre les paramètres où :

La valeur du taux d'onde stationnaire égal à 1.1 sans Graphene.

La valeur du taux d'onde stationnaire égal à 3.25 avec Graphene.

### III.8.3. La comparaison entre les gains d'antenne patch avec Graphene et sans Graphene

La figure suivante représente l'évolution du gain en fonction des fréquences.



**Figure 49** : le gain en fonction de la fréquence.

La figure 49 représente la comparaison entre les gains où le gain avec le graphène atteint une valeur de 8 dBi et celui sans graphène égal à 7 dBi.

<b>Paramètres</b>	<b>Patch sans Graphene</b>	<b>Patch avec Graphene</b>
<b>S11</b>	<b>-26.55 dB (51.27 GHz)</b>	<b>-14.01 dB (76.41 GHz)</b>
<b>VSWR</b>	<b>1.1 (51.27 GHz)</b>	<b>1.5 (76.76 GHz)</b>
<b>Gain</b>	<b>7 dBi</b>	<b>8 dBi</b>

**Tableau 2 : Tableau de comparaison entre les paramètres (S11, VSWR, le gain) du patch sans et avec graphene**

### **III.9. Effet de la variation du potentiel chimique et de la température sur une antenne patch normale**

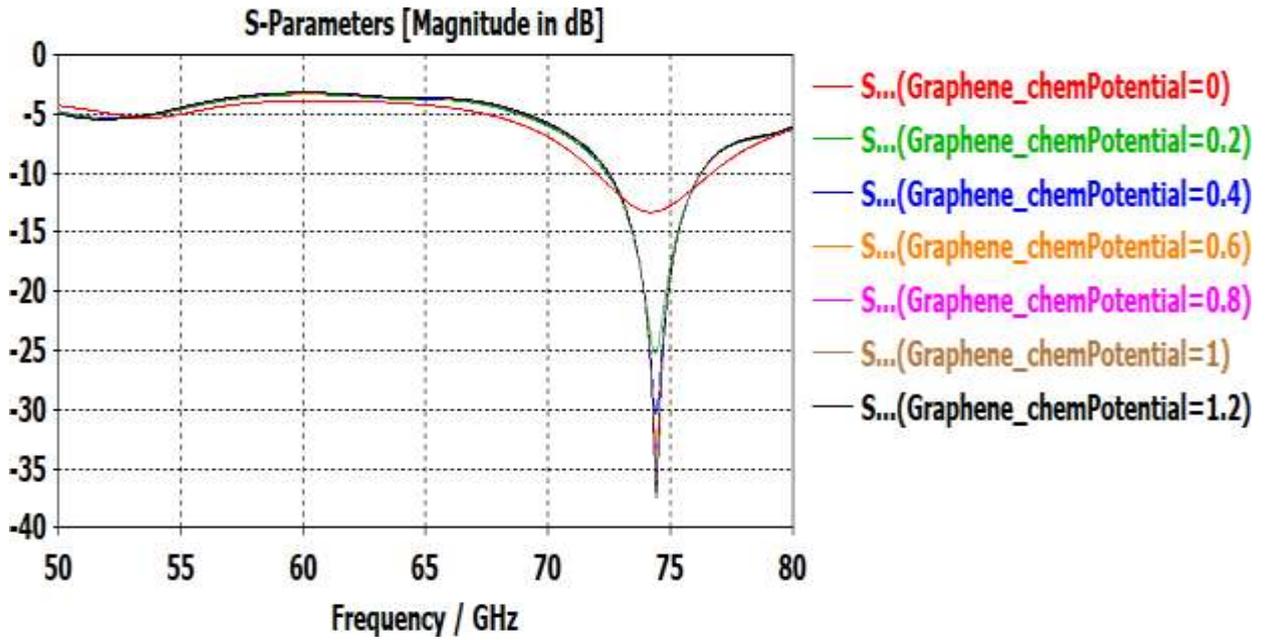
Le présent travail vise à analyser les performances d'une antenne patch à base de graphène nouvellement conçue en faisant varier le potentiel chimique (0.2 eV, 0.4 eV, 0.6 eV, 0.8 eV, 1 eV, 1.2 eV) et la température (293 K, 313.15 K, 323.15 K, 333.15 K) dans la feuille de graphène. Cette étude cherche principalement à discuter et à évaluer l'avantage d'utiliser le graphène, au lieu du cuivre, comme patch rayonnant. Il convient de noter que le graphène est un nouveau matériau qui possède des propriétés uniques.

