

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 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 : Télécommunications
Domaine : Science et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

**Etude et Conception d'une Antenne 5G pour Géolocalisation
des voitures**

Présenté Par :

1) Tennah Hadj

Devant le jury composé de :

Dr. Ameziane Djamel	MCA UAT.B. B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr. Moulessehoul Wassila	MCB UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. SOUIKI Sihem	MCA UAT.B. B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr. BELGACEM Wahiba	MCB C D S (Oran)	Co-Encadrante

Année Universitaire : 2024/2025



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 عين تموشنت- بلحاج بوشعيب-
Université Ain Témouchent- Belhadj Bouchaib -
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Formulaire de déclaration sur l'honneur
Relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité
scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

(Annexe de l'arrêté n°933 du 28 juillet 2016 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat)

Je soussigné,

Etudiant, M. Tennah Hadj

Détenteur d'une carte d'étudiant N° : **191937065019**, délivrée le : 18/09/2023 à Ain Témouchent

Inscrit à la faculté : **Sciences et Technologie**

Département : **D'électronique et des Télécommunications**

Et chargé de préparer un mémoire de fin d'études Master 2 en spécialité **Réseaux Et Télécommunications**.

Intitulé : **Etude et Conception d'une Antenne Intelligente 5G pour Géolocalisation des voitures**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscité.

À Ain Temouchent, le : 26/06/2025

Signature de l'étudiant

Remerciement

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardées en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à nos encadrant Mme SOUIKI Sihem et Mme BELGACEM Wahiba pour leurs précieuse collaboration, pour leur suivis et leurs conseils durant l'évolution de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Mr. AMEZIANE pour l'honneur de présider le jury et à Mme. MOULESSHOUL comme examinatrice.

Enfin, nous tenons à remercier vivement toute personne qui nous a aidés de près ou de loin à élaborer et réaliser ce mémoire.



Dédicaces

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail que je dédie.

A mes très chers parents

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A mon frère

Tennah Bouabdella

A mes professeurs et nos encadrant **Mme SOUIKI Sihem** et **Mme BELGACEM Wahiba** pour leur encadrement attentif, leurs conseils éclairés Leur expertise et leur disponibilité ont été d'une grande valeur, et nous avons beaucoup appris de leurs précieux enseignements.

A nos très chers amis

Samir ; Mehdi ; Anis

A tous ceux qui m'ont supporté et encouragé.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous les étudiant(e)s de ma promotion.

HADJ



Résumé :

L'objectif de ce travail est la conception des antennes intelligentes 5G destinée à la géolocalisation précise des véhicules. Une antenne patch micro-ruban, résonnant à 1,575 GHz, a été modélisée et simulée dans CST Studio Suite selon trois configurations. Deux architectures ont été étudiées : une configuration MIMO composée de 6 éléments, et une deuxième structure composée de 8 éléments (4×2), destinée aux applications GPS. Une étude de déphasage a révélé que cette dernière configuration était la plus performante, avec un gain de 8 dBi et un coefficient de réflexion $S_{11} > -10\text{dB}$. Cette solution permet de dépasser les limites du GPS classique, notamment en milieu urbain, et répond efficacement aux exigences des réseaux 5G pour la mobilité intelligente

Mots-clés : Antenne intelligente, MIMO, 5G, CST Studio Suite, Géolocalisation, Patch micro-ruban, GPS, Beamforming, S_{11} , Gain

Abstract:

The objective of this work is the design of 5G intelligent antennas intended for the precise geolocation of vehicles. A microstrip patch antenna resonating at 1.575 GHz was modeled and simulated in CST Studio Suite in three configurations. Two architectures were studied: a MIMO configuration composed of 6 elements, and a second structure with 8 elements (4×2), designed for GPS applications.

A phase-shift study revealed that the latter configuration was the most efficient, achieving a gain of 8 dBi and a reflection coefficient S11 better than -10 dB.

This solution helps overcome the limitations of conventional GPS systems, especially in urban environments, and effectively meets the requirements of 5G networks for intelligent mobility.

Keywords: Smart antenna, MIMO, 5G, CST Studio Suite, Geolocation, Microstrip patch antenna, GPS, Beamforming

المخلص

الهدف من هذا العمل هو تصميم هوائيات ذكية تعمل بتقنية الجيل الخامس ومخصصة لتحديد موقع المركبات بدقة. تم نمذجة ومحاكاة هوائي ميكروشريطي يعمل عند تردد 1.575 GHz باستخدام برنامج CST ، وذلك وفق ثلاث تكوينات. تم دراسة هيكلين: الأول عبارة عن شبكة ميمو مكونة من 6 عناصر، والثاني يتكون من 8 عناصر (2×4)، وموجه لتطبيقات GPS.

أظهرت دراسة التغيير الطوري أن الهيكل الثاني هو الأكثر كفاءة، حيث حقق كسبًا قدره 8 dBi ومعامل انعكاس S11 أقل من -10 dB.

تتيح هذه الحلول تجاوز حدود نظام GPS التقليدي، خاصة في البيئات الحضرية، وتستجيب بفعالية لمتطلبات شبكات الجيل الخامس الخاصة بالتنقل الذكي.

الكلمات الافتتاحية: هوائي ذكي، ميمو، الجيل الخامس، برنامج CST، تحديد الموقع، هوائي ميكروشريطي، GPS، توجيه الشعاع، S11، الكسب.

Table des matières

<i>Remerciement</i>	I
<i>Dédicaces</i>	I
<i>La liste des figures</i>	VII
La liste des tableaux	X
Liste des abréviations	XI
Introduction générale	1
Chapitre 01	1
Chapitre 01	1
I. Introduction	4
I.1. Définition d'antenne imprimée	4
I.2. Historique	5
I.3. Structure d'une antenne imprimée	5
I.3.1. La forme d'éléments rayonnants d'antennes imprimées	6
I.4. Principe de fonctionnement	7
I.5. Les caractéristiques des antennes imprimées	7
1.5.1 Caractéristiques électriques	7
1.5.2 Caractéristiques de rayonnement	11
I.6. Types des antennes	14
<i>I.7. Techniques d'alimentation et de miniaturisation d'antennes imprimées</i>	15
I.7.1. Alimentation avec contact	16
I.7.2. Alimentation sans contact (par proximité)	17
I.8. <i>Techniques d'adaptation des antennes imprimées</i>	19
I.8.1. Adaptation par ligne quart d'onde	19
I.8.2. Adaptation par stub	20
I.8.3. Adaptation avec encoches	20
I.9. Avantages et limites des antennes imprimées	21

I.10. Les équations caractéristiques d'une antenne patch	22
I.11. Domaines d'applications des antennes patch	24
I.12. Conclusion	24
Chapitre 02	4
II. Introduction	26
II.1. Les réseaux cellulaires 5G pour la géolocalisation des véhicules	27
II.2. Techniques de géolocalisation des véhicules	27
II.3. Les bandes de fréquences utilisées pour la géolocalisation 5G	31
II.5. La technologie MIMO Massive 5G	33
II.6. Définition du Système MIMO	33
II.7. Principes du Fonctionnement de système MIMO	33
II.8. Les techniques utilisées par le système MIMO	34
II.9. Impact de la technologie MIMO sur la précision de géolocalisation	34
II.10. L'emplacement des antennes MIMO 5G dans une voiture	35
II.11. Beamforming 5G	36
II.12. Domaines d'application de la technologie d'antennes intelligentes 5G	36
II.13. Conclusion	37
Chapitre 03	39
III. Introduction	40
III.1. Conception d'antennes imprimées	40
III.2. Résultats de simulations	43
III.2.1. Coefficient de réflexion	43
III.2.2. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	44
III.2.3. Diagramme de rayonnement	44
III.3. Antennes MIMO à six éléments 6x1	46
III.3.1. Résultats de simulations	47
III.3.1.1 Coefficient de réflexion (S11)	47

III.3.1.2. Coefficient de transmission (S21)	47
III.3.1.3. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	48
III.3.1.4. Diagramme de rayonnement	48
III.3.1.5. Courant	50
III.4. Antennes MIMO à 4x2 éléments	50
III.4.1.2. Coefficient de transmission (S21)	53
III.4.1.3. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	53
III.4.1.4. Diagramme de rayonnement	54
III.4. Conclusion	56
Conclusion Générale	57
IV. Présentation d'Outils de simulation	62
Bibliographies	65

La liste des figures

Chapitre 1

Figure 1 : Exemple d'antennes patch [2].....	4
Figure 2 : Structure d'une antenne imprimée [8].	6
Figure 3 : Les différentes formes d'antennes imprimées [6].....	6
Figure 4 : Fonctionnement d'une antenne imprimée [11].	7
Figure 5 : Le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence [14].	8
Figure 6 : Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion [17].	10
Figure 7 : Modèle d'impédance complexe d'une antenne [20].	10
Figure 8 : Représentation du champ électrique pour une polarisation linéaire, circulaire et elliptique.	12
Figure 9 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive	13
Figure 10 : Diagramme de rayonnement pour différents types d'antenne [28].	14
Figure 11 : Angle d'ouverture d'une antenne [20].	14
Figure 12 : Types des antennes [13].	15
Figure 13 : Alimentation par ligne microbande [21].	16
Figure 14 : Alimentation par sonde coaxiale [40].	17
Figure 15 : Alimentation par couplage électromagnétique [15].	18
Figure 16 : Alimentation par guide d'onde coplanaire [14].	18
Figure 17 : Alimentation par le couplage par fente [14].	19
Figure 18 : Modélisation de l'antenne [38].	19
Figure 19 : adaptation par quart d'onde [45].	20
Figure 20 : Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub [47].	20
Figure 21 : patch adapté par encoches de longueur [7].	21

Chapitre 2

Figure 22 : L'architecture du réseau 5G [53].	27
Figure 23 : Technique de géolocalisation GPS par satellite.	28
Figure 24 : principe de Triangulation.	29
Figure 25 : Fréquences utilisées pour la 5G [53].	31
Figure 26 : Système à commutation du faisceau [53].	32
Figure 27 : Schéma fonctionnel du système à commutation de faisceaux [76].	32
Figure 28 : Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO [47].	34
Figure 29 : L'emplacement de l'antenne MIMO 5G dans une voiture.	35

Figure 30: Technologie Beamforming. 36

Chapitre 3

Figure 31: Structure initiale et modifiée de l'antenne simulée. 41

Figure 32: Coefficient de réflexion de l'antenne initial simulée. 42

Figure 33 : Antenne optimisée avec encoche. 43

Figure 34: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale optimisée. 44

Figure 35: Rapport d'onde stationnaire (VSWR). 44

Figure 36 : Diagramme de rayonnement 3D d'antenne optimisée. 45

Figure 37: Diagramme de rayonnement en 2D ($\phi=90^\circ$) de l'antenne optimisée à la fréquence 1.575 GHz. 45

Figure 38: La distribution Courant sur d'antenne optimisée. 46

Figure 39: Géométrie d'antenne MIMO à six éléments et sa structure sous CST Microwave studio. 46

Figure 40: Courbes des Coefficients de réflexion du réseau MIMO à six éléments en fonction de la fréquence. 47

Figure 41: Courbes des Coefficients de transmission du réseau MIMO à six éléments en fonction de la fréquence. 48

Figure 42: Rapport d'onde stationnaire (VSWR) à six éléments en fonction de la fréquence. 48

Figure 43: Diagramme de rayonnement 2D et 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 1.575 GHz. 50

Figure 44: Courant de surface d'antenne MIMO à la fréquence 1.575 GHz. 50

Figure 45 : Géométrie d'antenne MIMO à huit éléments et sa structure sous CST Microwave studio. 51

Figure 46 : Courbes des Coefficients de réflexion du réseau MIMO à huit éléments en fonction de la fréquence. 52

Figure 47 : Courbes des Coefficients de transmission du réseau MIMO à huit éléments en fonction de la fréquence. 53

Figure 48 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR) à huit éléments en fonction de la fréquence. 53

Figure 49 : Diagramme de rayonnement 2D et 3D de l'antenne MIMO à huit éléments à la fréquence 1.575 GHz. 55

Figure 50 : Courant de surface d'antenne MIMO à huit éléments à la fréquence 1.575 GHZ.
..... 55

Figure 51: L'interface graphique de logiciel CST Microwave Studio 2019..... 63

La liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres géométriques de l'antenne simulée.....	41
Tableau 2: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée.	43
Tableau 3 : Paramètres de l'antenne MIMO à six éléments.	46
Tableau 4 : Paramètres de l'antenne MIMO à huit éléments.....	51
Tableau 5 : Phases d'excitation appliquées aux ports dans la configuration MIMO 4×2.	52
Tableau 6 : Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 1.575...	56

Liste des abréviations

5G : la cinquième génération

AOA : Angle of Arrival

CST : Computer Simulation Technology

GPS : Global Positioning System

MIMO : Multiple Input Multiple Output

RSS : Received signal strength

S11 : coefficient de réflexion

S21 : Coefficient De Transmission

SBA : Switched Beam Antenna

SISO : Single Input Single Output

SNR : Rapport Signal / bruit

TDOA : Time Différence of Arrival

TOS : Taux d'onde stationnaire

Introduction Générale

Introduction générale

Les communications mobiles ont eu un impact significatif sur le développement économique et social à l'échelle mondiale. Aujourd'hui, elles constituent un élément central du quotidien de millions de personnes, et leur importance ne cesse de croître avec l'essor des objets connectés, des véhicules autonomes et des systèmes de localisation en temps réel. Face à ces évolutions, la cinquième génération de réseaux mobiles (5G) représente une avancée technologique majeure. Elle se distingue par des débits de données très élevés, une latence ultra-faible, une connectivité massive et une fiabilité accrue. Cette performance repose sur l'intégration de technologies avancées, telles que les antennes intelligentes, le Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) et le beamforming.

Parmi ces technologies, le Massive MIMO offre de nombreux avantages : il accroît la capacité du réseau, améliore la qualité des liaisons radio et facilite la géolocalisation des utilisateurs. Combiné au beamforming, il permet de focaliser l'énergie électromagnétique dans des directions spécifiques, renforçant ainsi la précision des systèmes de localisation, notamment lorsqu'il est associé à des solutions comme le GPS. Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique et porte sur la conception et la simulation d'une antenne intelligente de type patch fonctionnant à la fréquence GPS de 1,575 GHz. Cette antenne est intégrée dans une structure MIMO 3×3 dans le but de développer un système de positionnement fiable, à faible coût et conforme aux exigences des réseaux 5G.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** est consacré aux antennes imprimées, en détaillant leurs caractéristiques, les méthodes d'alimentation, les techniques d'adaptation d'impédance et les principes des antennes intelligentes.
- **Le deuxième chapitre** introduit les fondamentaux des réseaux 5G, en présentant leur architecture, les bandes de fréquences exploitées, ainsi que les technologies clés comme le Massive MIMO et le beamforming.
- **Le troisième chapitre** traite de la conception et de la simulation d'une antenne patch optimisée, intégrée à une architecture MIMO intelligente. L'analyse des performances s'appuie sur des paramètres tels que le coefficient de réflexion (S_{11}), le gain, la

directivité et la réponse angulaire, dans le cadre d'une configuration de beamforming statique.

Enfin, la conclusion présente une synthèse des résultats obtenus et propose des perspectives pour le développement futur d'antennes intelligentes, particulièrement dans le domaine de la géolocalisation de véhicules en environnement 5G.

Chapitre 01

Généralité Sur Les Antennes Imprimées

I. Introduction

L'essor des technologies émergentes dans les domaines des communications spatiales et des systèmes de contrôle à distance, qui exigent des dispositifs à la fois miniaturisés, économiques et simples à fabriquer, a fortement contribué au développement des antennes à micro-ruban, également appelées antennes imprimées ou patches. Grâce à leurs nombreux avantages compacité, légèreté, faible coût et facilité d'intégration. Ces antennes sont aujourd'hui largement utilisées dans des domaines variés tels que les télécommunications, les systèmes radar et les technologies de positionnement par satellite (GPS). Ce chapitre présente les principes fondamentaux des antennes imprimées, en mettant en lumière leurs caractéristiques clés telles que le coefficient de réflexion, la largeur de bande, le diagramme de rayonnement et la polarisation. Il aborde également les différentes méthodes d'alimentation, qui permettent d'adapter le comportement de l'antenne à des applications spécifiques, tout en exposant les avantages et les limitations de cette technologie.

I.1. Définition d'antenne imprimée

Une antenne imprimée est fabriquée sous forme de circuit imprimé, où le rayonnement est généré par un motif conducteur obtenu par photogravure sur un substrat diélectrique. Le patch, élément rayonnant, est situé sur la face du substrat opposée au plan de masse. Ces antennes se distinguent par leur compacité et leur capacité d'intégration dans des circuits électroniques, ce qui les rend essentielles dans des applications telles que les télécommunications, les systèmes de positionnement global, les radars et les communications par satellite. Elles sont conçues pour émettre et recevoir des ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquences pour laquelle elles ont été optimisées[1].



Figure 1 : Exemple d'antennes patch [2].

I.2. Historique

Le concept d'antenne imprimée émerge en 1953 avec l'Américain Deschamps, qui propose d'alimenter un réseau d'éléments rayonnants via des lignes de transmission micro-ruban. Ses conceptions, principalement des cornes évasées planes, ne correspondent toutefois pas encore à l'antenne patch micro-ruban telle qu'on la connaît aujourd'hui. En 1956, en France, Gutton et Baissinot obtiennent un brevet pour une antenne micro-ruban, marquant une avancée significative. Leur travail relance l'intérêt pour cette technologie, notamment pour son potentiel en tant que système de transmission planaire.

En 1960, Lewin étudie le rayonnement provoqué par les discontinuités des strip-lines, tandis que Wheeler et Purcell développent de nouvelles techniques pour les lignes de transmission micro-ruban. En 1969, Denlinger améliore l'efficacité des résonateurs micro-ruban rectangulaires et circulaires en élucidant leur mécanisme de rayonnement [3]. Un tournant majeur survient en 1970 avec Munson, qui présente pour la première fois une antenne patch micro-ruban lors d'un symposium. En 1974, il publie un article décrivant des antennes micro-ruban enveloppantes et des patches rectangulaires. Parallèlement, en 1972, John Howell conçoit pour la NASA une antenne imprimée à polarisation linéaire et circulaire, fonctionnant dans les bandes L et UHF. De son côté, Robert Munson développe une antenne imprimée intégrée à la circonférence d'un missile, une innovation majeure pour les applications militaires et aérospatiales [4].

I.3. Structure d'une antenne imprimée

Une antenne imprimée est composée de trois éléments principaux : le patch, le substrat diélectrique et le plan de masse. Le patch, généralement de forme rectangulaire, circulaire ou triangulaire, est une surface conductrice dont les dimensions sont de l'ordre de la demi-longueur d'onde, déterminées par la fréquence de résonance. Il est alimenté par une ligne de transmission (souvent une ligne micro-ruban) dont l'impédance doit être soigneusement adaptée pour minimiser les réflexions. Le substrat diélectrique, placé entre le patch et le plan de masse, est un matériau isolant dont l'épaisseur est faible par rapport à la longueur d'onde, avec une permittivité relative typiquement comprise entre 2,2 et 12,2. Ce substrat influence fortement les performances de l'antenne : pour un rendement optimal, il est préférable de choisir un matériau à faibles pertes et à faible constante diélectrique. Enfin, le plan de masse, généralement en cuivre, est situé sur la face inférieure du substrat. Bien qu'idéalement supposé infini, sa taille

réelle est limitée à trois à quatre fois la longueur d'onde, ce qui peut poser des contraintes d'intégration. Il sert de référence électrique et contribue à la répartition du champ électromagnétique au-dessus de l'antenne [7].

