



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

N°d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

FILIERE : TELECOMMUNICATIONS

Spécialité : Système des Télécommunication

Thème

Caractérisation des antennes filaires et imprimées à l'aide du l'analyseur
de réseau vectoriel et l'analyseur de spectre pour travaux pratiques

Présenté par :

Mme ELKEYAL Chahinez

Melle GHALEM Hafidha

Soutenu publiquement le : 12/07/2022 devant le jury composé de :

Président: M. AHMADOUCHE Ahmed MCA Université de Mostaganem

Examineur : M. BENAOUALI Mohamed MAA Université de Mostaganem

Rapporteur : M. ABED Mansour MCA Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2021/ 2022

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à mes chers parents qui, je l'espère, ont trouvé ici le fruit de nombreuses années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Et à mon cher mari qui est mon point fort, il m'a encouragé à terminer mes études et b1 sur ma petite fille « Maria » elle est la prunelle de mes yeux et mes sœurs et frères que j'aime trop et toute ma famille qui a été une source de soutien pour moi et de réconfort.

A tous mes proches, amis et connaissances qui ont contribué de près ou de loin à rendre ce travail moins difficile

A celui qui a participé avec moi à ce mémoire

GHALEM Hafida.

Dédicaces

Je dédie ce travail mes parents

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

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 chers frère Farid pour leurs appui et leur encouragement et mes sœurs Hakima ,zakia , Anissa ,Bochra

A celui qui a participé avec moi à ce mémoire

ELKEYAL CHAHINEZ

A nos très chers amis KHadidja , Somia , Alia , Halima , Djamila, Bochra , Fatima, Ines

Remerciement

Nous est agréable et important de réserver cette page comme un témoin de reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenus et encadrés pour la réalisation de ce travail.

Tous d'abord, nous remercions Allah le tout puissant de nous ouvrir les portes du savoir, de nous avoir aidé dans les moments difficiles, et de nous avoir permis d'être ce que nous somme devenues.

Nos sincères remerciements vont également à tous nos professeurs durant ces cinq années à l'université, pour leurs conseils, leur aide et leur soutien. Nos grands remerciements et sincères respect vont à notre encadreur M. ABED MANSOUR pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail ainsi que ses précieux conseils et sa critique fondée.

Nos plus sincères remerciements vont aux membres du jury et de la sentence pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous remercions aussi tous nos camarades de la faculté de la science et de la technologie en particulier nos amis de la promotion "M2 télécom 2022". On leur exprime notre profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de bien. Finalement, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, sans oublier tous ceux qui nous ont encouragé le long de notre parcours universitaire, A tous ceux qui nous aimons.

.....Merci

Sommaire

Liste des abréviations	i
Tableau des Symboles	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des Tableau	v
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les antennes

I.1 Introduction	4
I.2 Définition d'une antenne	4
I.2.1Caractéristiques de l'antenne spatiale	4
I.2.1.1Coefficient de Réflexion	5
I.2.1.2 Diagramme de rayonnement	5
I.2.1.3 Directivité	6
I.2.1.4 Gain.....	6
I.2.1.5 Impédance d'entrée	6
I.2.1.6 Polarisation.....	7
I.2.1.7 La bande passante.....	7
I.2.1.8 Rendement	8
I.2.1.9 Adaptation	8
I.2.1.10 Angle d'ouverture.....	9
I.3 Rôles d'une antenne.....	9
I.4 Différents types d'antennes	10
I.5 Domaines d'application des antennes	10
I.6 Conclusion.....	11

Chapitre II : Principe de fonctionnement de l'analyseur de réseau vectoriel et de l'analyseur de spectre

II.1 Introduction	13
II .3.3.1 Analyseurs à balayage de fréquence	13
II.3.3.2 Analyseurs en temps réel.....	13

II.2.2 Domaines d'utilisation	14
II.2.3 Fonctionnement	14
II.2.4 Calibration	15
II.2.5 Paramètres S.....	16
II.2.6 Caractéristique du VNA 3.2 GHz PROTEK A333.....	17
II.3 L'analyseur de spectre	17
II.3.1 Définition	17
II. 3.2 Domaines d'utilisation	18
II.3.3 Types d'analyseurs de spectre en termes de technologies et formats.....	18
II.3.4 Classification par type de mesure	19
I.3.5 caractéristique da l'analyseur de spectre du laboratoire.....	20
II.4 conclusion	20