#### **III.9.1. la variation du potentiel chimique**

##### **III.9.1.1. Le coefficient de réflexion S11**

Le potentiel chimique comme on la déjà définir c'est l'énergie qui peut être absorbée ou libérée en raison des changements dans le nombre de particules de votre espèce.

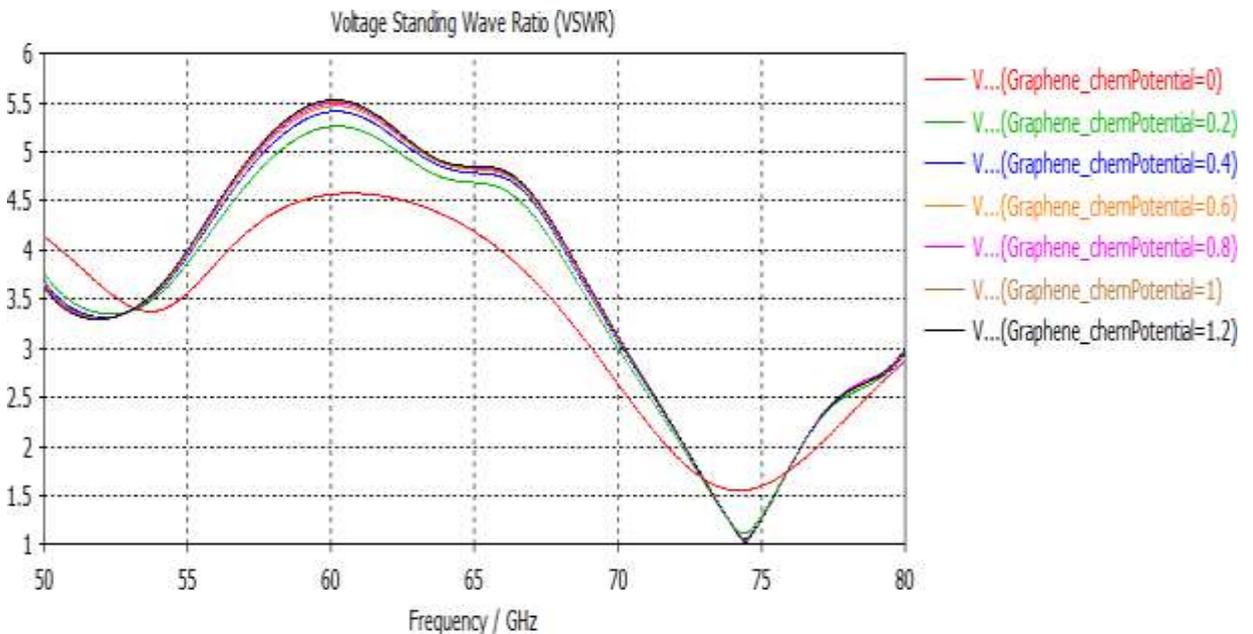
Il reste cependant à affirmer ce potentiel en proposant des voies de production de Graphene de qualité adéquate afin de remplacer les matériaux déjà en place et développer de nouvelles applications. Selon les résultats obtenus, on observe qu'à chaque fois qu'on augmente la valeur du potentiel chimique, le coefficient de réflexion est régulièrement diminué dans une fréquence très proche à 75 GHz.



**Figure 50 :** S11 en fonction de la fréquence.

### III.9.1.2. le rapport d'onde stationnaire VSWR

La figure 51 montre qu'après chaque variation du potentiel chimique (0.2eV- 0.4eV -0.6eV - 0.8eV -1eV -1.2eV), le VSWR décroisse jusqu'au 1 avec une fréquence proche de 75 GHz.



**Figure 51 :** VSWR en fonction de la fréquence.

### III.9.2. La variation de la température

D'après les figures 52 et 53 ci-dessous, on déduit que la variation de la température n'a aucune influence sur une antenne patch parce que le graphène s'avère être un bon absorbeur à température finie.