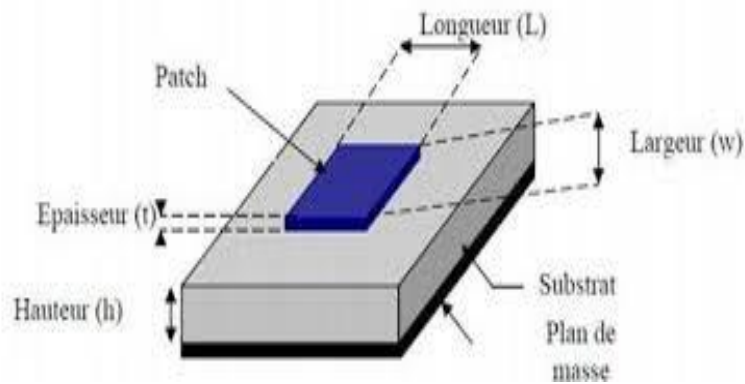


Figure 2: Structure d'une antenne imprimée [8].

I.3.1. La forme d'éléments rayonnants d'antennes imprimées

En pratique, la forme des éléments rayonnants influence les modes d'excitation de l'antenne, ce qui affecte directement ses propriétés de rayonnement. Les formes les plus courantes incluent le carré, le rectangle et le disque, tandis que la forme annulaire est rarement utilisée. Les antennes imprimées peuvent adopter diverses géométries, en fonction des exigences liées à la directivité, la bande passante ou l'intégration avec d'autres circuits électroniques, afin d'optimiser leurs performances pour des applications spécifiques. La Figure illustre les différentes formes possibles pour une antenne imprimée [5].

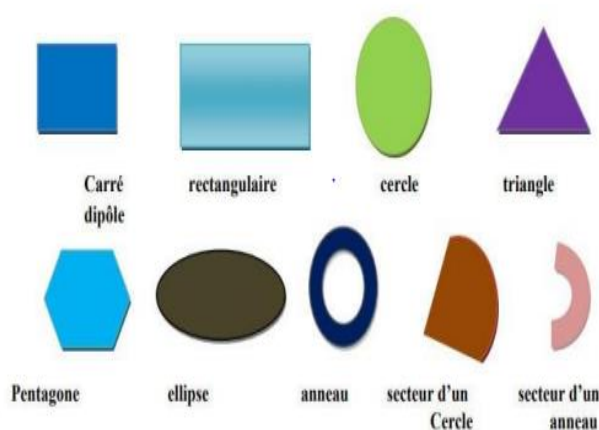


Figure 3: Les différentes formes d'antennes imprimées [6].

I.4.Principe de fonctionnement

Une antenne micro-ruban peut être modélisée comme une cavité résonante. Dans une telle cavité, les ondes électromagnétiques sont confinées et réfléchies par les parois, générant des modes de résonance. De manière similaire, dans une antenne micro-ruban, le patch métallique agit comme une cavité résonante, où les ondes électromagnétiques sont piégées et guidées le long de la surface du substrat diélectrique, selon des modes de type TM [9]. Cette configuration entraîne des pertes au niveau des parois magnétiques, une partie du signal étant réfléchi successivement entre le plan de masse et le conducteur supérieur. Les configurations et les directions principales du champ rayonné dépendent de l'orientation des lignes de champ entre les bords du patch et le plan de masse. En général, le mode fondamental est le mode de fonctionnement prédominant pour ce type d'antennes. Il transporte la majeure partie de l'énergie et se caractérise par une distribution du champ électrique sous le patch, avec au moins une dimension équivalant à une demi-longueur d'onde (voir Figure 4). Les courants de surface générés sur le patch s'alignent le long de l'axe de symétrie passant par le point d'excitation [10].

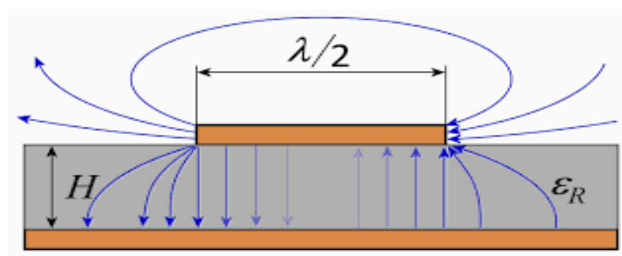


Figure 4 : Fonctionnement d'une antenne imprimée [11].

I.5.Les caractéristiques des antennes imprimées

Dans les communications sans fil, chaque application met en avant des spécificités propres aux antennes. En général, une antenne conçue pour une application particulière ne peut pas être directement utilisée pour d'autres. Les caractéristiques des antennes se divisent en deux grandes catégories :

I.5.1 Caractéristiques électriques

I.5.1.1 Le coefficient de réflexion S11

La qualité d'adaptation d'une antenne est déterminée par son impédance caractéristique (généralement 50 ohms) ou son coefficient de réflexion S11.

$$Z_e = R + j(X) \quad (1)$$

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_t} \quad (2)$$

Le coefficient de réflexion S_{11} représente le transfert d'énergie de l'antenne et est mesuré à l'entrée de l'antenne. Ce paramètre change de valeur en fonction de la fréquence. Pour garantir une adaptation adéquate dans la plage de fréquence requise, nous appliquons la condition suivante : $|S_{11}| \leq -10$ dB. Sa valeur varie entre de 0 (aucune réflexion) à 1 (réflexion totale) [12]. Pour une antenne d'impédance Z reliée à la source via une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (typiquement 50Ω), on peut définir le coefficient de réflexion comme suit [13] :

$$S_{11} = \frac{Z_e(f) - Z_0}{Z_e(f) + Z_0} \quad (3)$$

Avec :

- ✓ Z_e : est l'impédance d'entrée de l'antenne.
- ✓ Z_c : est l'impédance caractéristique (Généralement égale à 50Ω).

Le module du coefficient de réflexion est généralement exprimé en décibels (dB) et est exprimé sous la forme $|S_{11}|$ et défini comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad (4)$$

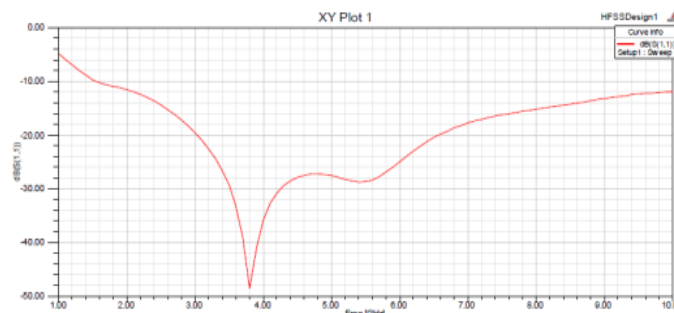


Figure 5 : Le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence [14].

I.5.1.2 Le taux d'onde stationnaire (TOS)

Le rapport d'onde stationnaire (TOS), ou VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), est un indicateur clé de l'adaptation d'impédance entre une ligne de transmission et une antenne [15]. Lorsqu'il y a une désadaptation, une partie de l'onde incidente est réfléchiée, créant des

interférences avec l'onde directe, ce qui engendre des ondes stationnaires le long du guide de transmission. Ces ondes présentent des variations d'amplitude, avec des maxima appelés ventres et des minima appelés nœuds. Le VSWR est défini comme le rapport entre ces amplitudes maximale et minimale, et peut aussi être exprimé à partir du coefficient de réflexion $|S_{11}|$ selon une relation mathématique spécifique [16].

$$TOS = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (5)$$

I.5.1.3 La fréquence de résonance et la largeur de bande

La fréquence de résonance f correspond à la fréquence à laquelle l'antenne fonctionne de manière optimale, c'est-à-dire celle pour laquelle le coefficient de réflexion est minimal. La plage de fréquences où le transfert d'énergie entre la source et l'antenne reste efficace est appelée bande passante de l'antenne. Lorsque le diagramme de rayonnement reste stable sur cette plage, la bande passante peut être déterminée à partir du coefficient de réflexion. Bien qu'il n'existe pas de seuil universel strict, il est généralement admis que le coefficient de réflexion doit rester inférieur à -10 dB, voire -15 dB, sur l'ensemble de la bande passante pour garantir une bonne adaptation [14]. La bande passante absolue est exprimée par l'équation (7), tandis que la bande passante relative est donnée par l'équation (1).

$$B_p = f_{max} - f_{min} \quad (6)$$

$$B_p(\%) = \left[\frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right] \times 100 \quad (7)$$

Avec

- ✓ f_c : est la fréquence centrale ou de résonance.

Où :

- ✓ f_{min} : La fréquence minimale.
- ✓ f_{max} : La fréquence maximale.

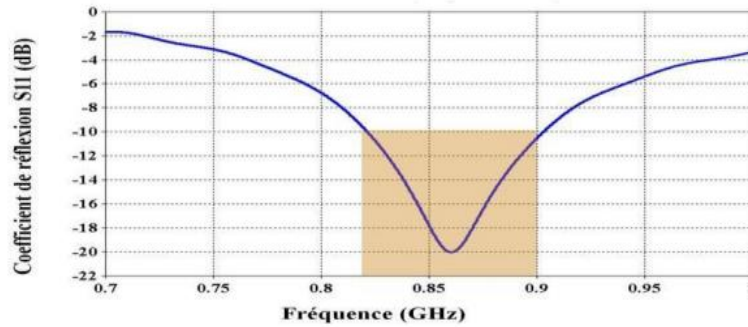


Figure 6 : Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion [17].

1. Impédance d'entrée de l'antenne

En général, l'impédance d'entrée d'une antenne patch est exprimée sous la forme d'une impédance complexe (Z_a) représentée par la résistance (R_a) et la réactance (X_a) [19].

L'équation suivante montre le rapport de ces deux quantités :

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (8)$$

- ✓ Z_a : Impédance de l'antenne.
- ✓ R_a : Résistance de l'antenne
- ✓ X_a : Réactance de l'antenne

Une antenne peut être représentée par un circuit équivalent de type RLC, comme illustré à la Figure 7. Dans ce modèle, la résistance équivalente, généralement comprise entre 50Ω et 100Ω , reflète les pertes ohmiques et le rayonnement de l'antenne. La réactance, quant à elle, dépend de la conception de l'antenne et des conditions de fonctionnement ; elle peut être soit inductive, soit capacitive, et est représentée par une composante imaginaire dans l'impédance du circuit. Ce modèle permet de mieux analyser le comportement de l'antenne en termes d'adaptation d'impédance et de résonance.

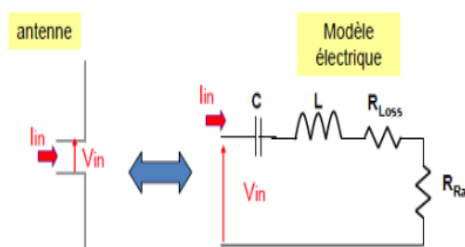


Figure 7 : Modèle d'impédance complexe d'une antenne [20].

L'impédance d'entrée est influencée par divers facteurs tels que les dimensions physiques du patch, le matériau du substrat diélectrique et la fréquence de résonance [21].

I.5.2. Caractéristiques de rayonnement

I.5.2.1. La Directivité

La directivité d'antenne définit la manière dont elle concentre les émissions dans certaines directions de l'espace. Il est défini comme : le rapport entre l'intensité du rayonnement d'une antenne dans une direction particulière et l'intensité de la puissance produite par une source isotrope [22].

La directivité est donnée par la relation suivante :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r/4\pi} = 4\pi \frac{p(\theta, \varphi)}{p_r} \quad (9)$$

Avec :

- ✓ $p(\theta, \varphi)$: La Puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, φ) .
- ✓ P_r : est la puissance totale rayonnée.

Nous pouvons facilement déterminer la directivité d'une antenne en fonction de son diagramme de rayonnement. Lorsqu'une antenne a une ouverture rayonnante plus étroite, elle est considérée comme plus directionnelle, tandis que si son ouverture est plus large, elle est considérée comme moins directionnelle. On dit qu'il s'agit d'une antenne à faible directivité.

I.5.2.2. Le Gain

Le **gain** d'une antenne est le rapport entre la **puissance rayonnée** P_r dans la direction de son lobe principal (direction de rayonnement maximal) et la **puissance d'alimentation** P_a qu'elle reçoit, comparée à une antenne de référence (souvent une antenne isotrope). Le gain prend en compte la **directivité** de l'antenne, qui est le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans la direction principale et celle rayonnée par une antenne isotrope pour la même puissance d'alimentation.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (10)$$

- ❖ $P(\theta, \varphi)$ = Puissance rayonné dans une direction.
- ❖ P_a = Puissance rayonnée par l'antenne (Puissance d'alimentation ou entrée)

Il peut être exprimé en fonction de rendement et la directivité :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (11)$$

I.5.2.3. Polarisation

La polarisation est déterminée par la direction du champ électrique émis, caractérisée par le type de polarisation émise dans une direction et une distance donnée [25]. L'état de polarisation d'une antenne peut être linéaire, circulaire ou elliptique. En polarisation linéaire, le vecteur décrit l'évolution du champ électrique dans une zone au fil du temps. En général, le graphique dessiné est une ellipse, et le premier champ est polarisé elliptiquement. La polarisation est cruciale pour une communication efficace, car elle affecte la réception des antennes par d'autres antennes et appareils [26].

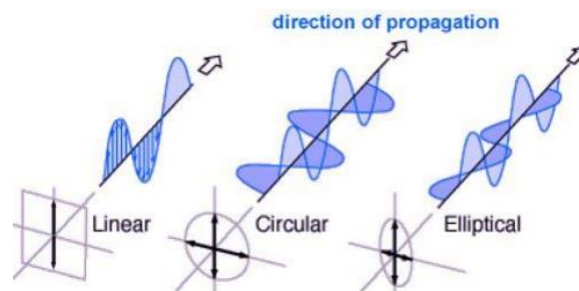


Figure 8 : Représentation du champ électrique pour une polarisation linéaire, circulaire et elliptique.

I.5.2.4. Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne se définit comme le rapport entre la puissance qu'elle émet et la puissance qui lui est fournie, c'est-à-dire[12] :

$$\eta = \frac{p_{rat}}{p_t} \quad (12)$$

p_{rat} : Puissance rayonnée

p_t : Puissance transmise à l'antenne

Avec P_{ray} et P_t sont données par :

$$P_{ray} = \iint r^2(\theta, \varphi) d\varphi \text{Et} P_t = 4\pi r^2 S_{ri} \quad (13)$$

S_{ri} : La surface effective

Selon l'équation, l'efficacité peut être définie comme le quotient du gain et de la directivité :

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \quad (14)$$

I.5.2.5. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique des caractéristiques de rayonnement d'une antenne. Il visualise, en 2D ou en 3D, la distribution de la puissance, du gain ou des champs électriques émis par l'antenne. il est donné par la relation suivante :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\Theta_0, \varphi_0)} \quad (15)$$

Avec :

$P(\Theta, \varphi)$ = la puissance rayonnée par unité d'angle solide.

$P_0(\Theta_0, \varphi_0)$ = Puissance rayonnée max.

Généralement, le diagramme de rayonnement est observé dans deux directions : le plan E (vertical) et le plan H (horizontal) qui correspondent respectivement aux plans où les champs électriques et magnétiques culminent [27]. Figure 9 illustre les fluctuations de la puissance émise par l'antenne par unité d'angle solide dans toutes les directions de l'espace. En effet, l'énergie diffusée n'est pas répartie uniformément dans l'espace, certaines directions étant privilégiées, on les appelle lobes de rayonnement. Différents types de représentation des diagrammes sont utilisés :

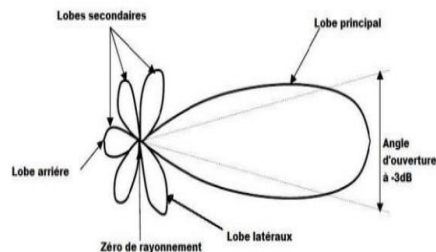


Figure 9: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive

Les antennes directionnelles se distinguent par leur capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une ou plusieurs directions privilégiées, ce qui les rend plus puissantes dans ces axes spécifiques. Cette concentration améliore les performances de transmission et de réception sur

de longues distances, tout en réduisant les interférences provenant d'autres directions. Le diagramme de rayonnement typique d'une antenne directionnelle illustre clairement cette répartition inégale de l'énergie, comme présenté à la Figure 9 [13].

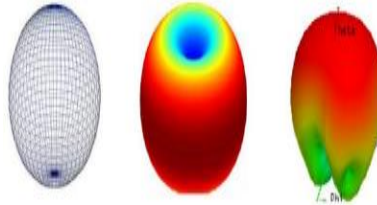


Figure 10: Diagramme de rayonnement pour différents types d'antenne [28].

I.5.2.6. Angle D'ouverture

La largeur du lobe principal d'une antenne est caractérisée par l'angle d'ouverture, également appelé largeur du faisceau (beamwidth). Plus précisément, l'angle d'ouverture à -3 dB désigne l'intervalle angulaire autour de la direction de rayonnement maximal dans lequel la puissance rayonnée reste supérieure ou égale à la moitié de cette puissance maximale. Cette zone représente la portion de l'espace où se concentre l'essentiel du rayonnement émis par l'antenne [20].

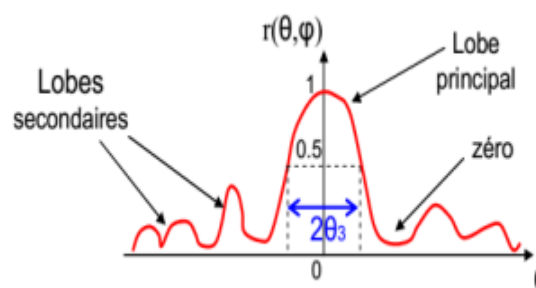


Figure 11: Angle d'ouverture d'une antenne [20].

I.6.Types des antennes

Une antenne peut émettre dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une direction précise (antenne directionnelle). Dans ces deux catégories on retrouve une multitude de types d'antennes divers et variés, qui peuvent être organisés en familles spécifiques [24].

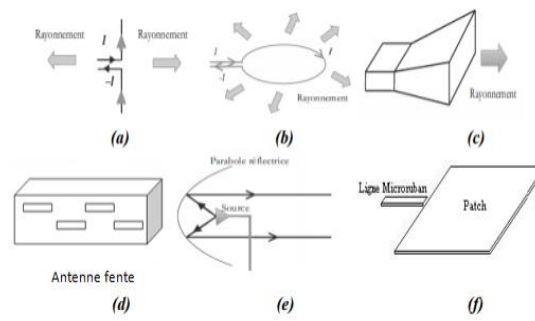


Figure 12 : Types des antennes [13].

Les antennes se déclinent en plusieurs types, chacun adapté à des applications spécifiques : l'antenne dipôle, formée de deux fils parallèles connectés par une ligne à deux conducteurs, est utilisée aux basses fréquences (Fig12.a) ; la boucle magnétique, constituée d'un conducteur en boucle alimenté par une ligne à deux fils, fonctionne de manière similaire (Fig12.b) ; l'antenne cornet, un guide d'onde rectangulaire à section variable, facilite la transition des ondes vers l'espace libre à haute fréquence (Fig12.c) ; l'antenne à fentes, dotée de fentes sur un guide d'onde rectangulaire, permet un rayonnement perpendiculaire au plan perforé (Fig.12.d) l'antenne parabolique réfléchissante, combinant une source d'émission et un réflecteur parabolique métallique, concentre les ondes (Fig.12.e) ; enfin, les antennes imprimées micro-ruban, ou antennes patch, composées d'un substrat diélectrique avec un plan de masse et un patch métallique gravé générant des courants de surface, sont de plus en plus utilisées pour leur compacité et leur polyvalence (Fig.12.f) [13].