Chapitre III : Caractérisations des antennes filaires

III. 1 Introduction	23
III.2. Antenne dipolaire	23
III.2.Type d'antenne dipolaire	23
III.2.2 Fonctionnement électrique	26
III.2.3 Gain de l'antenne dipôle.....	26
III.2.4 Antenne monopole	27
III.3.1 Caractéristique du monopole	27
III.4 Antenne dipôle log- périodique (antenne Yagi).....	27
III.4.1 Principe de fonctionnement	28
III.4.2 Caractéristiques	28
III.4.3 Gain d'une antenne yagi-Uda	29
III.5 Mesures et calculs sur les antennes filaires	30
III.5.1 Mesures sur l'antenne dipole log- périodique(Yagi).....	30
III.5.1.2 Calcul de la bande passante	31
III.5.1.3 Détermination de la zone de champs lointains	31
III.5.1.4 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss}).....	31
III.5.1.5 Calcul du paramètre S_{21}	32
III.5.1.6 Calcul de la densité de puissance du rayonnement électromagnétique Ambiant.....	33

III.5.2 Mesure sur l'antenne dipôle.....	34
III.5.2.2 Calcul de la bande passante	35
III.5.2.3 Détermination de la zone de champs lointains	35
III.5.2.4 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss}).....	35
III.5.2.5 Calcul du paramètre S_{21} et du gain de l'antenne	36
III.5.2.6 Calcul de la densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant ambiant autour de 1.8 GHz	37
III.5.3.1 Mesures à la fréquence de la voie descendante ($f_M=1.71$ GHz).....	38
III.5.3.2 Mesures à la fréquence de la voie descendante ($f_D=1.82$ GHz).....	39
III.5 Conclusion.....	40

Chapitre IV : Caractéristique des antennes patch (planaires) et pifa

IV.1 Introduction	42
IV.2 Les antennes imprimées.....	42
IV.2.1 Définition des antennes patch (imprimées).....	42
IV.2.2 Utilisation	42
IV.2.3 Structure d'une antenne imprimée ou patch.....	43
IV.2.4 Caractéristique des antennes patch	43
IV.2.5 Principe de fonctionnement des antennes Patch.....	44
IV.2.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées	44
IV.2.8 Les applications des antennes microbandes	45
IV.2.9 L'antenne patch rectangulaire	45
IV.2.10.1 Modélisation d'antenne patch rectangulaire.....	46
IV.2.10.2 Calcul des paramètres géométriques	46
IV.3 Mesure avec l'antenne Patch	47
IV.3.1 Calcul théorique des dimensions de l'antenne patch	47
IV.3.2 Mesures du coefficient de réflexion	48
IV.3.3 Calcul de la bande passante.	49
IV.3.4 Détermination de la zone de champ lointain.....	50
IV.3.5 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss}).....	50
IV.3.6 Calcul du paramètre S_{21} et du gain de l'antenne	50
IV.4 Antennes PIFA (Planar Inverted F Antenna)	51

IV.4.1 Définition des antennes PIFA	51
IV.4.2 Différents types d'antennes PIFA	51
IV.4.3 Fréquence de résonance.....	52
IV.4.4 Avantages et inconvénients d'une antenne PIFA	52
IV.2.6 Mesures avec l'antenne PIFA (2.45 GHz).....	52
IV.2.6.1 Mesure du coefficient de réflexion	52
IV.5.2 Calcul de la bande passante autour de 2.45 GHz.....	53
IV.5.3 Calcul de la zone de champ lointain.....	53
IV.5.4 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss})	54
IV.6 Mesure de la densité de puissance de rayonnement électromagnétique ambiant autour de 2.45 GHz.....	55
IV.7 Conclusion.....	57
Conclusion générale	58
Bibliographie.....	60

Annexe A

Partie I : Rappel sur les caractéristique d'une antenne.....	A1
Partie II : Caractérisation des antennes	A7
TP 0 : Principe de fonctionnement et utilisation de l'analyseur de réseaux vectoriels et l'analyseur de spectre	A10
TP 1 : Caractérisation d'une antenne dipôle	A19
TP 2 : Caractérisation d'une antenne Yagi.....	A 21
TP3 : Caractérisation d'une antenne Patch.....	A24
TP4 : Caractérisation d'une antenne PIFA.....	A26

Liste des abréviations

BP : La bande passante.

HF : Haut fréquence.