#### III.9.2.1 Le coefficient de réflexion S11

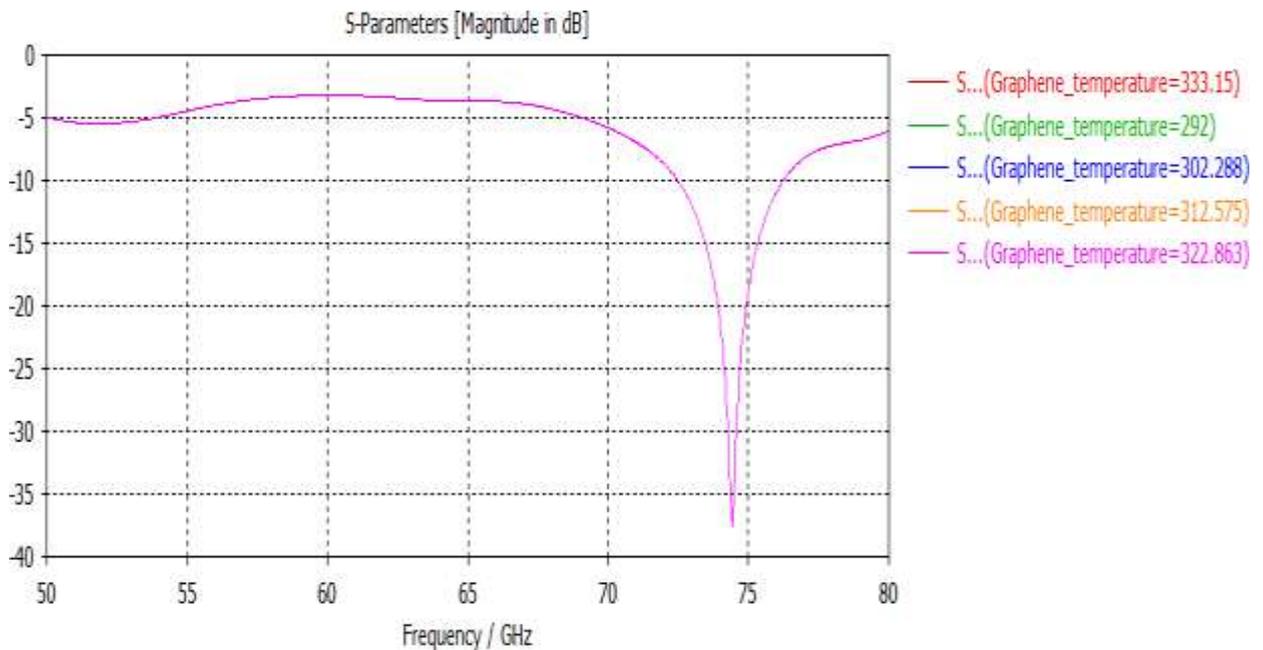


Figure 52 : Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence.