I.7. Techniques d'alimentation de d'antennes imprimées

Il est primordial d'assurer une bonne adaptation entre l'antenne et sa source d'alimentation, condition indispensable pour garantir un transfert optimal de l'énergie. Le bon fonctionnement de l'antenne dépend étroitement de la manière dont elle est intégrée au système global [34]. Les antennes imprimées peuvent être alimentées selon deux grandes approches : avec contact direct ou par couplage (sans contact direct). Dans la première, l'énergie RF est transmise directement au patch de l'antenne à l'aide de conducteurs tels qu'une ligne micro-ruban ou un câble coaxial. Dans la seconde, l'alimentation est réalisée par couplage électromagnétique, par exemple via une fente ou un dispositif de proximité, sans connexion physique directe [35]. Les principales méthodes d'alimentation utilisées sont :

- ✓ Alimentation par des lignes micro-ruban.

- ✓ Alimentation coaxiale directe.
- ✓ Alimentation par couplage électromagnétique.
- ✓ Alimentation par couplage d'ouverture dans le plan de masse

I.7.1. Alimentation avec contact

Cette forme d'énergie permet une connexion directe entre la ligne de transmission et la surface rayonnante. Il existe deux formes d'alimentation par contact :

I.7.1.1 Ligne micro ruban

Dans ce mode d'alimentation, la bande de transfert est connectée directement au bord du patch micro-ruban. La largeur de la bande de pilotes est inférieure à la largeur du patch.

L'avantage de cette forme d'alimentation est qu'elle peut être écrite du même côté de l'antenne. Il est facile à réaliser et facile à adapter à la résonance. C'est l'une des méthodes les plus courantes pour imprimer des antennes. L'inconvénient est qu'il produit des rayonnements indésirables, et bande passante limitée (généralement 2 à 5 %) [36].

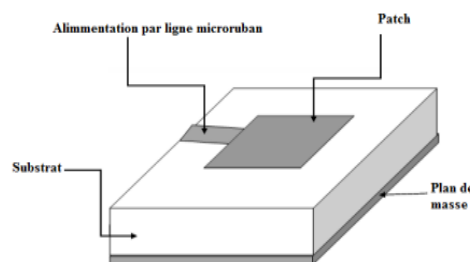


Figure 13: Alimentation par ligne microbande [21].

Les antennes micro-ruban sont couramment utilisées dans de nombreuses applications où les exigences en matière de taille, de coût, de performances et de facilité d'installation sont critiques. En agissant comme des antennes discrètes, elles offrent des solutions fiables pour des utilisations professionnelles telles que la transmission sans fil, la radio mobile et les applications dans les secteurs de l'aviation et de l'aérospatiale. Ils sont faciles à fabriquer et, en fonction des besoins de conception, offrent différentes alternatives en termes de fréquence de résonance, de diagramme de rayonnement, de polarisation et d'impédance [38].

I.7.1.2 Sonde coaxiale

Le câble coaxial est couramment utilisé pour alimenter une antenne, avec son conducteur interne connecté au patch rayonnant et son conducteur externe relié au plan de masse (Figure

19) [39]. Cette méthode d'alimentation offre l'avantage de pouvoir être implémentée à n'importe quel point choisi sur le patch, facilitant ainsi la fabrication. Cependant, elle présente des inconvénients, notamment une asymétrie potentielle du diagramme de rayonnement due à un pic de courant au niveau du patch. De plus, le perçage du plan de masse, du diélectrique et des composants plaqués entraîne des pertes. Cette technique est particulièrement répandue pour les antennes de forme circulaire ou annulaire [5]. L'équation suivante donne une estimation de l'impédance caractéristique Z_c d'un câble coaxial de rayons intérieur a , extérieur b et un milieu caractérisé par μ et ε :

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\ln(b/a)}{2\pi} \quad (16)$$

Dans la figure 19 en représente un prototype d'antenne alimenter par une sonde coaxiale :

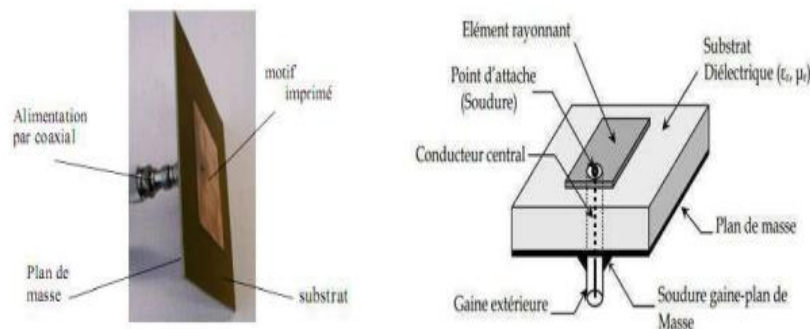


Figure 14: Alimentation par sonde coaxiale [40].

I.7.2. Alimentation sans contact (par proximité)

Dans ce système d'alimentation, l'énergie est transférée à l'antenne sans contact direct avec la couche métallique. Les technologies de couplage incluent l'alimentation par emplacement et l'alimentation par ligne de proximité.

I.7.2.1. Alimentation par couplage électromagnétique (en sandwich)

Les antennes patch peuvent également être alimentées par couplage électromagnétique des lignes de transmission aux éléments rayonnants présente à la figure 19. Dans ce cas, le résonateur et les lignes électriques se trouvent du même côté du plan de masse. L'antenne se compose de deux substrats, avec une ligne de transmission micro-ruban sur le substrat inférieur et une ligne de transmission micro ruban se terminant par un circuit ouvert sous un patch imprimé sur le substrat supérieur [42].

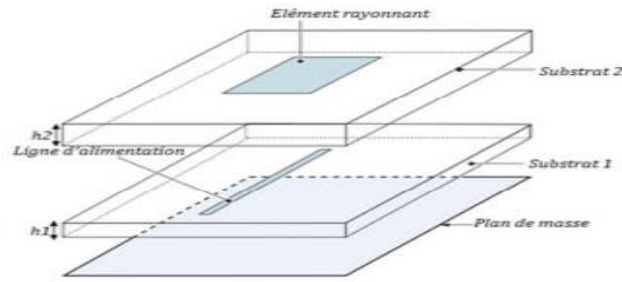


Figure 15: Alimentation par couplage électromagnétique [15].

I.7.2.2. Alimentation par guides d'ondes coplanaires

La surface supérieure du substrat du dissipateur thermique est dotée de composants Radiant. Lorsque les lignes électriques et les plans de masse sont en surface inférieure du substrat [14].

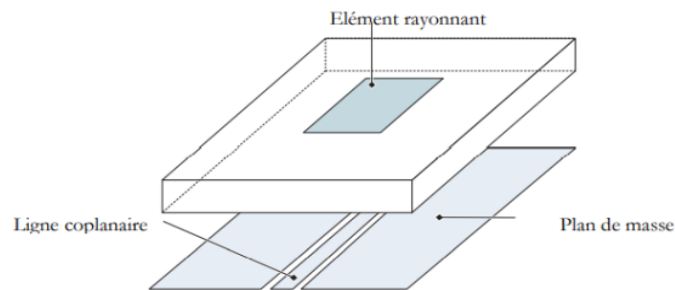


Figure 16 : Alimentation par guide d'onde coplanaire [14].

I.7.2.3. Couplage par fente

Ce type d'alimentation repose sur une configuration où des patches rayonnants sont couplés à des lignes d'alimentation micro-ruban, séparées par un plan de masse, comme illustré dans la Figure I.6. La connexion entre le patch et la ligne d'alimentation s'effectue à travers des ouvertures ou fentes dans le plan de masse. Le couplage entre la ligne d'alimentation et le patch dépend de la forme, de la taille et de la position de ces ouvertures. La présence du plan de masse entre le patch et les lignes d'alimentation réduit significativement les interférences électromagnétiques. En général, le substrat inférieur est constitué de matériaux à forte permittivité diélectrique, tandis que le substrat supérieur utilise des matériaux à faible constante diélectrique pour optimiser le rayonnement des patches [20].

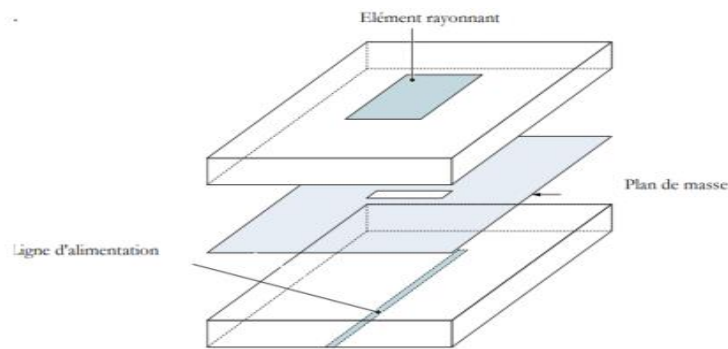


Figure 17: Alimentation par le couplage par fente [14].

I.8. Techniques d'adaptation des antennes imprimées

Les techniques d'adaptation des antennes imprimées visent à optimiser l'impédance pour maximiser le transfert d'énergie, en utilisant des méthodes comme les lignes d'alimentation micro-ruban, les stubs, ou les réseaux d'adaptation. Ces approches permettent d'améliorer la bande passante et de réduire les pertes, assurant ainsi une performance optimale pour des applications spécifiques.

I.8.1. Adaptation par ligne quart d'onde

L'adaptation par ligne quart d'onde est une technique utilisée pour ajuster l'impédance d'une antenne imprimée en insérant une ligne de transmission de longueur égale à un quart de la longueur d'onde à la fréquence de résonance. Cette ligne, dont l'impédance caractéristique est calculée pour transformer l'impédance de l'antenne vers celle de la source, permet de maximiser le transfert d'énergie et d'améliorer l'efficacité du rayonnement.

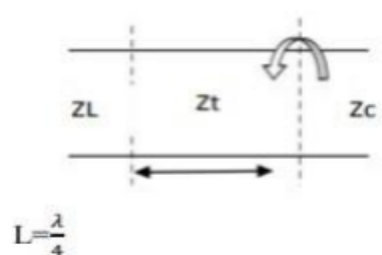


Figure 18: Modélisation de l'antenne [38].

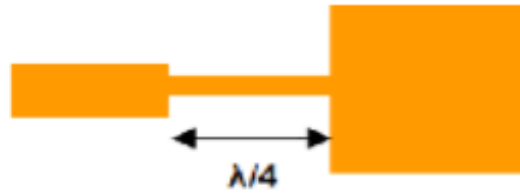


Figure 19: adaptation par quart d'onde [45].

I.8.2. Adaptation par stub

L'adaptation par stub consiste à ajouter une ligne de transmission courte, appelée stub, en parallèle ou en série avec la ligne d'alimentation d'une antenne imprimée, pour ajuster son impédance. La longueur et la position du stub, généralement ouvert ou court-circuité, sont optimisées pour compenser les désadaptations d'impédance, améliorant ainsi le transfert d'énergie et la bande passante. Analyse théorique pour Modélisation de l'antenne à Adaptation simple effectuée par calcul de Z_{in} :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta d)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta d)} \quad (17)$$

Z_{in} : L'impédance vue à une distance d de l'antenne.

Z_0 : Impédance caractéristique de l'antenne.

Z_L : Impédance de l'entrée.

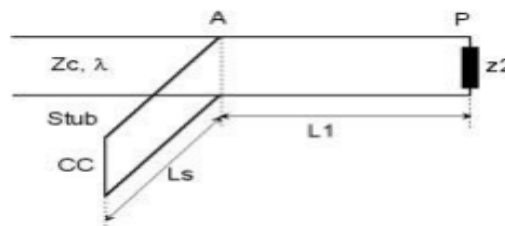


Figure 20: Modélisation de l'antenne à Adaptation simple stub [47].

I.8.3. Adaptation avec encoches

Pour assurer une bonne adaptation d'impédance entre l'antenne et sa ligne d'alimentation, il est courant de recourir à des techniques de modification géométrique, telles que l'ajout d'encoches sur le patch. Ces encoches permettent d'ajuster la fréquence de résonance ainsi que l'impédance d'entrée de l'antenne, sans recourir à des composants externes. La taille et la

position de l'encoche influencent directement le comportement électromagnétique de l'antenne. Dans notre cas, les dimensions spécifiques de l'encoche sont présentées dans la Figure 25.

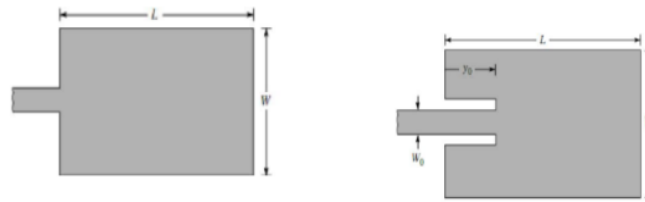


Figure 21: patch adapté par encoches de longueur [7].

I.9. Avantages et limites des antennes imprimées

Les antennes micro-ruban gagnent en popularité en raison de leurs nombreux avantages, notamment leur légèreté, leur faible coût de fabrication et leur facilité d'intégration dans les circuits imprimés [48]. Elles couvrent une large gamme de fréquences, allant de 100 MHz à 100 GHz, ce qui les rend particulièrement adaptées à diverses applications, notamment dans les téléphones mobiles, les systèmes GPS, les dispositifs IoT et les communications satellitaires. Parmi leurs principaux atouts figurent leur profil mince, leur compatibilité avec les technologies de fabrication en série, ainsi que leur capacité à être facilement conçues pour fonctionner sur des bandes de fréquences spécifiques avec un :

- ✓ Faible coût de fabrication.
- ✓ Dans le cas de substrats, ils peuvent être imprimés sur des surfaces non planes.
- ✓ Possibilité d'améliorer la directionnalisation.
- ✓ Possibilité de les intégrer dans des équipements électriques.
- ✓ Ils sont légers et compacts (quelques millimètres carrés à quelques centimètres carrés de Surface)
- ✓ Sélection de déphasages réguliers entre éléments fixes, direction du faisceau Dans un espace restreint par un certain angle.

Malheureusement, les antennes présentent également plusieurs inconvénients qui peuvent limiter leur champ d'application. On peut notamment citer [13] :

- ✓ Une bande passante limitée (de 1 à 5%).
- ✓ Un faible gain (de l'ordre de 5db).
- ✓ Une pureté de polarisation difficile à obtenir.

- ✓ Des puissances transportées faibles en comparaison à des antennes traditionnelles.
- ✓ Problème de choix de technique d'excitation.

I.10. Les équations caractéristiques d'une antenne patch

Les équations caractéristiques d'une antenne patch jouent un rôle fondamental dans sa conception, car elles établissent les relations entre les dimensions physiques de l'antenne, la fréquence de résonance et les propriétés du substrat utilisé. Elles permettent de calculer des paramètres cruciaux tels que l'impédance d'entrée, le gain, l'efficacité de rayonnement et la directivité. Une maîtrise précise de ces équations est essentielle pour concevoir une antenne performante et adaptée aux exigences spécifiques de l'application visée et la forme d'antenne patch [49].

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 10 \frac{h}{w}}} \quad (18)$$

Pour avoir un bon rendement de l'antenne, une formule empirique permet de calculer la largeur W du patch :

$$W = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{c}{2fr \sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (19)$$

La longueur de l'antenne patch est allongée de part et d'autre par une quantité ΔL donnée par l'équation suivante :

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.262\right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.813\right)} \quad (20)$$

La longueur de l'antenne patch L est alors donnée par :

$$L = W - 2\Delta L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (21)$$

Le type de substrat utilisé a une influence considérable sur la taille du patch. Plus le constant diélectrique est élevé, plus l'antenne est petite. La largeur a également un effet sur la fréquence de résonance, mais cet effet est moins prononcé. En utilisant cette équation, nous pouvons tracer la fréquence en fonction de la longueur pour différents types de substrats [49].

I.10.1. Gain

Une autre mesure très utile pour décrire les performances de l'antenne est le gain. Bien que le gain soit étroitement lié à la directivité, il s'agit d'une mesure qui prend en compte non seulement l'efficacité de l'antenne mais également ses capacités de directivité. L'augmentation du gain d'une antenne dans une direction particulière est définie comme le rapport entre l'intensité du rayonnement dans la direction $\Delta (\theta, \varphi)$ et l'intensité du rayonnement qui se produirait si la puissance reçue par l'antenne était diffusée de manière isotrope. Il s'agit simplement de la puissance transmise par l'émetteur via la ligne de transmission jusqu'à l'antenne divisée en quatre parties dans l'espace.

Il est donc formulé comme suit :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_f} \quad (22)$$

Avec :

- ✓ $P_f = P_{\text{ray}} + P_d$
- ✓ P_d : est la perte de puissance dans les antennes représentées par effet Joule. Pour une telle antenne, le concept d'efficacité est défini comme la puissance par rapport à la puissance rayonnée et fournie à l'antenne, à savoir :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \quad (23)$$

I.10.2. La fréquence de résonance et la largeur de bande

Dans certaines applications, ce niveau peut être porté jusqu'à -6 dB, ce qui permet d'assouplir certaines contraintes lors de la conception de l'antenne, comme c'est le cas pour certaines antennes de téléphonie mobile. La limite des normes d'exploitation de l'antenne est donc comprise entre la fréquence minimale f_1 et la fréquence maximale f_2 . La bande passante relative [18] est alors définie comme un pourcentage, représentant la largeur de bande autour de la fréquence centrale f_0 , selon la formule suivante

$$B_r = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (24)$$

La largeur de bande est définie par le rapport entre les deux fréquences extrêmes :

$$B_f = \frac{f_2}{f_0} \quad (25)$$

I.11. Domaines d'applications des antennes patch

Les antennes imprimées, également appelées antennes à micro-ruban, sont largement utilisées dans de nombreux domaines en raison de leur compacité, de leur faible coût de fabrication et de leur intégration facile sur des circuits imprimés. Elles trouvent des applications dans les systèmes de télécommunications mobiles, les réseaux sans fil (Wi-Fi, Bluetooth), les dispositifs RFID, les radars embarqués, ainsi que dans les systèmes satellitaires et les technologies de communication 5G. Leur conception adaptable permet aussi leur emploi dans des dispositifs portables, médicaux et embarqués, où l'espace est limité et la légèreté est essentielle pour les applications :

- ✓ Radars pour la détection et le suivi d'objets, la surveillance du trafic aérien et maritime, la météorologie, etc.
- ✓ Navigation par satellite (GNSS) pour recevoir les signaux des satellites et déterminer la position, la vitesse et le temps.
- ✓ Les antennes de réception TV et radio pour capter les signaux de diffusion.
- ✓ Les systèmes de communication militaires, les systèmes de brouillage, les systèmes de surveillance, etc.
- ✓ Les systèmes d'assistance au conducteur, les systèmes de détection d'obstacles, les systèmes de communication entre véhicules, etc.
- ✓ Les satellites pour la communication, l'imagerie, l'observation de la Terre, etc.
- ✓ Systèmes de commande et de contrôle.

I.12. Conclusion

Ce chapitre présente un aperçu général des antennes imprimées, en abordant leurs techniques d'alimentation les plus courantes, telles que la ligne micro-ruban et le câble coaxial, ainsi que leurs principes de fonctionnement. Il traite également de leurs applications dans divers domaines et services de communication, ainsi que dans d'autres secteurs technologiques.