APM : Antennes plaque micro ruban.

PIFA: Planar Inverted –F Antenna.

GSM: Global System for Mobile Communications.

DCS: Digital Cellular System ou Digital Communication System.

PCS : Personale Communications Service.

UMTS : L'universel Mobile Télécommunications System.

3G : Troisième génération.

VNA: Vectoriel Network Analyser.

LAN: Local Area Network.

RF : Radio Fréquence.

ULB: ultra large bande

Liste des symboles

ϵ_r : Permittivité relative.

ϵ : Permittivité diélectrique.

f_h : Les fréquences limites haute.

f_1 : Les fréquences limitent basses basse du spectre signal.

f_c : Fréquences de coupure.

f_r : Fréquence de résonance.

L : Longueur effective.

P_r : Puissance rayonnée.

Q : Facteur de qualité.

S_{11} : Coefficient de réflexion.

W : Largeur.

E : Le vecteur Champ électrique.

H : Le vecteur Champ magnétique.

γ : La Constante de Propagation.

α : L'atténuation.

β : Constante de Phase.

μ : La Perméabilité.

σ : Conductivité.

ω : La pulsation de résonance.

λ : Longueur d'onde.

L_{eff} : Longueur effective.

Γ : Coefficient de réflexion.

S_{11} : Coefficient de réflexion à l'entrée lorsque la sortie est adaptée

S_{12} : Coefficient de transmission inverse lorsque l'entrée est adaptée

S_{21} : Coefficient de transmission direct lorsque la sortie est adaptée

S_{22} : Coefficient de réflexion à la sortie lorsque l'entrée est adaptée

Liste des figures

CHAPITRE I :

FIGURE I-1: Diagramme de rayonnement	5
FIGURE I-2: Représentation de l'impédance d'antenne	7
FIGURE I-3: Type de polarisation	7
FIGURE I-4: Illustration de la bande passante a -10 dB à partir du coefficient de réflexion.....	8
FIGURE I-5: Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.....	9

CHAPITRE II:

FIGURE II-1: l'analyseur de réseaux vectoriel 3.2 GHz PROTEK A333	2
FIGURE II-2: une source RF et un multi-pôle.....	3
FIGURE II-3 : les erreurs systématiques de calibration	4
FIGURE II-4: Quadripôle et paramètre S	5
FIGURE II-5: Vue avant de l'analyseur de spectre FS300 (9 KHz-3 GHz) disponible au laboratoire du département de génie électrique.	7
FIGURE II-6: analyseurs à balayage de fréquence à plage de fréquences de 9 kHz à 3,2 GHz	8
FIGURE II-7: Analyseurs de spectre en temps réel jusqu'à 26,5 GHz selon le modèle.....	8

CHAPITRE III:

FIGURE III-1: schéma géométrique d'un dipôle élémentaire	23
FIGURE III-2: Schéma géométrique d'un dipôle court.....	24
FIGURE III-3: schéma représente une antenne demi-onde.....	25
FIGURE III-4: Fonctionnement électrique du dipôle.....	26
FIGURE III-5: une antenne monopole.....	27
FIGURE III-6: Antenne Yagi 800 - 960 MHz, 13 dBi.....	28
FIGURE III-7: Fonctionnement de l'antenne Yagi.....	28
FIGURE III-8: Le rapport Avant-arrière d'une antenne yagi.....	30
FIGURE III-9: antenne dipôles log-périodique.....	30
FIGURE III-10: coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne yagi	30
FIGURE III-11: les coefficients S_{11} et S_{21} d'antenne dipôle log-périodique selon le VNA.....	32
FIGURE III-12 : Le spectre de fréquence affiché sur l'analyseur de spectre R&S®FS300 branché à une antenne Yagi raisonnant à 2.45 GHz.....	33
FIGURE III-13: antenne dipôle $\lambda/2$ de $f_r = 1.8$ GHz.....	34
FIGURE III-14: Coefficient S_{11} de l'antenne dipole.....	34
FIGURE III-15: Paramètre s_{21} de l'antenne dipôle VNA.....	36