#### III.9.2.2. le rapport d'onde stationnaire VSWR

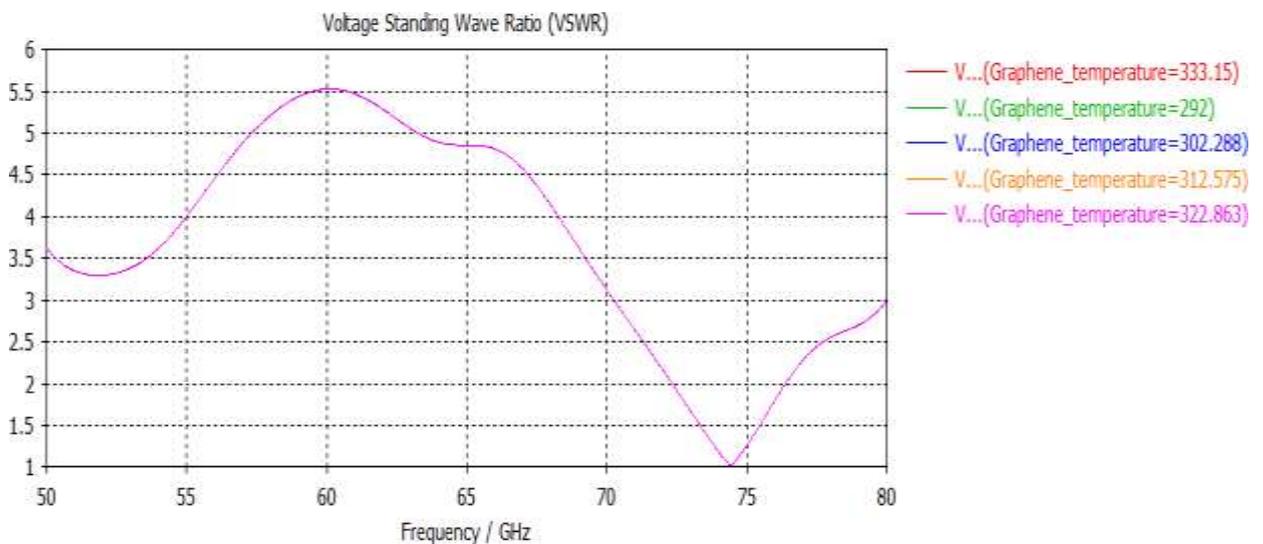
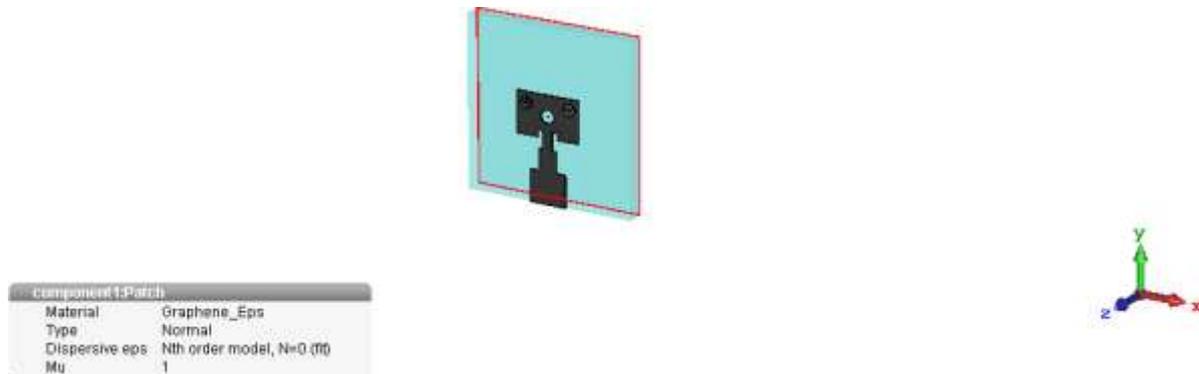


Figure 53 : VSWR en fonction de la fréquence.

### III.10. Le nouveau design d'antenne patch avec le Graphene



**Figure 54 :** antenne patch après la simulation avec le Graphene

#### III.10.1. Effet de la variation du potentiel chimique et la température sur une antenne patch avec le nouveau design

##### III.10.1.1. la variation du potentiel chimique

##### III.10.1.1.1. Le coefficient de réflexion S11

Les figures ci-dessous représentent les différents résultats après la variation du potentiel chimique.