Chapitre 02

Les Antennes Intelligentes 5G Pour Géolocalisation des voitures

II. Introduction

La demande croissante en ressources numériques et l'augmentation exponentielle du nombre de connexions, qu'il s'agisse d'utilisateurs ou d'objets connectés, imposent des exigences toujours plus élevées en matière de qualité de service à travers de multiples applications [50]. La 5G, dernière génération des communications mobiles, s'inscrit dans cette dynamique en proposant des solutions innovantes pour relever ces défis tout en ouvrant la voie à de nouvelles perspectives. Elle promet des débits de données nettement supérieurs, une latence réduite, une fiabilité accrue, ainsi qu'une densité de connexions bien plus élevée. Ces performances sont notamment rendues possibles grâce à l'utilisation de systèmes MIMO massifs (antennes intelligentes), qui améliorent considérablement la capacité et la vitesse des réseaux. Par ailleurs, la 5G facilite l'émergence d'applications avancées telles que la réalité virtuelle et augmentée, les véhicules autonomes, les villes intelligentes et les dispositifs médicaux connectés, tout en favorisant la création de nouveaux types de réseaux.

La première partie de ce chapitre analysera les objectifs principaux de la 5G en les comparant à ceux des générations précédentes, tout en abordant les différentes bandes de fréquences utilisées et les exigences spécifiques qui en découlent.

Dans la deuxième partie, l'accent sera mis sur les technologies de géolocalisation. Les méthodes les plus couramment utilisées seront présentées, telles que le GPS, le RSS (Received Signal Strength), le TOA (Time of Arrival), le TDOA (Time Différence of Arrival) et l'AOA (Angle of Arrival). Chacune de ces approches sera décrite en précisant son principe de fonctionnement, ses avantages et ses limites, en particulier dans les environnements urbains denses et complexes.

Enfin, la dernière section sera consacrée aux technologies avancées permettant de répondre aux exigences de performance des systèmes de positionnement actuels. Parmi elles, le MIMO massif se distingue par son efficacité spectrale et énergétique, tandis que le mode full-duplex permet d'augmenter la capacité des canaux de communication. L'utilisation des petites cellules, associées aux ondes millimétriques, sera également discutée, car elle joue un rôle essentiel dans l'obtention de larges bandes passantes et d'une couverture locale dense, indispensable dans les zones urbaines fortement peuplées.

II.1. Les réseaux cellulaire 5G pour la géolocalisation des véhicules

Les réseaux cellulaires 5G ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour la géolocalisation des véhicules, en répondant aux exigences croissantes de précision, de réactivité et de fiabilité. Grâce à leur faible latence, leur densité élevée de connexion et leur capacité à transmettre des volumes importants de données en temps réel, les réseaux 5G permettent d'améliorer significativement les performances des systèmes de positionnement. En intégrant des technologies avancées telles que le Massive MIMO et le beamforming, la 5G renforce la précision de localisation, même dans des environnements urbains complexes où les signaux GPS peuvent être perturbés. Cette avancée est essentielle pour le développement sécurisé et efficace de véhicules autonomes, la gestion intelligente du trafic et l'optimisation des services de mobilité connectée [7].

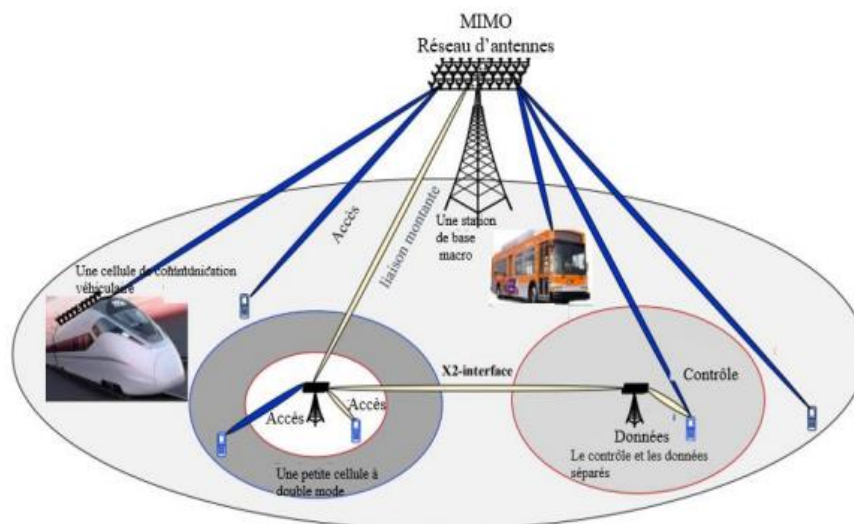


Figure 22: L'architecture du réseau 5G [53].

II.2. Techniques de géolocalisation des véhicules

La géolocalisation repose sur l'utilisation de plusieurs technologies distinctes, chacune ayant ses propres spécificités, principes de fonctionnement et domaines d'application. Dans les sections suivantes, nous présentons les principales techniques de géolocalisation utilisées aujourd'hui, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limites et leur pertinence dans le contexte de la mobilité.

II.2.1. Le GPS

Le GPS (Global Positioning System) est la technologie de positionnement la plus connue et la plus utilisée dans le monde. Conçu à l'origine par le département de la Défense des États-Unis pour un usage militaire, ce système repose sur une constellation de 24 satellites en orbite autour de la Terre, avec la possibilité d'en déployer jusqu'à trois supplémentaires en cas de défaillance. Le GPS permet de déterminer les coordonnées géographiques précises d'un point situé n'importe où à la surface du globe, avec une précision pouvant atteindre un mètre dans des conditions optimales. Aujourd'hui, cette technologie est devenue incontournable dans la vie quotidienne. Elle est largement utilisée dans la navigation terrestre, maritime et aérienne, ainsi que pour le suivi en temps réel des flottes de véhicules (camions, navires, avions), la gestion logistique et les services de localisation sur smartphones. L'adoption généralisée du GPS illustre son rôle fondamental dans le développement des systèmes de navigation modernes et des applications intelligentes liées à la mobilité.



Figure 23: Technique de géolocalisation GPS par satellite.

II.2.2. Principe de fonctionnement du GPS :

Le GPS fonctionne en calculant la distance entre le récepteur GPS et plusieurs satellites. Le principe de positionnement utilisé par le GPS est basé sur le principe de triangulation. Tout d'abord, il faut savoir que chaque satellite émet des ondes électromagnétiques à une vitesse connue, qui comprend : la position du satellite dans l'espace, l'heure et la date de transmission du signal [60].

II.2.2.1. Triangulation

La triangulation est une méthode mathématique, elle permet de déterminer la position relative d'un point en utilisant la géométrie des triangles. Mais ne dépend que des calculs de distances, sans calculs d'angles.

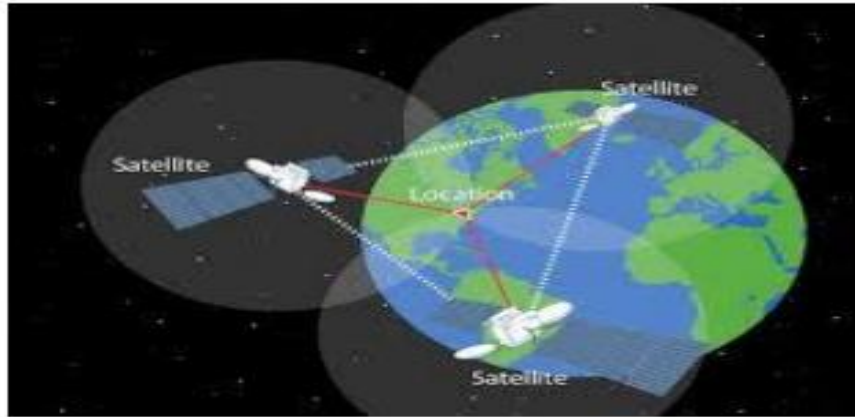


Figure 24: principe de Triangulation.

La localisation GPS fonctionne à base d'un récepteur capte le signal d'un satellite, dont il connaît l'heure d'émission, et calcule le temps de propagation pour déterminer la distance via la formule $\text{Distance} = \text{Vitesse de la lumière (300 000 km/s)} \times \text{Temps}$, plaçant ainsi le récepteur sur un cercle centré sur le satellite avec cette distance comme rayon. Pour une précision optimale, la position exacte du satellite est corrigée par une station de contrôle, qui compare la position théorique du satellite à sa position réelle et transmet les erreurs au récepteur afin d'affiner les calculs [55].

II.2.3 Méthode de puissance du signal (RSS) :

La méthode RSS « Received Signal Strength » est définie comme la force du signal mesurée au niveau du circuit de réception. La distance entre l'appareil mobile et la BS peut être estimée en mesurant la force du signal de plusieurs BS.

Si les niveaux de signal de trois nœuds de transmission différents sont connus, l'emplacement de l'appareil mobile peut être déterminé par l'intersection des trois cercles. Mais dans les applications réelles, la propagation du signal n'est pas uniforme en raison de l'atténuation du signal causée par le chemin.

Plusieurs zones d'ombre, ce qui pose un problème pour l'évaluation des distances. Les modifications de la zone d'ombre dues à des obstacles (murs, bâtiments, arbres, etc.) ne peuvent pas être compensées ; ces changements sont traités comme des erreurs aléatoires dans l'estimation de la distance.

Contrairement aux techniques de mesure de la force du signal, les méthodes de localisation temporelle TOA (Time of Arrival) et TDOA (Time Difference of Arrival) peuvent atteindre une plus grande précision, en particulier pour les signaux à large bande. En fait, les signaux à large bande peuvent atteindre une résolution temporelle de 1 ns ou moins, équivalente à une résolution spatiale de 30 cm [56].

II.2.4 Localisation par temps d'arrivée (TOA) :

Les mesures du temps d'arrivée du signal peuvent être effectuées au niveau de la BS ou du mobile. Si la BS et le mobile sont parfaitement synchronisés, la mesure d'arrivée TOA est directement liée à la distance BS-mobile. Dans ce cas, au minimum, trois mesures sont nécessaires pour localiser le mobile sur deux dimensions.

TOA utilise la triangulation pour calculer l'emplacement d'un appareil mobile. En calculant le temps t nécessaire pour transmettre un signal de la station mobile aux trois stations de base BS les plus proches. Soit $i = 1, 2, 3$ l'indice de la BS, (x, y) l'emplacement de l'appareil mobile, (x_i, y_i) l'emplacement de BS $_i$ et d_i la distance entre la BS i et l'appareil mobile. Le temps t_i est converti en distance d_i comme suit [56] :

II.2.5 Mesure par angle d'arrivée (AOA) :

Pour trouver l'emplacement d'un appareil mobile, la méthode AOA utilise un réseau d'antennes pour déterminer l'angle d'arrivée du signal. En supposant une géométrie 2D, mesurer les angles d'arrivée de 2 BS suffit à localiser un appareil mobile.

L'approche AOA nécessite une rangée d'antennes, un « réseau d'antennes », à chaque BS (ou appareil mobile).

L'un des inconvénients de cette technique est que la mesure de l'angle est sensible à l'augmentation de la distance. Par conséquent, pour les courtes distances, la méthode AOA est préférable. Cette technique peut être combinée avec des techniques de distance (par exemple ToA, TDOA, RSS). Les méthodes de positionnement mobile hybride sont généralement basées sur une estimation conjointe.

En plus des méthodes basées sur l'estimation de la distance (par exemple ToA) ou la différence des temps d'arrivée TDoA entre les multi trajets, des méthodes d'angle d'arrivée AoA (ou même d'angle de départ AoD) peuvent également être utilisées. L'avantage de cette technique est qu'une seule station de référence est utilisée pour calculer la position du mobile [57].

II.3. Les bandes fréquences utilisées pour la géolocalisation 5G

La géolocalisation des véhicules en 5G s'appuie sur des bandes de fréquences spécifiques, notamment la bande L1 du GPS à 1,575 GHz, qui est largement utilisée pour les systèmes de positionnement par satellite (GNSS). Cette fréquence, située dans la bande basse (< 2 GHz), offre une excellente couverture et une bonne pénétration des signaux, ce qui la rend idéale pour la localisation précise des véhicules, même en environnement urbain ou sous couvert partiel. En complément, la 5G peut intégrer cette bande à ses réseaux cellulaires pour améliorer la précision de la géolocalisation grâce à des techniques comme le positionnement basé sur les temps d'arrivée (TDOA) ou les angles d'arrivée (AOA). Cependant, l'utilisation de cette bande partagée nécessite une coordination rigoureuse pour éviter les interférences avec les signaux GPS traditionnels, garantissant ainsi une fiabilité essentielle pour les applications critiques comme la conduite autonome.

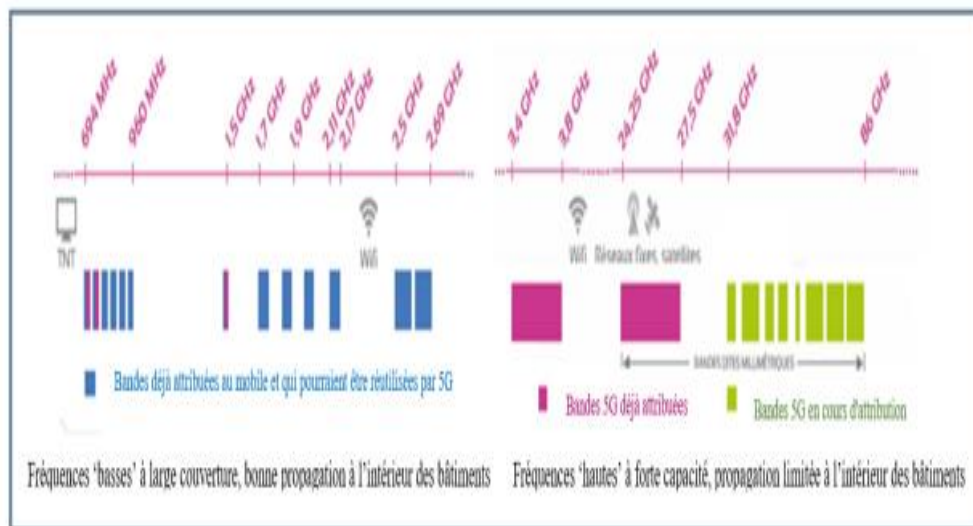


Figure 25: Fréquence utilisées pour la 5G [53].

II.4. Les systèmes d'antennes à commutation de faisceaux

Les systèmes d'antennes à commutation de faisceaux (Switched Beam Antenna, SBA) sont des technologies de communication sans fil qui utilisent un réseau d'antennes pour générer des faisceaux directionnels étroits orientés vers l'utilisateur, améliorant ainsi la puissance du signal et réduisant les interférences. En commutant dynamiquement entre plusieurs faisceaux prédéfinis en fonction de la position de l'utilisateur, détectée via la puissance du signal [53], le système maintient une connexion optimale, même en cas de déplacement. Bien que la méthode

à poids fixe, où l'angle d'arrivée reste constant, simplifie le fonctionnement, elle est moins adaptée aux environnements urbains où cet angle varie fréquemment, limitant son efficacité dans des scénarios dynamiques| [77].

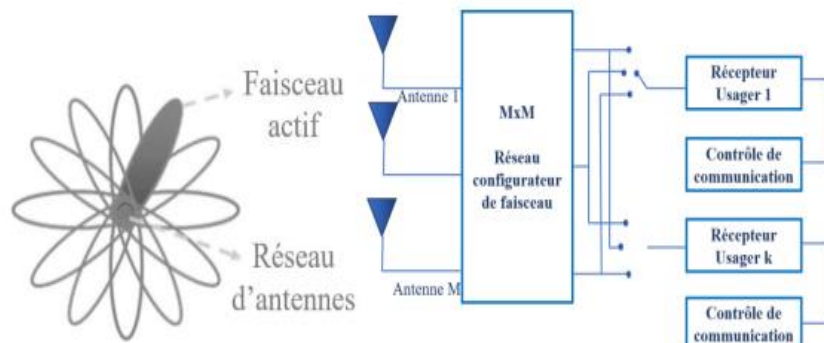


Figure 26: Système à commutation du faisceau [53].

Le système de formation de faisceaux à commutation, basé sur un réseau à déphasage, distribue l'alimentation entre les sources selon des amplitudes et des phases spécifiques, permettant de créer plusieurs faisceaux directionnels pointant vers des directions prédéfinies. Un commutateur RF active le faisceau approprié, sélectionné par un contrôle logique piloté par un algorithme qui analyse en continu la puissance des signaux reçus pour identifier le faisceau optimal. Ce système peut évoluer d'une configuration simple, avec commutation de sources, vers une configuration plus avancée permettant une reconfiguration dynamique des faisceaux, ajustant amplitude et phase en fonction de la direction souhaitée pour optimiser la qualité du signal[76].

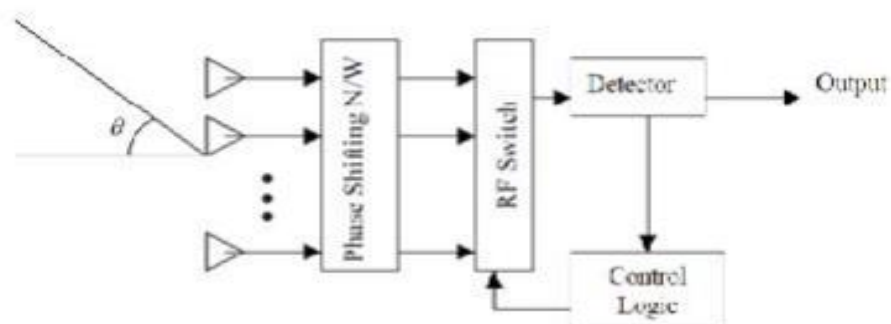


Figure 27: Schéma fonctionnel du système à commutation de faisceaux [76].

II.5. La technologie MIMO Massive 5G

La technologie MIMO Massive 5G joue un rôle clé pour atteindre les objectifs de la cinquième génération de réseaux mobiles, en offrant des débits de données élevés et en répondant aux exigences strictes de qualité de service, tout en surmontant les limitations de capacité liées à la bande passante et à la puissance de transmission. Elle repose sur deux technologies principales : le MIMO massif, qui utilise un grand nombre d'antennes à l'émetteur et/ou au récepteur pour améliorer l'efficacité spectrale et augmenter la capacité du réseau par rapport à un système à antenne unique, et la formation de faisceaux (beamforming), qui concentre la puissance transmise vers le récepteur ciblé. Cette approche réduit les interférences, améliore la résistance à l'évanouissement du canal de transmission et renforce la qualité globale de la communication.

II.6. Définition du Système MIMO

La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) est une méthode de communication sans fil qui utilise plusieurs antennes à l'émetteur et au récepteur pour transmettre simultanément plusieurs flux de données, augmentant ainsi le débit et la fiabilité. Elle exploite le phénomène de multi trajets, où les ondes radio rebondissent sur des obstacles (murs, plafonds, etc.), atteignant le récepteur par différents chemins, à des moments et angles légèrement variés. Grâce à des antennes « intelligentes » et à la diversité spatiale, MIMO combine ces flux de données pour améliorer la puissance du signal capté et optimiser les performances. Lorsqu'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, les antennes supplémentaires renforcent la diversité du récepteur, augmentant la portée et la robustesse de la connexion [5].

II.7. Principes du Fonctionnement de système MIMO

La principale source d'interférence lors de la propagation du signal est le canal, notamment en raison de la propagation multi-trajet qui entraîne des évanouissements, ainsi que des décalages en fréquence et en temps. Contrairement aux systèmes traditionnels qui subissent ces effets, les systèmes de diversité, tels que les MIMO, les exploitent pour améliorer les performances globales. Pour ce faire, différentes formes de diversité sont utilisées : la diversité spatiale (ou d'antenne), qui repose sur l'utilisation de plusieurs antennes ; la diversité de fréquence, où le même signal est transmis sur différentes fréquences en tenant compte de la bande de cohérence du canal ; et la diversité temporelle, qui consiste à retransmettre le signal à

des instants espacés d'un intervalle supérieur au temps de cohérence du canal. Cela dépend également de la vitesse de l'appareil mobile et de la fréquence de l'opérateur [80].