FIGURE III-16: la position de deux dipôles et la distance entre eux pendant le lut du paramètre S au niveau de VNA	36
FIGURE III-17: le pic de fréquence de la voie montante $f= 1710\text{MHz}$	37
FIGURE III-18 : le pic de fréquence de la voie descendante $f=1.82 \text{ GHz}$	38
CHAPITRE IV:	
FIGURE IV-1: Schéma générale d'une antenne patch	43
FIGURE IV-2: Structure et dimensions d'antenne patch.....	44
FIGURE IV-3: Divers types d'élément rayonnants	45
FIGURE IV-4: L'antenne patch réalisée au laboratoire raisonnant à 2.5 GHz et ces dimensions	48
FIGURE IV-5: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch raisonnant à 2.5 GHz.	49
FIGURE IV-6: Position des deux antennes patch et la distance entre eux pendant l'analyse par le VNA.....	49
FIGURE IV-7: Les paramètres S_{21} et S_{11} de l'antenne patch mesurés à partir du VNA PROTEK A33.....	50
FIGURE IV-8: Structure d'antenne PIFA.....	51
FIGURE IV-9: Coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne PIFA.....	53
FIGURE IV-10: la position de deux antennes PIFA et dipôle log- périodique et la distance entre eux pendant l'analyse au niveau de VNA	54
FIGURE IV-11: le paramètre S_{21} selon le VNA.....	55
FIGURE IV-12: les bandes de fréquence captée par l'antenne PIFA (analyseur de spectre).....	56

Liste des tableaux

TABLE III-1 La variation du gain de dipôle en fonction de sa longueur	26
TABLE III-2 : la variation du gain de l'antenne yagi en fonction de sa longueur λ	29

Introduction Générale

Le but de ce projet de fin d'étude de master en télécommunications est de caractériser les antennes, d'une part, ainsi que mesurer la densité de puissance du champ électromagnétique RF présent dans le milieu ambiant. Le cahier de charge consiste à atteindre la finalité suivante : Préparer des manipulations pratiques et des fascicules de travaux pratiques qui leur sont dédiés de la matière : Antennes et canaux de transmission. Le but est donc de faire comprendre aux apprenants, loin de simulations abstraites, les caractéristiques spécifiques du rayonnement électromagnétique dans les hautes fréquences ainsi que les appareils de mesure requis pour la réception de la puissance EM captée par des antennes de différents types et ceci dans un environnement réel.

Pour réaliser ce projet, il nous a fallu d'apprendre deux grands concepts qui sont dépendants : 1/ La théorie des antennes filaires et imprimées et leur dimensionnement et fabrication pratique et 2/ Le principe de fonctionnement et le mode d'utilisation de deux appareils de mesure indispensables dans un laboratoire micro-onde , à savoir l'analyseur de réseau vectoriel (VNA pour Vector Network Analyzer) et l'analyseur de spectre (SA).

Lorsqu'il s'agit d'une chaîne de communication radio ou encore appelée hertzienne ou sans fils, les antennes constituent des éléments essentiels car incontournables. Elles sont situées à l'interface entre les signaux véhiculés dans l'électronique de l'émetteur ou du récepteur et le milieu de propagation. Toutefois, de nombreuses technologies d'antenne existent et répondent à la plupart des besoins pour les communications en bande étroite ou modérée. En large bande se posent des problèmes nouveaux, liés aux fondements de l'électromagnétisme qui constituent des limitations en termes de bande passante, de réponse impulsionnelle, de taille ou de rendement.

La faible consommation (le rendement), la facilité d'intégration, et surtout le coût sont des aspects essentiels qui sont à considérer en plus des performances relatives au fonctionnement sur terrain.

Plusieurs exemples d'antennes de base et une antenne PIFA plus ou moins avancée sont présentées dans ce mémoire de fin d'étude. Les principes de fonctionnement, les structures, les caractéristiques, les performances typiques et quelques formules basiques pour le dimensionnement sont présentés. Bien que les antennes filaires et les antennes imprimées sont des antennes les plus courantes car les plus simples et les moins onéreuses, leurs performances sont parfois limitées et il est nécessaire de concevoir des éléments rayonnants plus complexes pour obtenir des bandes passantes plus importantes et des meilleurs gains. Comme il est connu dans le domaine, le développement des applications sans fils embarquées et mobiles augmentent l'exigence en termes de miniaturisation des antennes et donc l'exploitation du spectre micro-onde.

Le reste du manuscrit est organisé comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré aux rappels sur les caractéristiques générales des antennes à savoir: Diagramme de rayonnement, angle d'ouverture, directivité et gain théorique, polarisation et adaptation. Les différents types d'antenne les plus utilisées en RF sont également présentés.