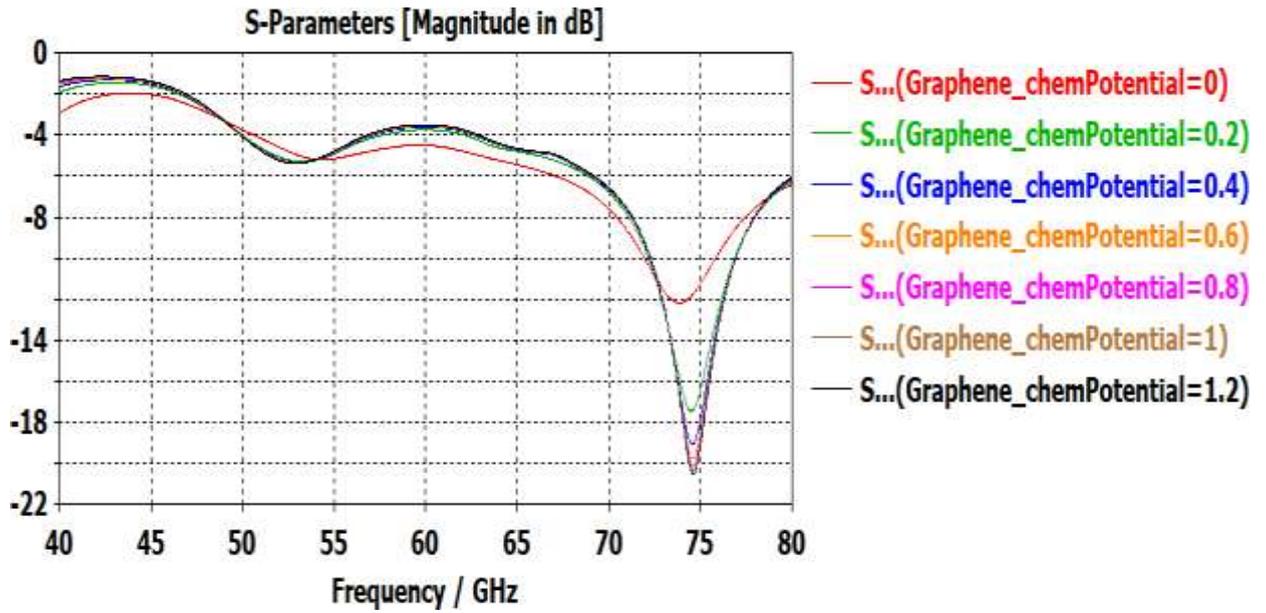


Figure 55 : S11 en fonction de la fréquence.

On remarque une progression fréquentielle et un recul important des valeurs du S11 jusqu'à presque -21 dB après la variation du potentiel chimique sachant que le S11 est un paramètre très important pour les antennes patch.

### III.10.1.1.2 le VSWR

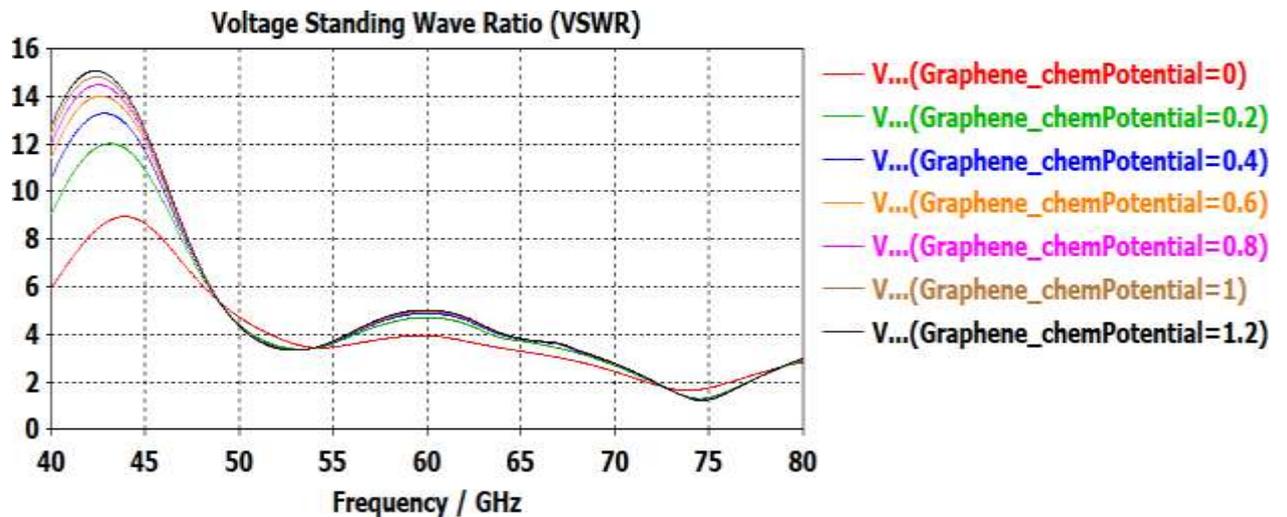


Figure 56 : VSWR en fonction de la fréquence.

Une analyse détaillée révèle une baisse aux paramètres du VSWR et une amélioration fréquentielle après la variation du potentiel chimique qui est une caractéristique essentielle du Graphene qui joue un grand rôle pour l'amélioration d'antenne patch.