II.8. Les techniques utilisé par le système MIMO

La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), introduite dans les années 1990 par Gérard J. Foschini [79], vise à accroître le débit et la portée des réseaux sans fil en exploitant plusieurs antennes à la fois à l'émission et à la réception. Dans un système à antennes multiples, la capacité du canal croît linéairement avec le nombre d'antennes d'émission, ce qui permet une amélioration significative des performances. En plus d'augmenter le débit, les systèmes MIMO offrent une meilleure robustesse face aux interférences et à l'évanouissement du signal. En fonction de la configuration des antennes, on distingue plusieurs variantes : le système SIMO (Single Input Multiple Output), avec une antenne à l'émission et plusieurs à la réception ; le système MISO (Multiple Input Single Output), avec plusieurs antennes à l'émission et une seule à la réception ; et le système SISO (Single Input Single Output), avec une antenne de part et d'autre [47].



Figure 28: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO [47].

II.9. Impact de la technologie MIMO sur la précision de géolocalisation

Elle apporte une valeur ajoutée en termes de gain significatif en termes de capacité, de performance et de fiabilité, la technologie MIMO améliore également les capacités de géolocalisation lorsqu'elle est intégrée aux systèmes basés sur le GPS. Grâce à la diversité spatiale qu'elle offre via l'utilisation de multiples antennes, le système MIMO permet de capter

les signaux sous différents angles et chemins de propagation, ce qui améliore la résolution angulaire de l'angle d'arrivée (AoA) et réduit les ambiguïtés dans la localisation des récepteurs mobiles. Cette configuration se traduit par un meilleur rapport signal/bruit (SNR) et une plus grande résistance aux interférences et aux effets de trajets multiples. Par ailleurs, l'association du MIMO à des algorithmes de beamforming permet de focaliser l'énergie du signal dans des directions ciblées, renforçant ainsi la précision du positionnement, notamment dans les environnements complexes comme les zones urbaines denses, où le GPS seul peut s'avérer insuffisant. Ainsi, l'intégration du MIMO dans les dispositifs de géolocalisation représente une avancée majeure pour les applications de navigation, le suivi de véhicules et le déploiement des réseaux intelligents, en particulier dans le contexte de la 5G.

II.10. L'emplacement des antennes MIMO 5G dans une voiture

Dans un système de communication et de géolocalisation MIMO 5G embarqué, le positionnement des antennes sur le véhicule joue un rôle crucial pour préserver les performances et limiter les dégradations dues aux interférences et à l'obstruction du signal. En pratique, les antennes sont généralement installées sur le toit, souvent intégrées dans un module compact et discret de type "shark fin", afin de garantir une exposition optimale aux stations de base et aux satellites GPS, sans obstacles. Pour exploiter pleinement la diversité spatiale offerte par la technologie MIMO, il est essentiel de maintenir une distance minimale entre les antennes, typiquement supérieure ou égale à $0,5 \lambda$. Ce positionnement, en plus d'être logique, est stratégique pour maximiser la couverture réseau, améliorer la capacité cellulaire et assurer une géolocalisation précise, en particulier dans les environnements dynamiques et urbains.

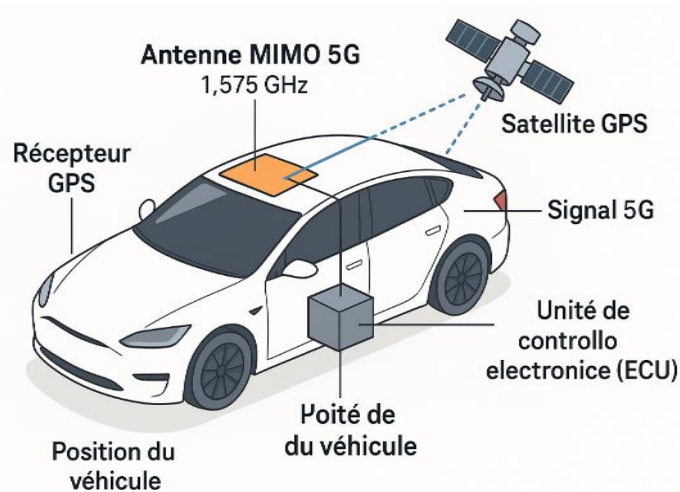


Figure 29: L'emplacement de l'antenne MIMO 5G dans une voiture.

II.11. Beamforming 5G

Le Beamforming est une technologie de réseau qui dirige des faisceaux hautement ciblés vers les terminaux, garantissant une utilisation plus efficace de l'énergie. Plus Concrètement, lors de la transmission, la focalisation du faisceau permet de concentrer l'énergie émise par un canal radio sur un récepteur spécifique. En ajustant la phase et l'amplitude du signal transmis, une addition constructive des signaux peut être réalisée au niveau du récepteur du smartphone ou du terminal, augmentant ainsi la puissance du signal reçu et améliorant finalement le débit pour l'utilisateur final. De même, lors de la réception, la formation de faisceau garantit que l'énergie du signal est collectée à partir d'un émetteur spécifique.

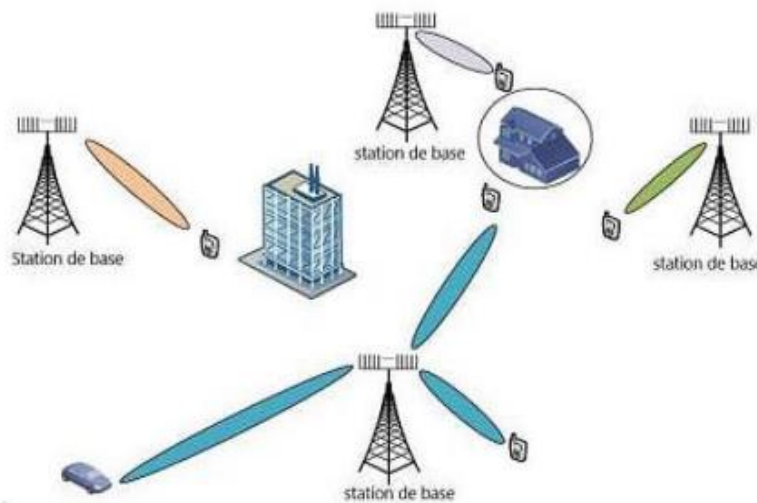


Figure 30: Technologie Beamforming.

Dans un système MIMO massif, une station de base peut transmettre des données aux utilisateurs sur plusieurs canaux, et la formation de faisceau (Beamforming) coordonne les heures de mouvement et d'arrivée des paquets de données pour permettre à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données simultanément.

L'avantage du beamforming est qu'il permet à l'antenne relais de transmettre non pas en continu, mais uniquement lorsque cela est nécessaire. Cela signifie donc des économies d'énergie considérables. Il s'agit donc, d'un point de vue environnemental, d'un procédé bénéfique car il évite le gaspillage de signaux et consomme donc moins d'énergie.

II.12. Domaines d'application de la technologie d'antennes intelligentes 5G

La technologie des antennes intelligentes trouve de nombreuses applications dans différents domaines. Voici quelques exemples :

Télécommunications mobiles : Les antennes intelligentes sont largement utilisées dans les Systèmes de communication mobile, tels que les réseaux 4G et 5G. Ils contribuent à améliorer la qualité du signal, à augmenter la capacité du réseau en gérant les interférences et à offrir une meilleure couverture et une meilleure connectivité aux utilisateurs.

Communications sans fil : Les antennes intelligentes sont largement utilisées dans les Systèmes de communication sans fil, tels que les réseaux cellulaires, les réseaux Wi-Fi, les systèmes de communication par satellite, etc. Ils aident à améliorer la qualité du signal, à augmenter la portée et la capacité du réseau, à améliorer la portée du signal, à réduire les interférences, à augmenter les vitesses de transmission de données et à optimiser la gestion des interférences.

Systèmes de navigation : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de navigation, tels que le GPS, pour améliorer la précision de localisation en réduisant les erreurs causées par le multi-trajet et les interférences.

Radar : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes radar pour détecter et suivre des objets. Ils peuvent obtenir une meilleure résolution spatiale, réduire les interférences et améliorer la précision de détection.

Systèmes de véhicules autonomes : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de communication des véhicules autonomes pour permettre la communication entre les véhicules et l'infrastructure routière. Ils facilitent l'échange d'informations en temps réel, la détection des obstacles et la coordination des mouvements des véhicules. Ces domaines ne sont qu'une partie des applications possibles de la technologie des antennes intelligentes, et de nouvelles utilisations émergentes constamment à mesure que la technologie se développe.

II.13. Conclusion

Ce chapitre propose une analyse approfondie des antennes intelligentes dans le cadre des réseaux 5G, en mettant l'accent sur leur rôle dans la géolocalisation des véhicules. Il débute par une présentation de l'évolution technologique de la 5G, de ses enjeux, de ses bandes de fréquences, ainsi que des défis techniques associés. L'intégration d'antennes MIMO massives y est ensuite abordée comme solution clé pour optimiser la qualité de la liaison radio, notamment grâce à la diversité spatiale et au beamforming, éléments contribuant à une géolocalisation plus fiable et sécurisée, même en environnement urbain dense. Le chapitre examine également différentes techniques de localisation, telles que le

GPS et les approches hybrides combinant les informations temporelles et angulaires (temps d'arrivée et angle d'arrivée), tout en soulignant l'importance stratégique du positionnement des antennes sur le véhicule. En conclusion, il est démontré que la convergence entre les antennes intelligentes 5G et GPS ouvre la voie à des systèmes de géolocalisation plus précis, robustes et adaptés aux exigences des applications intelligentes et autonomes de nouvelle génération.

Chapitre 03

Conception et simulation d'antennes 5G Pour la Géolocalisation

III. Introduction

La 5G, cinquième génération des standards de communication mobile, se caractérise par sa capacité à fournir des débits de données très élevés, une faible latence et une grande densité de connexion. Des performances devenues indispensables non seulement dans le cadre des services de communication mobile classique mais aussi pour des applications très spécifiques comme la géolocalisation des véhicules.

Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif principal de ce mémoire est de concevoir et de simuler un réseau d'antennes intelligentes MIMO qui fonctionne dans la bande GPS (1,575 GHz) pour la géolocalisation des voitures. Ce réseau constitue 3 antennes patch identiques montées en série, formant une architecture linéaire, faisant appel à un gain renforcé, une directivité accrue et permettant une précision de localisation la plus précise possible dans les environnements complexes.

Dans ce chapitre, nous allons comprendre les étapes de simulation à l'aide du logiciel CST Microwave Studio. Dans la première étape, une seule antenne patch est modélisée et analysée pour étudier ses performances électromagnétiques (paramètre de réflexion S11, bande passante, gain, directivité, etc.). Après la première simulation, une antenne patch optimisée sera proposée pour obtenir de meilleures performances. Enfin, une structure MIMO sera présentée dans le cadre de la simulation, composée de trois patches en série, qui, contrairement à l'antenne monopole, fournira une topologie répondant aux exigences des spécifications 5G et GPS.

III.1. Conception d'antennes Imprimé

La structure de base d'antenne patch est illustrée à la figure 31. Elle se compose d'un patch rectangulaire gravé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique de type FR-4, caractérisé par une permittivité relative de 4,3, une épaisseur de 2,1 mm et une tangente de perte diélectrique $\tan \delta = 0,002$. Le patch rayonnant ainsi que le plan de masse sont réalisés en cuivre (Copper) d'une épaisseur de 0,035 mm. L'ensemble des dimensions géométriques de l'antenne est détaillé dans la figure 35. La structure initiale de cette antenne est suivante :

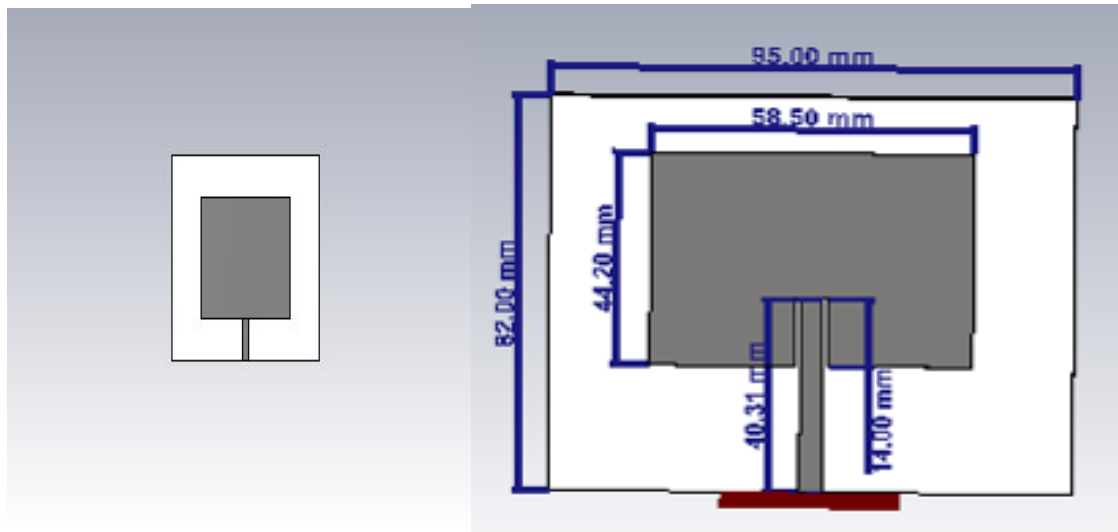


Figure 31: Structure initiale et modifiée de l'antenne simulée.

Après ont ajouté des encoches pour l'adaptation de l'antenne comme montre la figure suivante :

Les dimensions de l'antenne proposé sont résumées dans le tableau 1 :

Tableau 1: Paramètres géométriques de l'antenne simulée.

Paramètres	Variables	Valeurs (mm)
Largeur du ground et substrat	$W_g=W_s$	95
Longueur du ground et substrat	$L_g=L_s$	82
Epaisseur du substrat	H_s	2.1
Epaisseur du ground et patch	H_t	0.035
Longueur du patch	L_p	44.2
Largeur du patch	W_p	58.5
Largueur de la ligne de transmission	W_f	4.11

Longueur de la ligne de transmission	Lf	26.31
--------------------------------------	----	-------

L'analyse du coefficient de réflexion (S11) de l'antenne patch révèle un comportement non satisfaisant. Comme l'illustre la figure ci-dessous, l'antenne résonne à une fréquence de 1,575 GHz avec un coefficient de réflexion de -18,16 dB, ce qui demeure insuffisant pour répondre aux exigences de conception fixées.

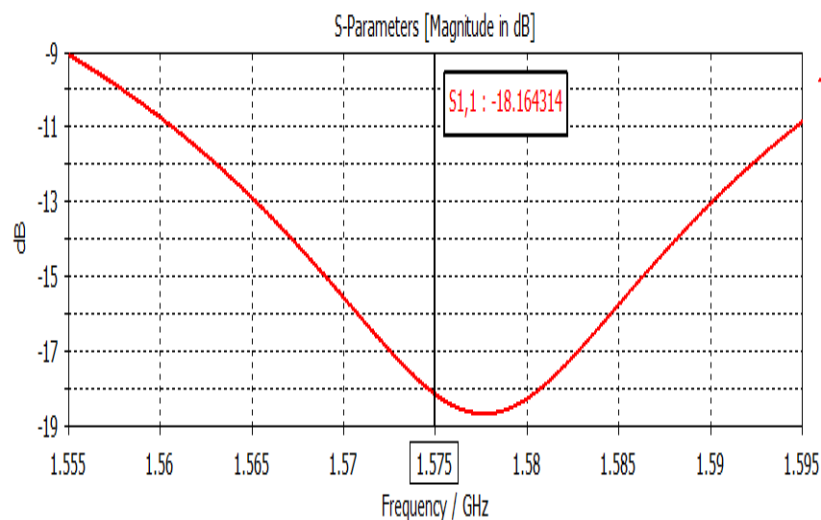


Figure 32: Coefficient de réflexion de l'antenne initial simulée.

L'antenne nécessite une adaptation, car le paramètre S11 obtenu n'est pas conforme aux critères de performance attendus. Pour améliorer son comportement, il est nécessaire de procéder à plusieurs modifications, notamment l'ajout de fentes d'adaptation, ou remplacement du matériau conducteur du plan de masse et du patch, ainsi qu'un ajustement des dimensions géométriques de l'antenne. Ces optimisations permettront de mieux accorder l'antenne à la fréquence cible et de réduire significativement le coefficient de réflexion. Nous procédons désormais à l'introduction d'encoches dans le patch et à la modification des dimensions de l'antenne initiale afin d'améliorer son adaptation. La figure 37 présente la nouvelle structure de l'antenne après l'intégration des encoches.

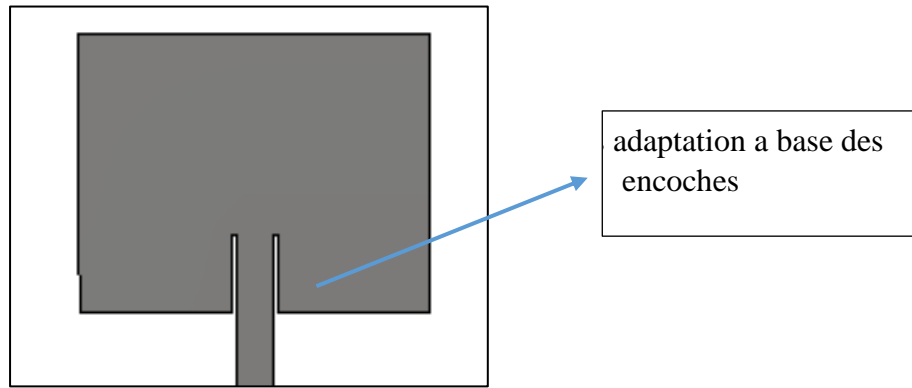


Figure 33 : Antenne optimisée avec encoche.

Le Tableau 2 présente les dimensions de l'antenne optimisée et nous pouvons simuler le modèle dans CST studio suite.

Tableau 2: Paramètres géométriques de l'antenne optimisée.

Paramètres d'antennes	Variables	Valeurs (mm)
Largeur de Ground et Substrat	$W_{gr}=W_s$	93
Longueur du Ground et Substrat	$L_{gr}=L_s$	81
Epaisseur du substrat	H_s	2.1
Epaisseur du ground et patch	$H_{gr}=H_p$	0.035
Longueur du patch	L_p	44.5
Largeur du patch	W_p	58.5
Largeur de la ligne de transmission	W_f	6.0
Longueur de la ligne de transmission	L_f	13
Largeur de l'encoche	W_g	0.8
Longueur de l'encoche	L_g	12.4

III.2. Résultats de simulations

III.2.1. Coefficient de réflexion

La Figure 34 représente le coefficient de réflexion de l'antenne initiale optimisée.

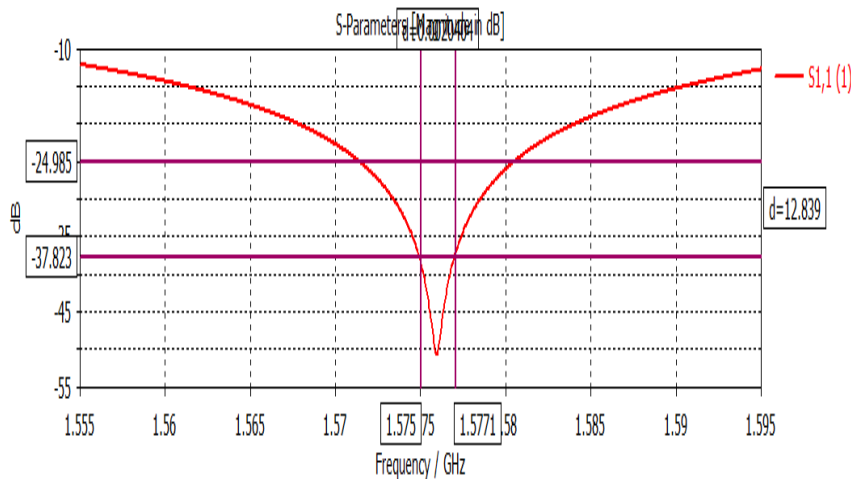


Figure 34: Coefficient de réflexion de l'antenne initiale optimisée.