Le chapitre II est dédié à la description du principe de fonctionnement de l'analyseur de réseau vectoriel et de l'analyseur de spectre et leur utilité dans la caractérisation des antennes et les mesures des puissances radiofréquences (RF) ambiantes.

Dans les deux derniers chapitres (3 et 4) nous présentons les caractérisations et les mesures effectuées sur des antennes filaires et imprimées, en utilisant les deux instruments de mesure suivants : L'analyseur de réseau vectoriel (VNA) PROTEK A333 fonctionnant dans la bande [300 MHz – 3.2 GHz] et permettant la mesure des paramètres S, et l'analyseur de spectre R&S®FS300 (9 KHz-3 GHz) permettant de mesurer la puissance captée par chacune des antennes disponibles dans leur bande de fréquence de fonctionnement. Ceci permet de déduire la densité de puissance présente dans le milieu environnant. Il est à rappeler que les tests expérimentaux étaient menés dans le laboratoire de recherche Signaux et Systèmes LSS.

Enfin, nous concluons le mémoire par présenter des conclusions et recommandations pour les projets futurs.

Une annexe contenant six fascicules de travaux pratiques sur la caractérisation des antennes : Dipôle, Yagi, patch, Pifa et patch large bande est fournis à la fin de ce document.

C

HAPITRE I

Généralités sur les antennes

I.1 Introduction

Afin de comprendre le principe de fonctionnement des antennes il faut passer par deux étapes : La première partie revient sur la définition et les notions de base d'électromagnétisme afin de mieux comprendre le principe de rayonnement électromagnétique et propagation; la seconde partie, qui est considérée dans ce chapitre, concerne les caractéristiques principales d'une antenne, à savoir : Fréquence de résonance, bande passante , gain, directivité, diagramme de rayonnement,...etc. En fonction de ces caractéristiques, nous procédons à la classification de principaux types d'antennes que ce soit en termes de structure (antennes filaires, antennes imprimée, antennes à ouvertures, ...etc.) ou propriété de rayonnement (antennes directives, antennes omnidirectionnelles, antennes à large bande et à bande étroite,...etc.)

I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique (EM) en émission et vis versa en réception afin d'assurer la transmission analogique des signaux. On peut les qualifier comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

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

Réciproquement, à la réception l'antenne capte et transmet l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur [1]. Il s'agit d'une conversion de l'énergie EM libre en énergie EM guidée à travers le câble.

I.2.1 Caractéristiques de l'antenne spatiale

Les caractéristiques de rayonnement visées sont utiles pour le dimensionnement des systèmes antennaires. Le rôle d'une antenne dans un système de communication sans fils est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance. Un grand nombre de caractéristiques permettent de grouper les antennes tels que le gain, le diagramme de rayonnement, le coefficient de réflexion, le rendement, etc.

I.2.1.1 Coefficient de Réflexion

Le coefficient de réflexion donne le transfert d'énergie par l'antenne (l'adaptation de l'antenne) qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation suivante :

$$S_{11} = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} \quad (\text{I.1})$$

Z_c : est l'impédance de normalisation, en générale égale à 50Ω .

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

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log_{10} S_{11} \quad (\text{I.2})$$

I.2.1.2 Diagramme de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique.

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$ qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Fig.1). En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0 + \varphi_0)} \quad (\text{I.3})$$

φ : Puissance rayonnée dans une direction quelconque

φ_0 : Puissance rayonnée max

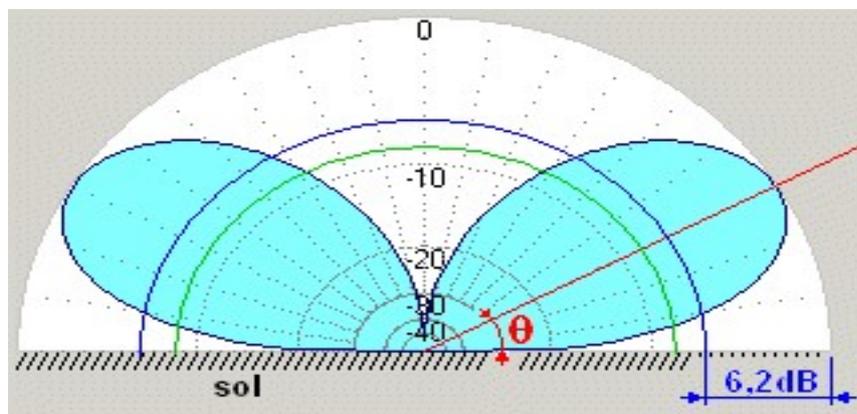


Figure I.1 : Diagramme de rayonnement [1] .