### III.10.1.2. la variation de la température

#### III.10.1.2.1 Le coefficient de réflexion S11

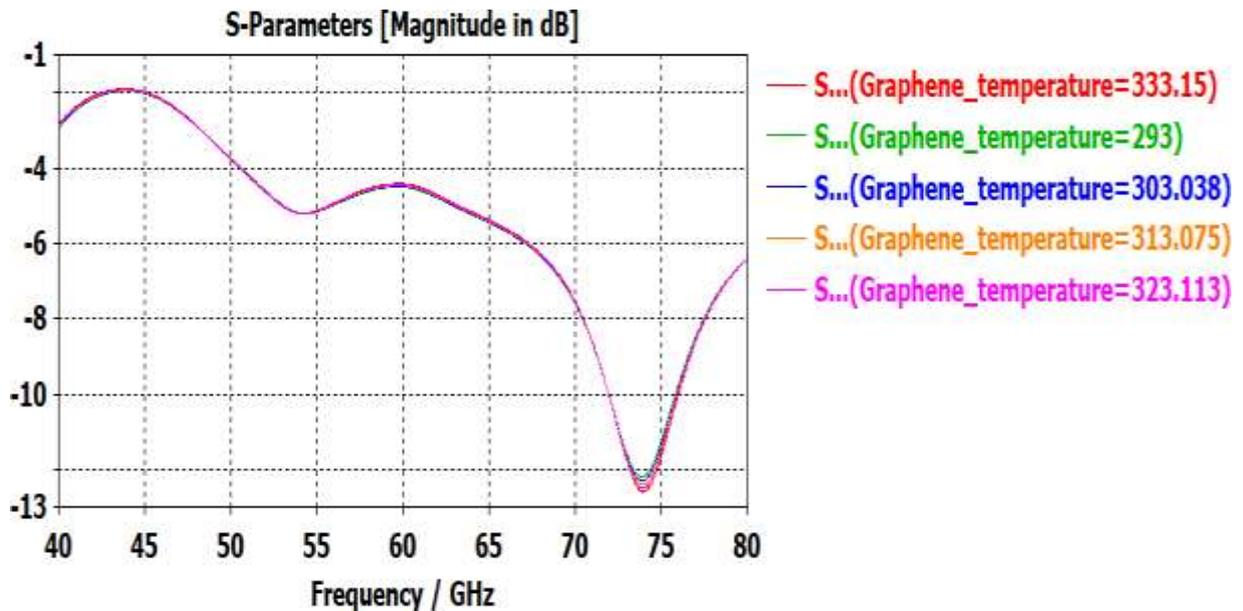


Figure 57 : Le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence.

#### III.10.1.2.2 VSWR

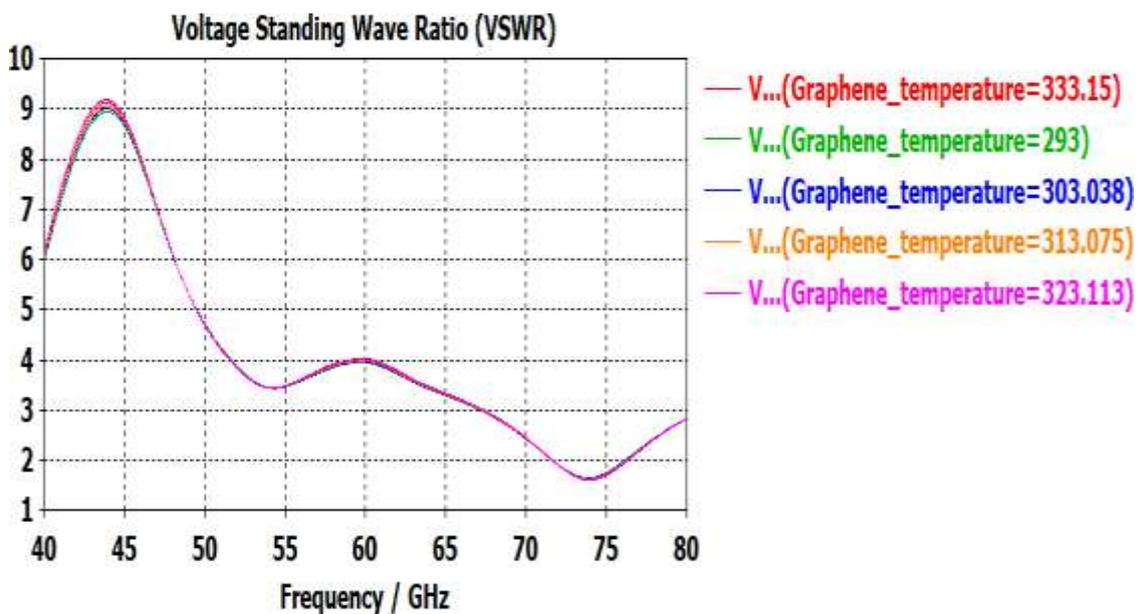


Figure 58 : VSWR en fonction de la fréquence.

Les figures (57,58) illustrent un non changement aux valeurs de coefficients de réflexion et VSWR, malgré la progression de la température (293K, 303.03K, 313.07K, 323.11K, 333.15K).