Nous remarquons que le coefficient de réflexion est de -37.823 dB à la fréquence 1.575 GHz, ce qui montre que les fréquences de résonance sont bien ajustées et bien adaptées à l'application GPS.

III.2.2. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

Le résultat de simulations du taux d'onde stationnaire simulé de l'antenne initiale optimisée, est présenté dans la figure 35.

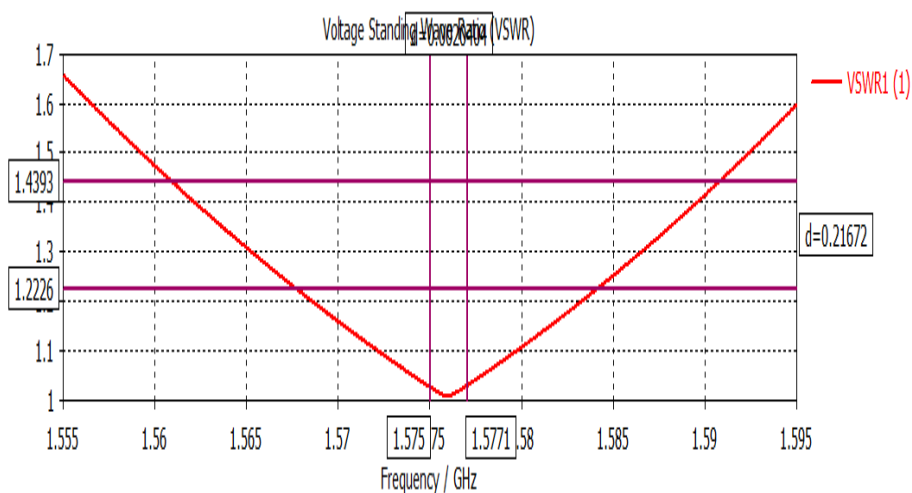


Figure 35: Rapport d'onde stationnaire (VSWR).

Nous observons que le taux d'ondes stationnaire est compris entre 1 et 1.1 pour la fréquence de résonances ce qui montre que l'antenne est bien adaptée.

III.2.3. Diagramme de rayonnement

Le digramme de rayonnement 3D simulé à la fréquence de résonance 1.575 GHz est positive qui t'égale 2.96 dB présenté dans la Figure 36.

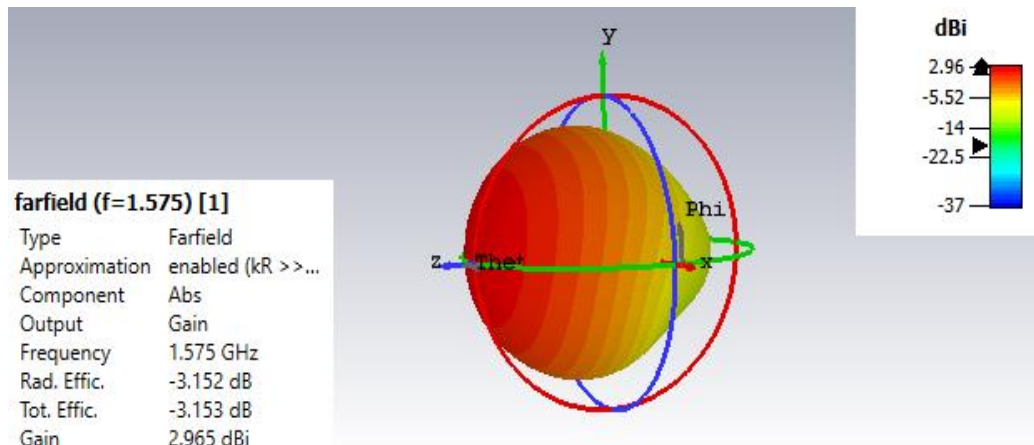


Figure 36 : Diagramme de rayonnement 3D d'antenne optimisée.

Le diagramme de rayonnement en coordonnées polaires simulé à la fréquence de résonance de 1,575 GHz est présenté dans la figure 37.

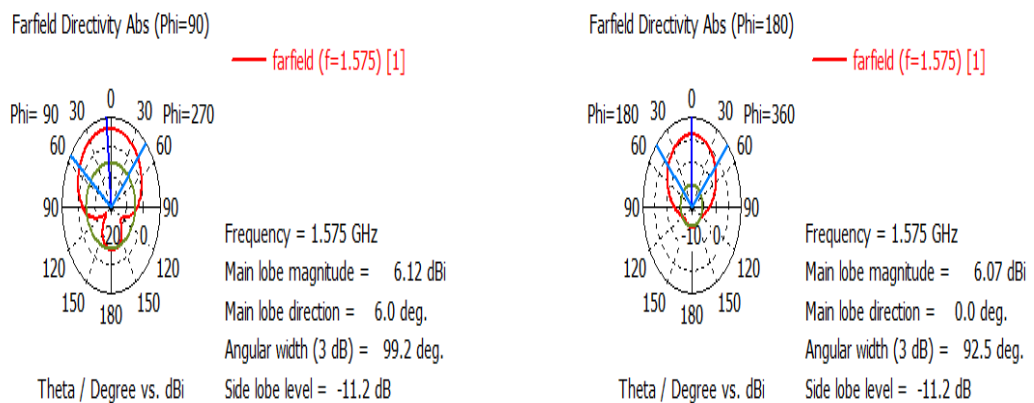


Figure 37: Diagramme de rayonnement en 2D (phi=90°) de l'antenne optimisée à la fréquence 1.575 GHZ.

III.2.4. Distribution De Courant

La distribution de Courant est concentrée à la ligne et sur le patch cela indique que cette antenne envoie un rayonnement d'une manière acceptable.

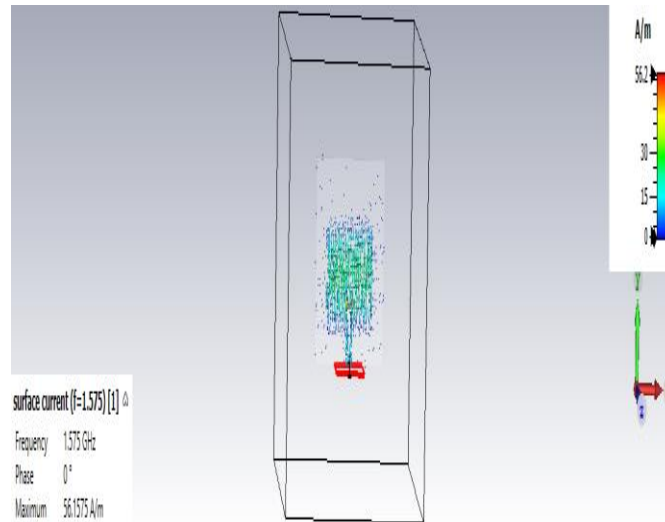


Figure 38: La distribution Courant sur d'antenne optimisée.

III.3. Antennes MIMO à six éléments 3x2

L'antenne MIMO à développer adopte une géométrie rectangulaire, un choix motivé par sa simplicité de modélisation, sa facilité de fabrication et sa large utilisation dans les configurations d'antennes patch. La figure 39 illustre la structure proposée de l'antenne MIMO composée de six éléments rayonnants.

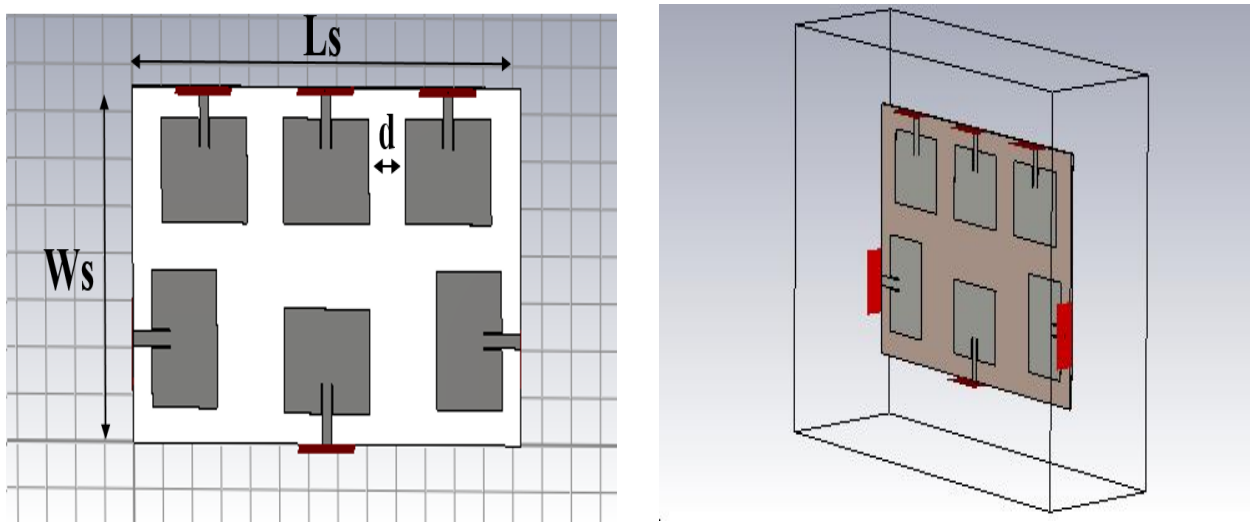


Figure 39: Géométrie d'antenne MIMO à six éléments et sa structure sous CST Microwave studio.

Les paramètres de l'antenne MIMO à six éléments sont présentés dans le Tableau 3 :

Tableau 3 : Paramètres de l'antenne MIMO à six éléments.

Les paramètres	Ws Largeur de substrat et de plan de masse	Ls Longueur de substrat et de plan de masse	D L'espace entre les deux patches	Hs Epaisseur de substrat
Les valeurs (mm)	265.5	151	25	2.1

III.3.1. Résultats de simulations

III.3.1.1 Coefficient de réflexion (S11)

La figure 40 représente le coefficient de réflexion de l'antenne MIMO à Six éléments :

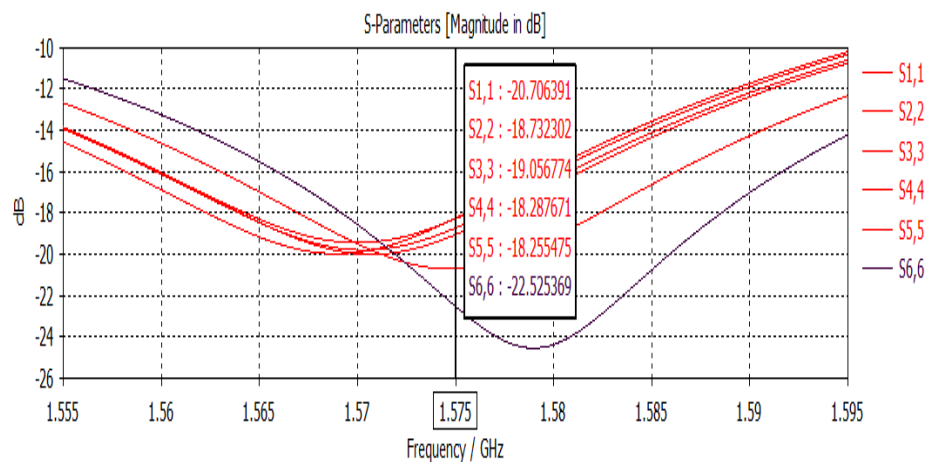


Figure 40: Courbes des Coefficients de réflexion du réseau MIMO à six éléments en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que toutes les valeurs des coefficients de réflexion sont supérieures à -18 dB à la fréquence 1.575 GHz, ce qui indique une bonne adaptation aux fréquences de fonctionnement de chaque port.

III.3.1.2. Coefficient de transmission (S21)

La figure 41 représente le coefficient de transmission de l'antenne MIMO à Six éléments :

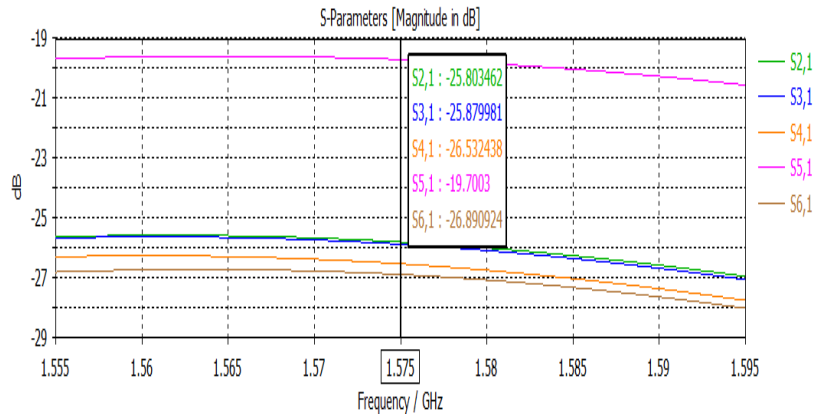


Figure 41: Courbes des Coefficients de transmission du réseau MIMO à six éléments en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que toutes les valeurs des coefficients de transmission sont inférieures à -19 dB à la fréquence 1.575 GHz, indiquant un faible couplage mutuel entre les éléments du réseau, qui confirme une bonne isolation et un fonctionnement stable du système MIMO.

III.3.1.3. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La Figure 42 montre le rapport d'onde stationnaire en fonction de fréquence :

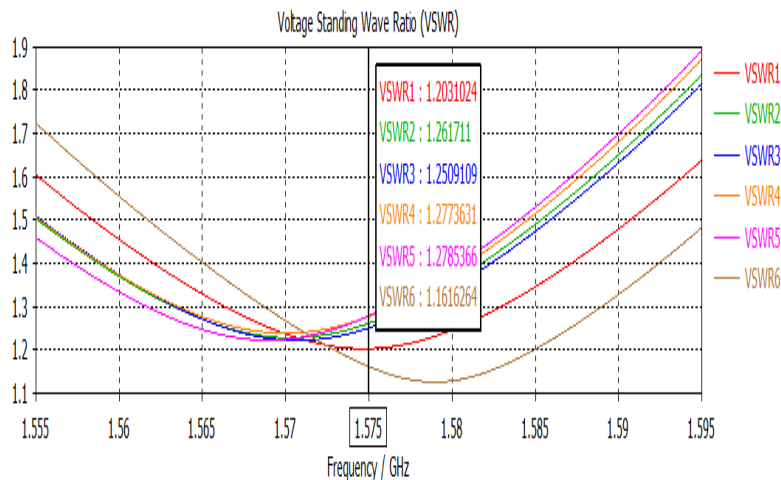
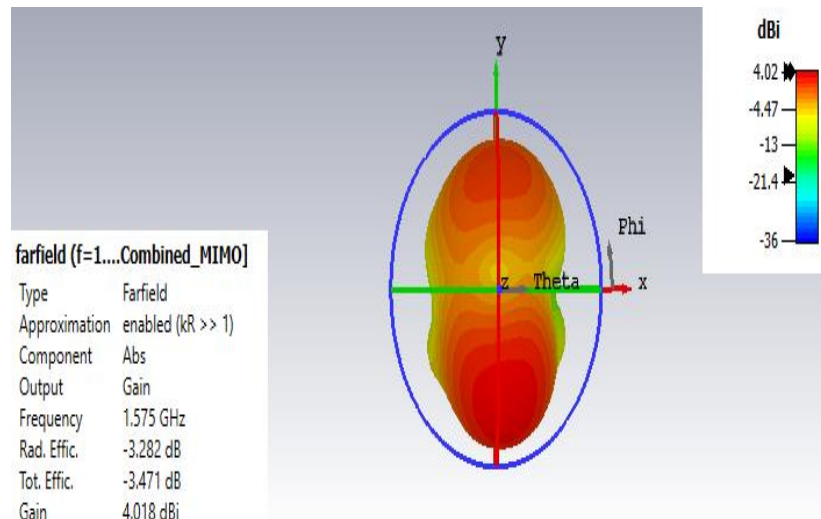


Figure 42: Rapport d'onde stationnaire (VSWR) à six éléments en fonction de la fréquence.

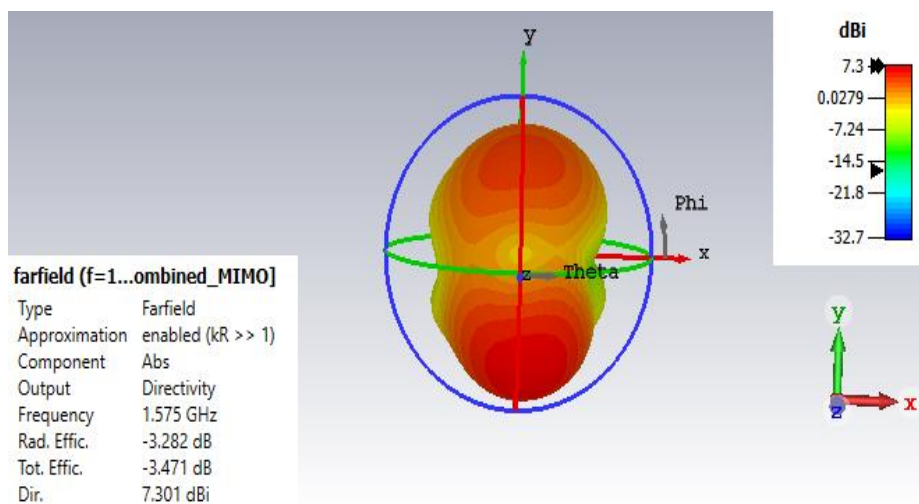
On remarque que toutes les VSWR est de l'ordre de 1 à la fréquence utilisée, ce qui démontre que nous avons une bonne adaptation d'impédance.

III.3.1.4. Diagramme de rayonnement

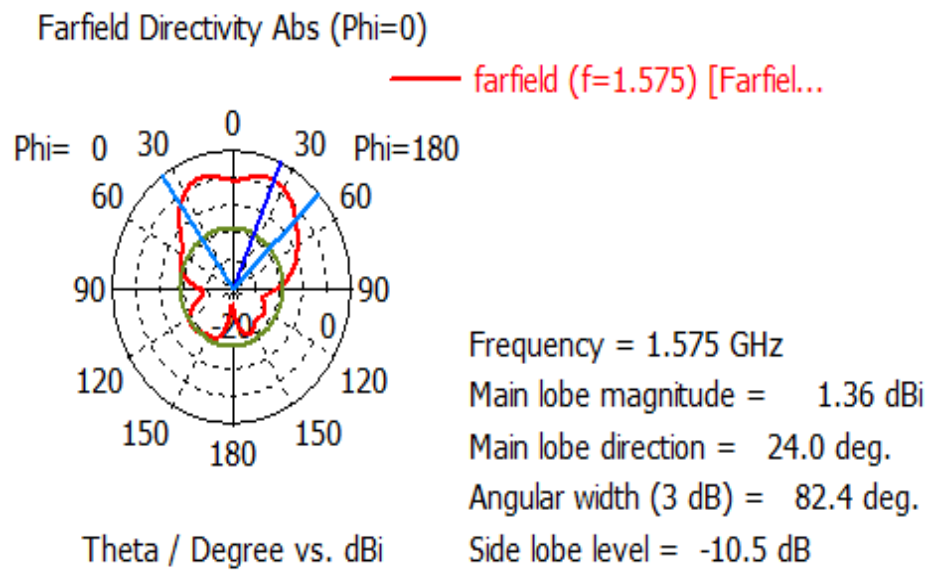
Les diagrammes de rayonnement 3D et 2D, simulé à la fréquence 1.575 GHz de l'antenne MIMO à six éléments sont illustrés dans la figure 43 suivante :



(a) Diagramme en 3D (Gain)



(b) Diagramme en 3D (Directivité)



(c) Diagramme en polaire

Figure 43: Diagramme de rayonnement 2D et 3D de l'antenne MIMO à six éléments à la fréquence 1.575 GHz.