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est principalement relié à sa géométrie mais peut aussi varier avec la fréquence. Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. Dans ce cas, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à 1 quel que soit la direction considérée. On parle d'une antenne isotrope. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée de rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer [2].

I.2.1.3 Directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope.

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

I.2.1.4 Gain

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

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \quad (I.5)$$

P_A : La puissance d'alimentation.

I.2.1.5 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme le rapport entre la tension et le courant aux terminaux de l'antenne ou comme le rapport entre les composantes appropriées des champs électriques et magnétiques. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne Z_{ant} se décompose en une partie réelle R_{ant} et une partie imaginaire X_{ant} et s'écrit comme suit :[3]

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (I.6)$$

$Z_{ant} =$ impédance caractéristique de ligne d'alimentation

La partie réelle de l'impédance R_{ant} regroupe une partie due aux pertes ohmiques et diélectriques des matériaux et la résistance de rayonnement de l'antenne et elle s'écrit comme suit :

$$Z_{ant} = R_{ray} + R_{perts}$$

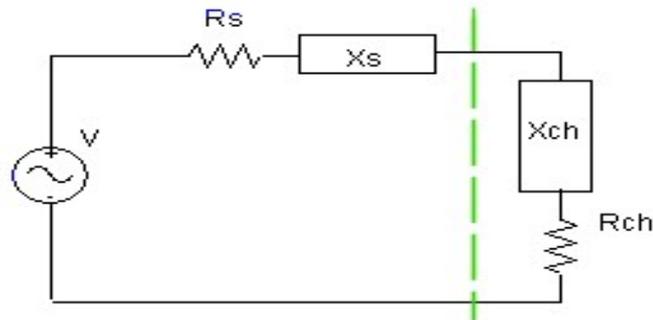


Figure I .2: Représentation de l'impédance d'antenne [3].

I.2.1.6 Polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée. Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique.

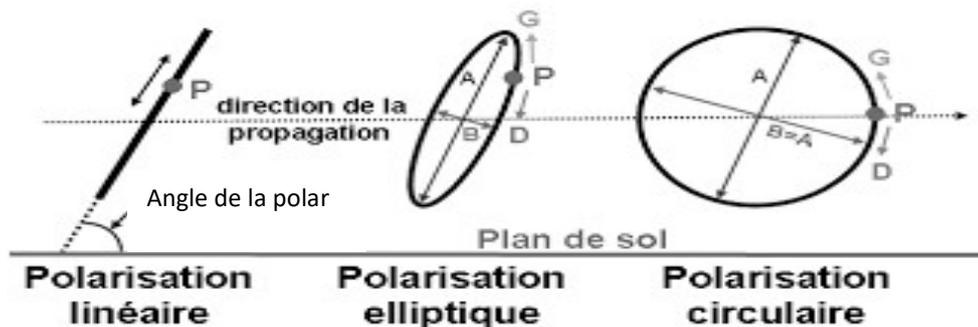


Figure 1 .3: Types de polarisation [4].

I.2.1.7 Bande passante

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

vers le récepteur) est supérieur à un seuil. On parle alors de bande passante absolue, est donnée par : $D_f = f_2 - f_1$

On déduit souvent la bande passante d'une antenne à partir de la courbe de son coefficient de réflexion. Certains critères typiques sont pris comme un coefficient de réflexion inférieur à -6 dB ou à -10 dB. Souvent, on l'exprime en termes de bande passante relative par rapport à la fréquence centrale comme illustré dans la Figure I.4 [5].

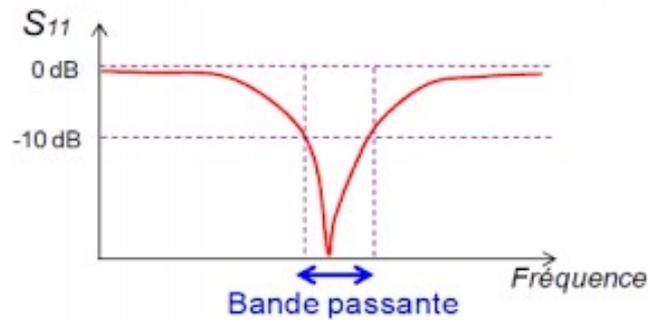


Figure I.4: Illustration de la bande passante à -10 dB à partir du coefficient de réflexion [5].