### III.11. Un tableau comparatif entre les paramètres d'antenne patch et son nouveau design après la variation du potentiel chimique et la température

	Paramètres	Patch normal	Le nouveau design
<b>La variation du potentiel chimique</b>	<b>S11</b>	Diminution jusqu'à -40 dB.	Un recul jusqu'à presque -21 dB
	<b>VSWR</b>	Diminution jusqu'à 1.	Diminution jusqu'à presque 1.
<b>La variation de la température</b>	<b>S11</b>	Aucune influence.	Diminution jusqu'à presque -13 dB.
	<b>VSWR</b>	Aucune influence.	Diminution jusqu'à presque 1.5.

**Tableau 3 : un tableau comparatif entre les paramètres d'antenne patch et son nouveau design après la variation du potentiel chimique et la température**

### III.11. Conclusion

Ce chapitre est une représentation et simulation d'une antenne patch de forme rectangulaire par le logiciel de la simulation CST avec deux méthodes différentes, la méthode avec quart d'ondes et avec les encoches. C'est une nouvelle contribution, par la combinaison des techniques d'amélioration des performances de l'antenne et l'utilisation du graphène comme patch rayonnant des applications de la technologie spatiale. Cette expérience nous a poussé de réaliser ce nouveau modèle d'antenne patch rectangulaire d'hauteur du substrat de 0.508 mm et une permittivité relative de 3.9 avec un design différent qui le caractérise.

# **Conclusion générale**

### **III.12. Conclusion générale**

L'organisation de ce travail nous a donné la permission de bien comprendre l'ensemble de connaissances collectées dans le domaine des antennes patch. En premier chapitre nous avons donné une généralité sur les antennes en parlant de leurs caractéristiques, leurs types, puis on a détaillé sur l'antenne patch en parlant de ses :

- Domaines d'application.
- Paramètres géométriques.
- Avantages et les inconvénients.
- Formes.
- Types d'alimentation.

Ensuite en deuxième chapitre nous avons parlé sur le Graphene, ses propriétés, ses applications, propagation des vagues SPP dans le graphène et les formes de carbone.

Pour le dernier chapitre nous avons commencé avec la simulation d'une antenne patch rectangulaire à la base du Graphene en faisant sortir toutes ses caractéristiques telles que le gain, S11, le diagramme de rayonnement et VSWR. Ensuite, après l'application du graphène les résultats d'antenne patch S11, VSWR et le diagramme de rayonnement ont changées. Nous t'avons fait un nouveau modèle d'antenne patch qui distingue notre mémoire.ù

## Bibliographie

- [1] «Chapitre V. Généralités sur les Antennes,» 2016/2017 . [En ligne]. Available: [https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/pluginfile.php/32684/mod\\_forum/](https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/pluginfile.php/32684/mod_forum/)
- [2] B. M. S. Hamza Bouhmida Hayat, «Simulations d'un réseau d'antenne patch en bande S' pour un nano satellite ,» Ain Temouchent, 2020.
- [3] P. Nayak, «Multiband Antenna Designs for Wireless Communication Systems, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Bachelor of Technology décembre 2013.
- [4] «Different Types of Antennas & Characteristics of Antenna,» 4 mars 2019. [En ligne]. Available: <https://www.electronicshub.org/types-of-antennas/>.
- [5] H. R. Hertz, «Antenne dipolaire,» 1886. [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne\\_dipolaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_dipolaire).
- [6] R. Perez, «Reflector Antennas,» 1998. [En ligne]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reflector-antennas> .
- [7] « Antenne à réflecteur parabolique,» [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Antenne-a-reflecteur-parabolique\\_fig12\\_331478338](https://www.researchgate.net/figure/Antenne-a-reflecteur-parabolique_fig12_331478338).
- [8] «ANTENNE CORNET,» [En ligne]. Available: <https://www.es-france.com/11674-antenne-cornet>.
- [9] «antenne Patch,» [En ligne]. Available: <https://www.elliptika.com/fr/case-studies/antenne-patch/>.
- [10] Indrasen. Singh, «Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey,» septembre 2011. International Journal of Computer Applications in Technology.
- [11] B. A. M. A. ,. B. A. B. E. Hemmas Mohamed Abdrraouf, «Conception et Simulation d'une Antenne Imprimée,» Bordj Bou Arreridj , mémoire de master 2020/2021 .
- [12] G. L. BENDERRADJI Houria Mihad, «Étude D'une Antenne Microbande Rectangulaire Avec Une Couche Protectrice,» OUARGLA, mémoire de master 2018-2019 .
- [13] S. Abderrahmane, «Contribution à la modélisation des antennes multifonction à métamatériaux,» Djelfa , mémoire de master 2014.
- [14] KHELIFI Wafa, « Conception des Antennes Imprimées Tri-Bandes pour les Laptops », mémoire de master 2015.
- [15] f. benamrane, «Conception d'une antenne Patch Microstrip,» mémoire de master 2011.