III.3.1.5. Courant

Le rayonnement est concentré sur le patch cela indique que cette antenne envoie un rayonnement d'une manière excellente.

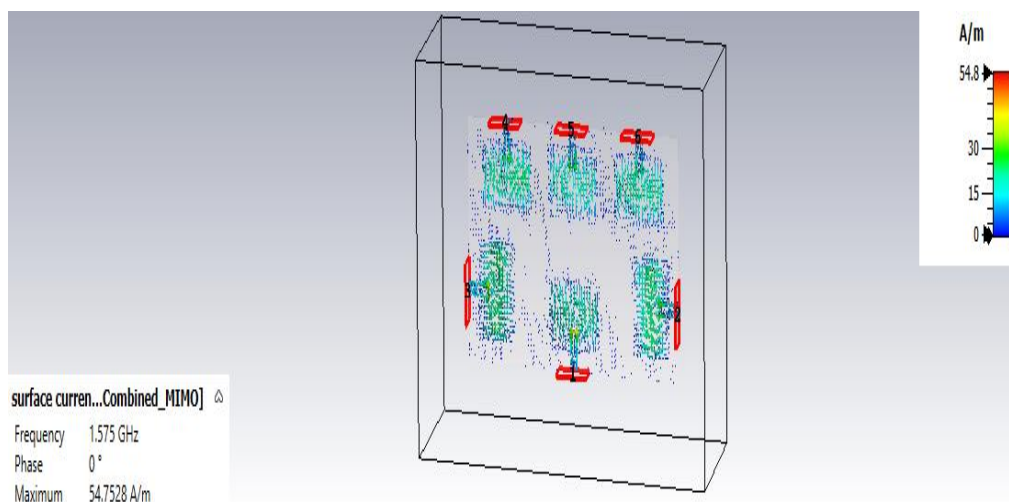


Figure 44: Courant de surface d'antenne MIMO à la fréquence 1.575 GHz.

III.4. Antennes MIMO à 4x2 éléments

Nous avons conçu une structure d'antenne MIMO de 8 éléments utilisé a pour but d'améliorer la directivité et la précision du faisceau. Cette extension comprend l'ajout de deux

patches et l'ajustement des phases d'excitation aux ports pour orienter le faisceau principal à 20° , optimisant ainsi le ciblage d'un véhicule. Les résultats montrent une meilleure focalisation et de meilleures performances qu'avec la configuration précédente.

La figure 45 présente la structure d'antennes MIMO à huit éléments :

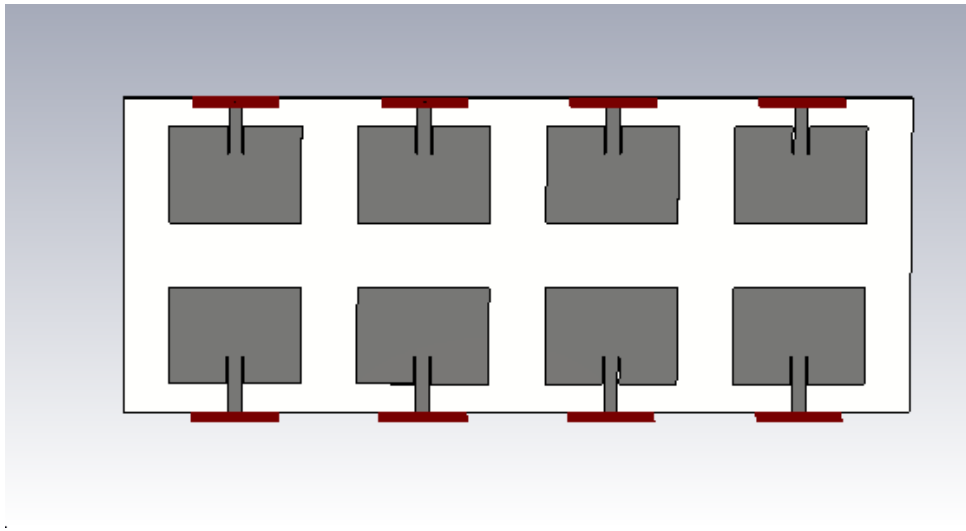


Figure 45 : Géométrie d'antenne MIMO à huit éléments et sa structure sous CST Microwave studio.

Les paramètres de l'antenne MIMO à huit éléments sont présentés dans le Tableau 4

Tableau 4 : Paramètres de l'antenne MIMO à huit éléments.

Les paramètres	Ws Largeur de substrat et de plan de masse	Ls Longueur de substrat et de plan de masse	D L'espace entre les deux patches	Hs Epaisseur de substrat
Les valeurs (mm)	349	145	25	2.1

Afin d'améliorer la couverture angulaire et les performances globales du système, une configuration MIMO à huit éléments a été développée en tant qu'extension du modèle à six éléments. Le tableau 5 montre les phases d'excitation appliquées à chaque port, ce qui permet une meilleure distribution de l'énergie rayonnée et une réduction des interférences entre les faisceaux.

Les phases d'excitation nécessaires pour obtenir un faisceau dirigé à 20° sont résumées dans le tableau 5 :

Tableau 5 : Phases d'excitation appliquées aux ports dans la configuration MIMO 4×2 .

Port	Phase
1	0
2	16.16
3	32.32
4	48.48
5	-19.39
6	-35.55
7	-51.71
8	-67.87

Cette distribution de phase progressive permet une distribution symétrique du rayonnement autour de l'axe central, améliorant le champ rayonnant global du réseau MIMO tout en fournissant également une bonne adaptation d'impédance.

III.4.1. Résultats de simulations

III.4.1.1. Coefficient de réflexion (S11)

La figure 46 représente le coefficient de réflexion de l'antenne MIMO à huit éléments :

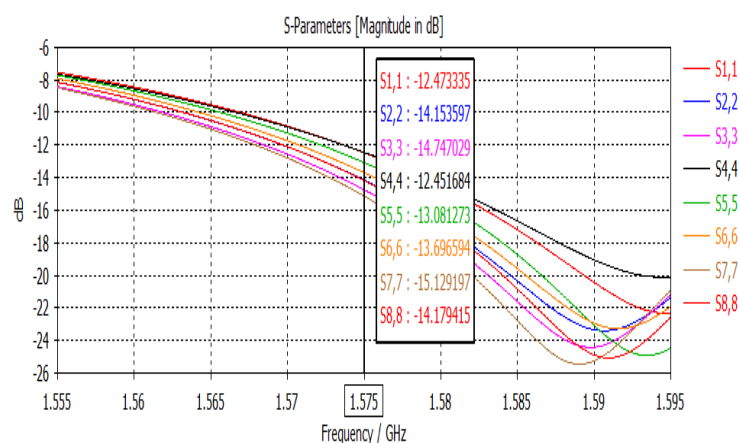


Figure 46 : Courbes des Coefficients de réflexion du réseau MIMO à huit éléments en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que toutes les valeurs des coefficients de réflexion sont inférieures à -12 dB à la fréquence 1.575 GHz, ce qui indique une bonne adaptation aux fréquences de fonctionnement de chaque port.

III.4.1.2. Coefficient de transmission (S_{21})

La figure 47 représente le coefficient de transmission de l'antenne MIMO à huit éléments :

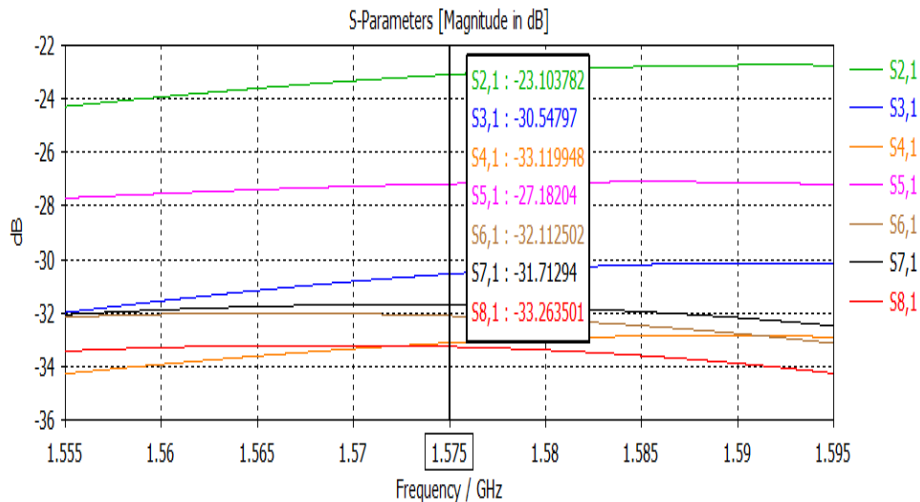


Figure 47 : Courbes des Coefficients de transmission du réseau MIMO à huit éléments en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que toutes les valeurs des coefficients de transmission sont inférieures à -23 dB à la fréquence 1.575 GHz, indiquant un faible couplage mutuel entre les éléments du réseau, qui confirme une bonne isolation et un fonctionnement stable du système MIMO à huit éléments.

III.4.1.3. Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La figure 48 montre le rapport d'onde stationnaire en fonction de fréquence :

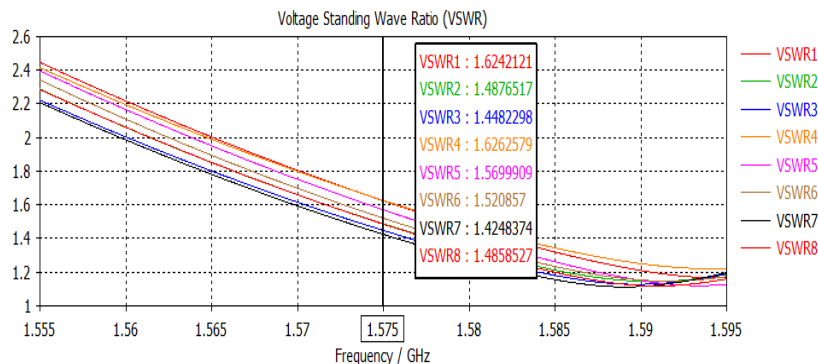
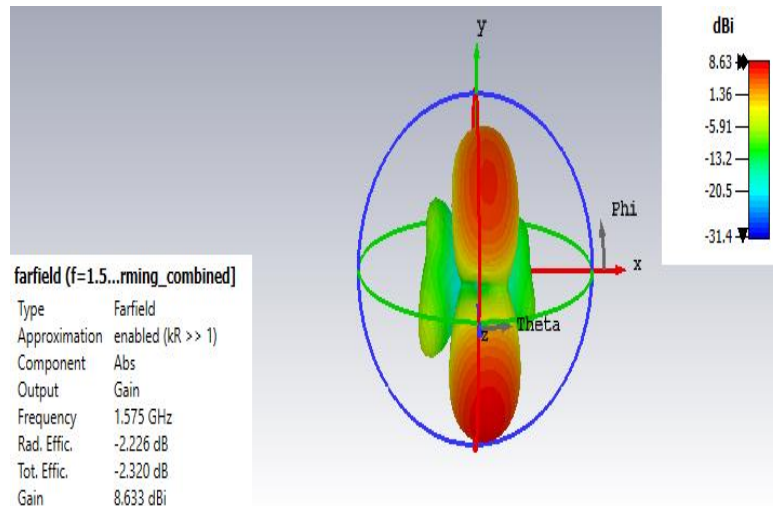


Figure 48 : Rapport d'onde stationnaire (VSWR) à huit éléments en fonction de la fréquence.

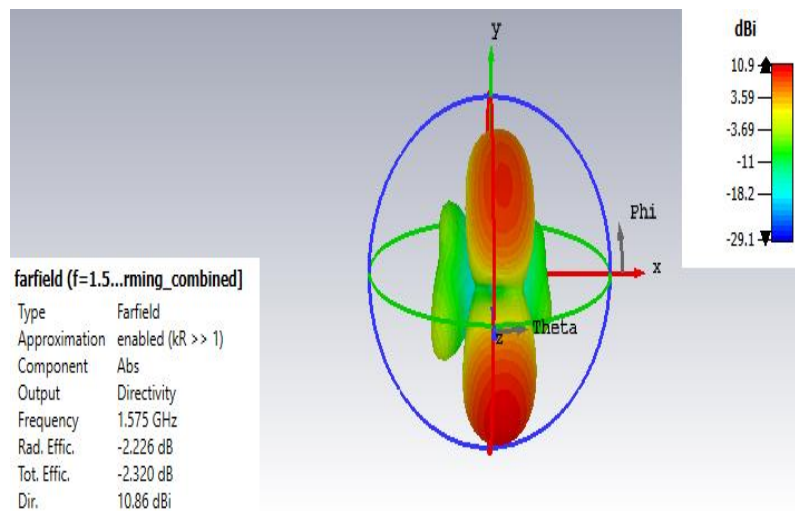
On remarque que toutes les VSWR est de l'ordre de 1.5 à la fréquence utilisée, ce qui démontre que nous avons une bonne adaptation d'impédance.

III.4.1.4. Diagramme de rayonnement

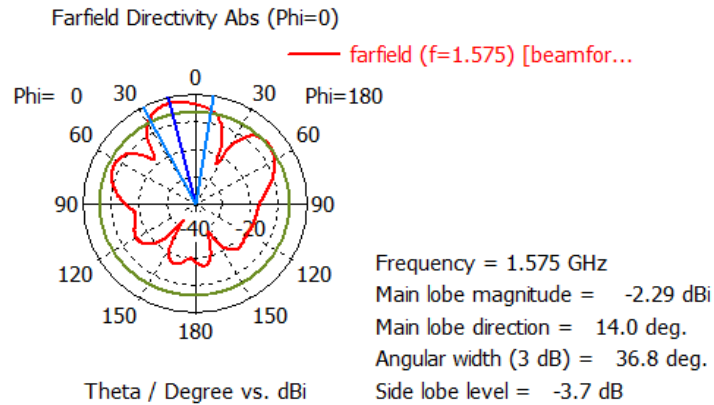
Les diagrammes de rayonnement 3D et 2D, simulé à la fréquence 1.575 GHz de l'antenne MIMO à huit éléments égale a 8.62 dBi pour la transmission et 10.9 pour la réception, ils sont illustrés dans la figure 53.



(a) Diagramme en 3D (Gain)



(b) Diagramme en 3D (Directivité)



(c) Diagramme en polaire 2D

Figure 49 : Diagramme de rayonnement 2D et 3D de l'antenne MIMO à huit éléments à la fréquence 1.575 GHz.

III.4.1.5. Distribution De Courant

La distribution du courant de surface a un courant maximal de 130 A/m, qui est concentré autour des lignes d'alimentation du patch. Cette intensité maximale indique le bon mode de résonance du réseau à la fréquence de 1,575 GHz.

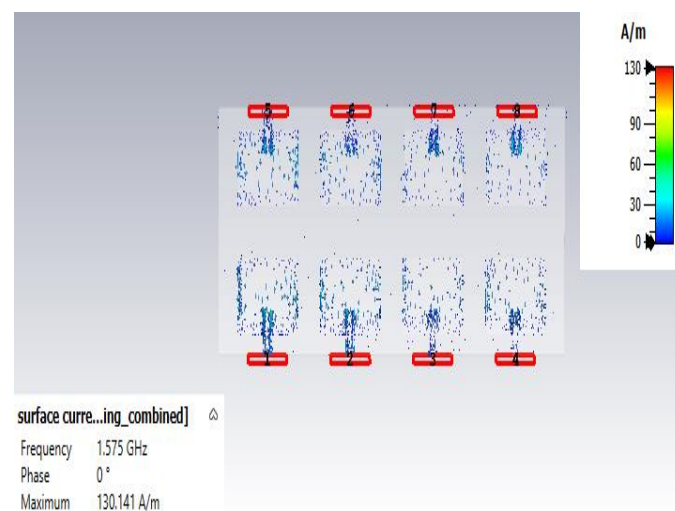


Figure 50 : Courant de surface d'antenne MIMO à huit éléments à la fréquence 1.575 GHz.

III.4.1.6. Comparaison des résultats obtenus

Nous pouvons remarquer à partir de cette comparaison que les caractéristiques de notre antenne patch simple et d'antennes MIMO à six éléments et MIMO à huit éléments avec excitation déphasé, ont fourni de meilleurs résultats qui utilisent le MIMO à huit éléments.

Tableau 6 : Comparaison des résultats d'antennes MIMO proposées à la fréquence 1.575.

LES RESULTATS	Antenne patch design	Réseau à six éléments	Réseau à huit éléments
Coefficient de réflexion	-38.38	-22.52	-14.74
Directivé	6.11	7.30	10.86
Gain (dB)	2.96	4.08	8.63

Le coefficient de réflexion S11 est égale a -14,74 dB à la structure de huit éléments et une meilleure adaptation obtenue dans la structure à six éléments (-22,52 dB). Cependant, la configuration 4x2 permet un gain plus élevé égale a 8,63 dB par contre 4,08 dB et une augmentation de la directivité (10,86 dB contre 7,30 dB).

Une meilleure distribution du champ rayonné est rendue possible par l'utilisation d'un déphasage adapté aux ports réseau 4x2. Cette méthode améliore la concentration de rayonnement dans des directions particulières, ce qui aide à améliorer la couverture spatiale pour les applications de géolocalisation.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la conception, la modélisation et l'optimisation d'un système d'antenne intelligente adapté aux exigences de la géolocalisation GPS, en tirant parti de la connectivité 5G. Le travail a débuté par la réalisation d'une antenne patch simple, résonnant à 1,575 GHz, conçue sur un substrat FR4 à partir de calculs théoriques et de dimensions optimisées. Une fois cette antenne validée, elle a été intégrée dans une configuration MIMO 3×2, avec un espacement inter-éléments de $\lambda/2$ afin de garantir une bonne isolation mutuelle et une faible corrélation entre les signaux. La modélisation a été effectuée dans l'environnement CST Studio Suite, permettant la simulation de paramètres électromagnétiques essentiels tels que le coefficient de réflexion (S11), le gain, la directivité et le diagramme de rayonnement. Les résultats obtenus révèlent un comportement très satisfaisant, avec un S11 atteignant -30 dB et un gain supérieur à 4 dBi.

Ensuite porté sur une architecture MIMO 4×2, qui a permis d'améliorer les performances en termes de gain (8.63 dB) et directivité (10.86 dB) au détriment d'un S11 un peu moins bon (-14.74 dB). L'utilisation d'un déphasage sur les ports, contrôlé électriquement, a amélioré la répartition du champ rayonné justifiant l'intérêt d'une telle configuration pour des applications de géolocalisation avancées.

Enfin, ce travail constitue une base solide pour des développements futurs, notamment vers des architectures plus avancées intégrant du beamforming adaptatif ou des réseaux à fréquence reconfigurable.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Portée par l'essor des réseaux 5G et la demande croissante en solutions de géolocalisation plus précises, cette étude s'est consacrée à la conception et à l'optimisation d'antennes MIMO intelligentes destinées au suivi GPS des véhicules, en tirant parti des capacités offertes par la 5G.