I.2.1.8 Rendement

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_A sous forme de puissance rayonnée P_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations (I-4) et (I-5), on voit que le rendement relie le gain et la directivité :

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow \eta = \frac{P_{ray}}{P_a} \quad (I.6)$$

$$G = \eta \cdot D \quad (I.7)$$

I.2.1.9 Adaptation

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (en général, $Z_c = 50 \Omega$). Pour assurer un transfert maximal de puissance entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. L'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion Γ_{in} ou S_{11} en entrée de l'antenne.[6]

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \quad (I.8)$$

Z_{ant} : L'impédance d'entrée de l'antenne

Z_c : L'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation

Le coefficient de réflexion est Généralement exprimé en dB : $S_{11} = 20\log_{10}(S_{11})$. La condition d'adaptation est donc la suivante :



I.2.1.10 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB notée $2\theta_3$ représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal [6].

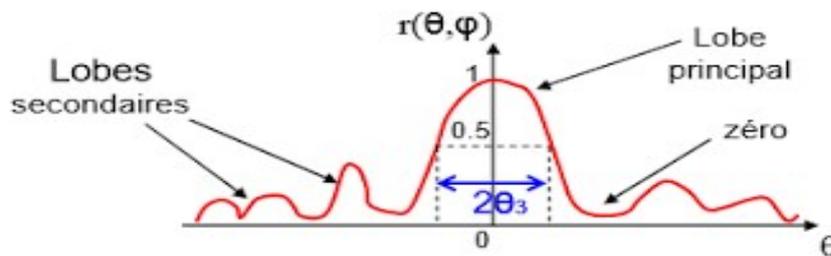


Figure I.5 : Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes [6] .

I.3 Rôles d'une antenne

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants [7]:

a. Antenne d'émission : afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer l'onde guidée issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens c'est un transducteur.

b. Antenne de réception : La puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparait comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme.

c. Réciprocité : Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non-linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas [8].

I.4 Différents types d'antennes [9]

I.4.1 Antennes filaires

Les antennes filaires comprennent des modèles comme les antennes dipôles, monopoles, boucles résonnantes, Yagi, hélices et plus encore. Cette grande famille compte les antennes relativement simples.

I.4.2 Antennes à fentes

L'antenne à fentes est le modèle de prédilection pour la conception d'antennes de systèmes de sécurité comme celles des radars micro-ondes utilisés pour la surveillance maritime.

I.4.3 Antennes planaires

L'antenne planaire est encore appelée antenne à patch, C'est le modèle le plus utilisé pour la conception des systèmes GSM et réseaux de téléphones portables en général, GPS, Wifi et Wi MAX.

I.4.4 Antennes paraboliques

C'est le modèle que la plupart des particuliers abonnée aux chaînes télé connaissent L'antenne parabolique a la forme d'une cuvette avec au centre de sa face concave une antenne rudimentaire. Elle appartient à la famille des antennes à ouverture.

I.4.5 Antennes à cornet

L'antenne à cornet est une antenne un peu spéciale à cause de son apparence en cône plus ou moins cylindrique. Elle a généralement la forme d'un gros entonnoir ou d'une pyramide inclinée à base ouverte. Cette antenne est aussi à ouverture et elle est utilisée en émission pour tracer le diagramme de rayonnement.

I.5 Domaines d'application des antennes

Les principales applications de ces éléments rayonnants sont :

- Communications par satellites
- Antennes pour l'aéronautique
- Téléphone mobiles
- Antennes pour le biomédical
- Objets communications

I.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de revenir sur certaines notions fondamentales relatives aux propriétés des antennes.

En résumé, la théorie des antennes est basée sur le rayonnement produit par des sources (charges, courants) à la surface d'un conducteur. Quand on veut décrire le fonctionnement d'une antenne particulière, certaines caractéristiques fondamentales, communes à tous les types d'antennes, doivent être rigoureusement prises en considération à savoir : Le diagramme de rayonnement, le gain, la polarisation, la fréquence de résonance et la bande passante, la directivité, le rendement et l'ouverture à -3dB . Cette dernière différencie les antennes omnidirectionnelles des antennes directionnelles.