- [16] «Définition | Carbone vitreux | Futura Sciences,» [En ligne]. Available: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-carbone-vitreux-16512/> . Futura-sciences.
- [17] «Le graphène, ce matériau révolutionnaire qui pourrait nous fournir une énergie propre et infinie,» [En ligne]. Available: <https://www.capital.fr/economie-politique/le-graphene-ce-materiau-revolutionnaire-qui-pourrait-nous-fournir-une-energie-propre-et-infinie-1259271> .
- [18] «carbon,» [En ligne]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon>.
- [19] L. S. OUAZAR Razika, «Le graphène et ses applications en électronique,» TIZI-OUZOU, mémoire de master 2017 /2018.
- [20] «Difference Between Carbon and Diamond,» [En ligne]. Available: <https://www.differencebetween.com/difference-between-carbon-and-diamond/>.
- [21] «Difference Between Carbon and Graphite,» [En ligne]. Available: <https://www.differencebetween.com/difference-between-carbon-and-vs-graphite>
- [22] «Qu'est-ce que le graphite?,» [En ligne]. Available: <https://www.composition.gallery/FR/glossaire/quest-ce-que-le-graphite/> .
- [23] «Fullerène - Définition et Explications,» [En ligne]. Available: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fullerene.html>.
- [24] «fullerène,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fuller%C3%A8ne>.
- [25] «Carbon nanotubes – what they are, how they are made, what they are used for,» [En ligne]. Available:[https://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction\\_to\\_nano\\_technology\\_22.php](https://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction_to_nano_technology_22.php).
- [26] «Fabrication contrôlée de nanotubes de carbone : un matériau de l'avenir,» 2018. [En ligne]. Available: <https://www.pieuvre.ca/2016/06/15/les-nanotubes-de-carbone-trop-faibles-pour-un-ascenseur-spatial/>.
- [27] «Le graphène, matériau miracle ? Pas sûr : ses propriétés sont altérées par l'humidité,» [En ligne]. Available: <https://www.clubic.com/energie-renouvelable/actualite-849915-graphene-materiau-miracle-proprietes-alterees-humidite.html> .
- [28] «Graphene – All You Need to Know,» [En ligne]. Available: [https://www.nanowerk.com/what\\_is\\_graphene.php](https://www.nanowerk.com/what_is_graphene.php).
- [29] B.FARIDA, «Etude de graphène et de GrFET,» Tizi Ouzou, mémoire de fin d'étude 2015/2016.
- [30] By Yanwu Zhu, Shanthi Murali , Weiwei Cai , Xuesong Li , Ji Won Suk , Jeffrey R. Potts , «Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties,». Wiley online library, 2010
- [31] J. Saxler, J. Go´mez Rivas,\* C. Janke, H. P. M. Pellemans, P. Haring Bolívar, and H. Kurz Institut fu¨r Halbleitertechnik, RWTH Aachen, Sommerfeldstrasse 24, D-52056 , Time-domain

measurements of surface plasmon polaritons in the terahertz frequency range J. Saxler .  
American Physical Society, 2004

- [32] «Antenne patch,» 1970.. [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne\\_patch](https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_patch).
- [33] G. Mohamed, «Conception d'une antenne "PIFA" multibandes pour applications sans fil,» 2016.mémoire de master,
- [34] A. AICHE, «ALIMENTATION PAR OUVERTURE D'UNE ANTENNE DE FORME CIRCULAIRE,» M'SILA, 2012 / 2013 , mémoire de master ,
- [35] «Nanotube- Définition et Explications,» [En ligne]. Available: <https://www.techno-science.net/definition/4619.html>.
- [36] Latser, I., Kremers, C., Chigrin, D.N., Jornet, J.M., Lemme,M.C., Cabellos Aparicio, A. and Alarcon, E, «Radiation characteristics of tunable graphennas in the terahertz band,» *Radio Engineering Journal* , vol. 21, n°14, 2012.