Nous avons tout d'abord exploré les fondements des antennes imprimées, en abordant leur structure, leurs paramètres électromagnétiques (tels que S11, ROS et gain), les techniques d'alimentation ainsi que les approches de miniaturisation. Cette première étape a permis de mettre en évidence l'intérêt des antennes patch compactes pour les applications embarquées, notamment grâce à leur intégrabilité et leur simplicité de fabrication.

Le second chapitre s'est concentré sur les antennes intelligentes et les technologies associées à la 5G, en particulier le MIMO massif, le beamforming et l'utilisation de petites cellules pour assurer une meilleure couverture et robustesse du lien radio. L'analyse a montré que le couplage de ces technologies avec le système GPS améliore significativement le rapport signal sur bruit et renforce la précision de localisation, en particulier dans les environnements urbains denses où le GPS seul montre ses limites.

Enfin, la dernière partie du mémoire a présenté la réalisation concrète d'une antenne patch résonant à 1,575 GHz, intégrée dans une architecture MIMO 3×2. Les simulations menées avec CST Studio Suite ont révélé des performances convaincantes : un coefficient de réflexion S11 inférieur à -30 dB, un gain supérieur à 4 dBi et un diagramme de rayonnement orienté vers le ciel, idéal pour la réception des signaux GPS. Ces résultats valident la faisabilité d'un système de géolocalisation fiable, précis et économiquement viable, basé sur des antennes intelligentes de conception simple.

En accord avec cette approche, nous avons donc proposé une version améliorée de l'architecture MIMO pour les réseaux 4x2. À l'aide de huit éléments de patch, nous avons pu réaliser un phasing entre les ports dans cette configuration, résultant en une directivité de 10,86 dB, un gain de 8,63 dB et une stabilité S11 de -14,74 dB. Ces résultats valident la contribution d'un réseau MIMO pour fournir une précision directionnelle et une efficacité globale du système dans le cadre de la géolocalisation tout en maintenant un niveau raisonnable de complexité de fabrication.

Ce travail ouvre ainsi de nombreuses perspectives de recherche, telles que l'implémentation d'antennes intelligentes à contrôle de phase dynamique, l'étude de la géolocalisation dans les bandes millimétriques en environnement mobile, ou encore l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour l'optimisation automatique du faisceau et de la connectivité.

ANEX A

Présentation de l'outil de simulation

Présentation d'Outils de simulation

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.

Le logiciel CST Microwave Studio est un logiciel de simulation appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques 3D [46]. Il permet de réaliser des simulations dans de nombreux domaines d'applications telles que les performances et l'efficacité des antennes et des filtres, communications électroniques (Wi-Fi, 5 G, Satellite ...), transport (voitures connectées), performances des circuits imprimés. Il est basé sur la méthode d'intégration finie FIT (Finit Intégration Technique) développé en 1977 par Weiland [46]. Cette méthode offre une discrétisation spatiale des équations de Maxwell sous leur forme intégrale sur un espace de grille. On peut effectuer une étude dans le domaine temporel ou fréquentiel à l'aide de cette méthode.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Conception de l'antenne.
- Simulation de l'antenne.

Interface CST : L'interface CST contient une fenêtre principale repartit en plusieurs parties ().

- ✓ Barre d'outils : se trouve en haut de l'interface ; qui est un ensemble de raccourcis depuis la barre de menus.
- ✓ L'arbre de navigation : sur le côté gauche de l'interface ; permet d'accéder aux éléments structuraux et résultats de simulation.
- ✓ Le plan de travail : se trouve au milieu de l'interface.
- ✓ La liste des paramètres : dont on trouve tous les paramètres utilisés dans la simulation.
- ✓ Un message indiquant si chaque étape est simulée avec succès, sinon, un message d'erreur.

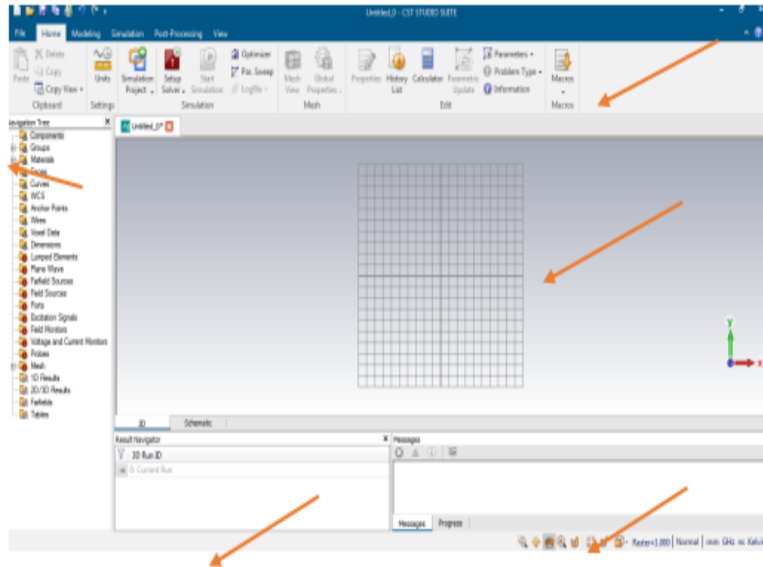


Figure 51: L'interface graphique de logiciel CST Microwave Studio 2019.

Avantages du logiciel CST

- La possibilité de traiter toutes les structures homogènes et inhomogènes (les antennes, les structures planaires, les structures multicouches, les filtres et les coupleurs) avec une bonne précision et une rapidité de résolution.
- Permet de calculer différents paramètres tels que : les paramètres S, le diagramme de rayonnement, la distribution du courant ...
- Le traitement sur une gamme de fréquence élevé, par rapport à d'autres simulateurs.

Bibliographies

Bibliographies

Bibliographies

Bibliographies

- [1] A. Chaabane, F. Djahli, H. Attia, L. Mohamed Abdelghani, et T. Ahmed Denidni, « Wideband and high-gain EBG resonator antenna based on dual layer PRS », *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 59, n° 1, p. 98-101, 2017.
- [2] A. Boyer, « Institut nationale des sciences appliquées de Toulouse 5eme année Réseau et Télécom », 2011.
- [3] H. Si Ali et I. Benamara, « Antenne Patch Pour La 5G Millimétrique », Mémoire de Fin d'étude Master, université Belhadj-Bouchaib, d'Ain témouchent, 2023.
- [4] M. Tarbouch, A. El Amri, H. Terchoune, et O. Barrou, « A compact microstrip patch antenna based on fractal geometry on the ground plane », présenté à 2018 International Conférence on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), IEEE, 2018, p. 1-8.
- [5] C. LAHEG, « Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable », Mémoire de Master, université 08 MAI 1945, Guelma, 2022.
- [6] F. Attaouat et S. Lechehab, « Etude et Conception d'une Antenne Patch Monopole à faisceau reconfigurable à base de surfaces sélectives en fréquence », Master académique, Kasdi Merbah, Ouargla, 2020.
- [7] M. GHAOUTI, « Les antennes imprimées pour la 5G », université Belhadj-Bouchaib, d'ain témouchent, 2023.
- [8] D. Ameziane, « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, de Tlemcen, 2008.
- [9] R. Garg, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.
- [10] P. Combes, in *Circuits passifs, propagation, antennes*, vol. 2, paris: série Dunod, 1997.
- [11] P. Vaillant, « Radar Tutoriel - Antenne à plaque ». Consulté le: 21 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenne%20C3%A0%20plaque.fr.html>
- [12] W. Sidi Yakoub et B. Khatir BenMeheimda, « Conception d'un réseau d'antennes patch pour les applications satellitaires en bande C », Mémoire de Master, université Belhadj-Bouchaib, d'Ain Témouchent, 2021.

- [13] A. Bouhafis et A. Ichou, « Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G », Mémoire de Master, de Tlemcen, 2020.
- [14] M. Mansouri et E. Ezzourog, « Conception et simulation d'une antenne patch ultra large bande [1-8 GHz] », Mémoire de Master, Université Blida 01, 2019.
- [15] Z. Berkat, « Conception et Analyse d'Antennes Combinées à Polarisation Multiples pour Différents Standards de Télécommunication », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [16] R. Abdelatif, *Les antennes fractales / 978-3-639-54888-4 / 9783639548884 / 3639548884*. Éditions universitaires européennes, 2017.
- [17] Redj. I. FADHEL Choayb, « Conception et réalisation d'une antenne multi-bande pour des applications GPR. », Mémoire de Fin d'étude Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2021.
- [18] S. Taleb, « Simulations de systèmes d'antennes pour imagerie micro-ondes », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [19] A. Synak, « Design and implementation of UHF patch antenna », Bachelor's thesis, Université Politècnica, de Catalunya, 2014.
- [20] A. Boyer, « support de cours énonce de travaux dirigés », *Inst. Natl. Sci. Appliquées Toulouse 5ème Année Réseau Télécom*, p. 79, 2011.
- [21] F. Z. MOUSSA, « Étude et conception des antennes miniatures à base des méta matériaux pour les standards de télécommunications mobiles et de la nouvelle génération 5G », Thèse de doctorat, université Belhadj-Bouchaib, de Ain Témouchent, 2024.
- [22] K. Carver et J. Mink, « Microstrip antenna technology », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 29, n° 1, p. 2-24, 1981.
- [23] B. Lynda et C. Lila, « Miniaturisation de l'antenne PATCH sous CST », Mémoire de Fin d'Etudes MASTER, Université Mouloud MAMMERI, de Tizi-Ouzou, 2018.
- [24] O. Picon, *Coll les antennes, Théorie, « conception et application l'usine du nouvelle*»,. Dunod, 2009.

- [25] W. BOUAKEZ et A. KHEDIRI, « CONCEPTION ET OPTIMISATION D'ANTENNE PATCH POUR LES APPLICATIONS DE COMMUNICATION 5G », diplôme de Master Académique, Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa, 2024.
- [26] N. HELLAL et S. HARBI, « Etude Et Conception D'un Système D'antenne Large Bande Pour Les Applications 5g », Mémoire de Fin d'Etudes MASTER, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2022.
- [27] F. T. Ulaby, *Fundamentals of applied electromagnetics, 1999 edition*. Prentice-Hall, 1999.
- [28] Z. Hamouda, « Antenne microondes souples ultra large bandes à base de matériaux composites », Thèse de doctorat, Université de Blida, 2016.
- [29] A. A. Rakholiya et N. V. Langhnoja, « A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna », *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, vol. 3, n° 2, p. 4281-4287, 2017.
- [30] D. Froumsia, S.-W. Yao, E. D. Jean-François, H. Alphonse, KOLYANG, et M. Inc, « A review of the miniaturisation of microstrip patch antenna based on fractal shapes », *Fractals*, vol. 30, n° 05, p. 2240161, 2022.
- [31] T. Arab, « Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures », Diplôme de Magister, 2018.
- [32] Y. Cheng, Y. Dong, et Y. Pan, « Miniaturized circularly polarized metal antenna with a shorting pin for low cost RFID application », présenté à 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), IEEE, 2019, p. 1-3.
- [33] G. Li et F.-S. Zhang, « A compact Broadband and wide beam circularly polarized antenna with shorted vertical plates », *IEEE Access*, vol. 7, p. 90916-90921, 2019.
- [34] D. Gherbi, « Etude et conception d'une antenne reconfigurable en utilisant des composants actifs », 2023.
- [35] Y. Zeman et A. E. Foukia, « Étude et Conception d'Antennes Reconfigurables par Association d'éléments actifs », mémoire pour obtenir le diplôme de Master, r de l'université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2017.

- [36] B. Selma et L. Chafika, « Conception et modélisation d'une antenne micro ruban compacte pour une utilisation dans les terminaux mobiles », Mémoire du master, Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2011.
- [37] O. Berkat et A. Benghalia, « Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrices dans la bande millimétrique », Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [38] S. L. Stefanovski et B. M. Kolundžija, « The impedance variation with feed position of a microstrip line-fed patch antenna », *Serbian J. Electr. Eng.*, vol. 11, n° 1, p. 85-96, 2014.
- [39] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, Third edition, John Wiley & Sons, 2016.
- [40] A. BENMECHERNENE et S. C. RACHDI, « Analyse d'antenne patch à base du Graphène », Thèse de doctorat, Belhadj Bouchaib, Ain témouchent, 2022.
- [41] A. Benghalia et A. Boufrioua, « Contribution à l'étude des antennes à patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant », Thèse de Doctorat, institut d'électronique, université de Constantine, 2006.
- [42] D. Aissaoui, « Analyse a l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées Alimentées par ligne adaptées », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2007.
- [43] A. Benomar, « Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques.: Application aux Réseaux de Télécommunications », Thèse du doctorat, Université de Limoges, 2015.
- [44] S. Soltane, « ETUDE ET CARACTERISATION D'ANTENNES IMPRIMEES POUR SYSTEME ULTRA-LARGE BANDE. », Diplôme de Magister, Université Mohamed Khider-, Biskra, 2015.
- [45] Z. BEN TAHAR et S. Y. BEN ABDESSELAM, « Réalisation d'une Interface graphique de Calcul des paramètres d'antennes patch et conception logicielle », Mémoire de Fin d'Etudes MASTER, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib, d'Ain-Temouchent, 2019.
- [46] Fouad Benamrane, « Mémoire Online - Conception d'une antenne Patch Microstrip - Fouad Benamrane, « Conception d'une antenne Patch Microstrip»; Master télécom hyper fréquence mémoire online; Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fés) Maroc 2011. uad Benamrane », Master télécom hyperfréquence mémoire online, Université Sidi Mohamed

Ben Abdellah (Fés), maroc, 2011. Consulté le: 26 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.memoireonline.com/11/12/6502/Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip.html>

- [47] A. K. Bentouati et R. N. Boublenza, « Étude et conception d'antennes MIMO pour les systèmes de communication 5G », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2022.
- [48] M. GUERROUI, « Conception d'une nouvelle antenne pour une application GPR », Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945, 2022.
- [49] E. Club, « J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes », 2002.
- [50] M. Series, « IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond », ITU, ITU-R M.2083-0, 2015.
- [51] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, et H. Bolcskei, « An overview of MIMO communications-a key to gigabit wireless », *Proc. IEEE*, vol. 92, n° 2, p. 198-218, 2004.
- [52] A. Gohil, H. Modi, et S. K. Patel, « 5G technology of mobile communication: A survey », présenté à 2013 international conference on intelligent systems and signal processing (ISSP), IEEE, 2013, p. 288-292.
- [53] M. Drissi, « Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les' smal cell' », Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie, TUNISIE, 2023.
- [54] M. Emmaeinna, S. Faci, A.-L. Billabert, A. Kabalan, C. Algani, et M. L. Diakité, « Performance analysis of radio-over-fiber based on phase-modulation and direct-détection for the future 5g network », présenté à 2018 20th International Conférence on Transparent Optical Networks (ICTON), IEEE, 2018, p. 1-4.
- [55] sihem BRAIKIA, « Intégration d'un système de géolocalisation dans une canne intelligente », Mémoire de Fin d'étude Master, Université Abou Bakr Belkaïd, de Tlemcen, 2020.
- [56] A. S. Chekkouri, « Véhicules connectés contributions à la communication véhicule-réseau mobile et la localisation coopérative », Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2015.

- [57] J. Li, J. Conan, et S. Pierre, « Position location of mobile terminal in wireless MIMO communication systems », *J. Commun. Netw.*, vol. 9, n° 3, p. 254-264, 2007.
- [58] « La composition du système GPS | tpe-GPS by Mamadou Cisse Iers1 ». Consulté le: 8 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://tpejvilar.wordpress.com/a-propos/la-composition-du-systeme-gps/>
- [59] J.-B. Henry, « Cours de topographie et topométrie générale », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Licence ès Technique, 2012.
- [60] « Quel est le principe de fonctionnement du GPS ? - Couleur-Science ». Consulté le: 8 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://couleur-science.eu/?d=97791a--quel-est-le-principe-de-fonctionnement-du-gps>
- [61] F. MAGNE, « Télécommunications haut débit en ondes millimétriques », Ed. Techniques Ingénieur, 1998.
- [62] J. Rodriguez, *Fundamentals of 5G mobile networks*, Institut des Télécommunications. Aveiro, Portugal: John Wiley & Sons, 2015.
- [63] T. Nakamura *et al.*, « Trends in small cell enhancements in LTE advanced », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, n° 2, p. 98-105, 2013.
- [64] N. H. Mahmood, M. G. Sarret, G. Berardinelli, et P. Mogensen, « Full duplex communications in 5G small cells », présenté à 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), IEEE, 2017, p. 1665-1670.
- [65] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan, et R. Wichman, « In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, n° 9, p. 1637-1652, 2014.
- [66] L. C. Godara, *Smart antennas*. CRC press, 2004.
- [67] N. Guellil, « Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum », mémoire de magister, Université de Sétif 1, 2018.
- [68] N. J. G. Fonseca, « Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseaux pour Applications Multifaisceaux », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2010.

- [69] A. Ngom, « Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou " Small Cells" pour le standard 5G », Thèse de Doctorat, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019); Université Cheikh Anta Diop (Dakar), France, 2019.
- [70] W. H. Kummer, « Basic array theory », *Proc. IEEE*, vol. 80, n° 1, p. 127-140, 1992.
- [71] A. LARBI, T. MEHTAR, M. DEBBAL, et Z. KOURDI, « Conception et simulation des techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes microrubans », Thèse de Doctorat, 2022.
- [72] P. Panaia, R. Staraj, G. Kossiavas, et G. Jacquemod, « Reconfiguration dynamique d'une antenne », *JNM 2003*, 2002.
- [73] M. Mouhamadou, « Contribution au développement et à l'optimisation d'un démonstrateur d'antennes adaptatives: Application à des systèmes de communications sans fil haut débit: WiMax », Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [74] Y. KOUIDRI et S. TOUATI, « 📖 Thésés-Algérie: Doctorat, Magister, Master... », diplôme de MASTER, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2021.
- [75] M. Dehemchi et A. Bouhafer, « Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G », Master Académique, Université 8Mai 1945, Guelma, 2019.
- [76] S. MEKHANCHA, « Contribution à l'étude et à la synthèse d'antennes intelligentes Applications aux communications mobiles », diplôme de Magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2012.
- [77] S. Kandasamy, R. Morla, et M. Ricardo, « Improving the Performance of IEEE802. 11s Networks using Directional Antennas over Multi-Radio/Multi-Channel Implémentation The Research Challenges », présenté à Proceeding of the 4th Doctoral Symposium on Informatics Engineering (DSIE), Citeseer, 2009, p. 1-12.
- [78] J. C. Liberti et T. S. Rappaport, *Smart antennas for Wireless communications: IS-95 and third génération CDMA applications*. Prentice Hall PTR, 1999.
- [79] Y. Chartois, « Etude paramétrique avancée de canaux SISO et MIMO en environnements complexes: Application au système Hiper LAN/2 », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne-ENSTB, Rennes 1, 2005.

- [80] A. Z. ALLEL MONCEF, « Conception de nouveau système d’antennes MIMO pour le standard 5G », Université 8 Mai 1945, 2021.
- [81] C. Buey, « Conception et mesure de systèmes multi-antennes pour les futures technologies 5G », Thèse de Doctorat, Université côte d’azur, 2018.
- [82] K. SADAOUI et N. MENNI, « Année Universitaire 2018/2019 », université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, 2019.
- [83] K. DACI et W. DOU, « Etude de massive MIMO pour 5G », Thème mémoire, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued, 2018.
- [84] A. Rozé, « Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d’onde millimétriques », Thèse de Doctorat, INSA de Rennes, 2016.
- [85] S. E. Hajri, « L’amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs », Thèse de doctorat, Université Paris Saclay, 2018.