Chapitre II

Principe de fonctionnement de l'analyseur de réseaux vectoriels et de l'analyseur de spectre

II.1 Introduction

Au domaine des communications, il existe des appareils qui permettent de faire des mesures sur les grandeurs récurrentes notamment au niveau des ondes telles que les fréquences et amplitudes ainsi qu'au niveau des signaux comme l'intensité, la tension et l'énergie. Cependant, à très hautes fréquences, ces grandeurs ne sont pas toujours facilement mesurables. Est-ce qu'il y a d'autres appareils de mesure pour atteindre cette finalité?

Dans ce contexte, le présent chapitre se focalise sur la description et l'explication du principe de fonctionnement de deux appareils de mesure de très grande importance à savoir : L'analyseur de réseaux vectoriels (ou VNA pour « Vector Network Analyzer ») et l'analyseur du spectre (spectrum analyzer). Ces deux dispositifs sont indispensables dans les laboratoires micro-ondes, en particulier pour notre thématique qui s'intéresse à la caractérisation des antennes.

II.2 L'analyseur de réseaux vectoriels

II.2.1 Définition de VNA

Un analyseur de réseau est un instrument de mesure comme montré sur la Figure II.1 ci-dessous. Cet analyseur permet de déterminer les paramètres S d'un circuit électrique. Les analyseurs de réseau les plus avancés mesurent également d'autres paramètres, tels que les paramètres Y, Z et H. Le VNA est généralement utilisé pour caractériser des quadripôles (tels que des amplificateurs ou des filtres), mais peut être utilisé sur d'autres réseaux (notamment avec un plus grand nombre de pôles), en plus de son utilisation dans la fabrication des lignes de transmission et les antennes. En fait, un analyseur de réseau est généralement utilisé dans le domaine des radiofréquences pour caractériser les filtres, les câbles et les antennes et permet aussi de tracer le nomogramme de Smith (ou abaque de Smith) du réseau étudié [10].



Figure I.1 : Vue avant de l'analyseur de réseaux vectoriels 3.2 GHz PROTEK A333 disponible au laboratoire du département de génie électrique.

II.2.2 Domaines d'utilisation

Les analyseurs de réseaux vectoriels sont utilisés dans les domaines de radiofréquences et micro-ondes. Ils déterminent le comportement des composants d'un circuit permettent de caractériser chaque dipôle et/ou quadripôle comme on l'a mentionné plus avant. L'analyseur de réseaux vectoriels est outil indispensable dans de nombreuses industries et applications, notamment dans les chaînes de vérification ainsi qu'en métrologie. C'est un outil sophistiqué et coûteux qui mesure, entre autres, les ondes transmises et réfléchies sur un appareil afin de déterminer ses paramètres S.

II.2.3 Fonctionnement

Pour mesurer les paramètres S d'un multi-pôle, nous avons tout d'abord besoin de comprendre de quelle manière circulent les ondes et par quels moyens on peut les mesurer. Le schéma ci-dessous illustre la transmission des ondes dans un élément à mesurer.

On y distingue une source radiofréquences (RF) et un multi-pôle dont on ne connaît pas la nature comme affiché sur la Figure II .2.

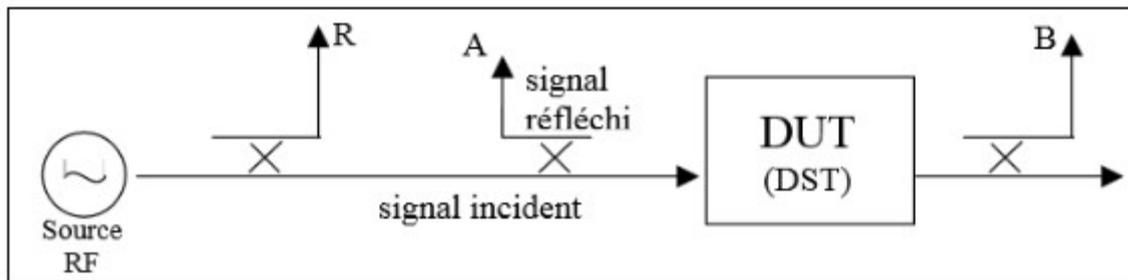


Figure II.2: Une source RF et un multi-pôle [7].

La source RF émet un signal qui sera divisé en deux parties : L'une servira de référence (R), l'autre traversera dans l'appareil à mesurer. A l'aide d'un coupleur, nous pouvons dériver le signal réfléchi (A) ainsi que le signal transmis (B).

Grâce à ces ondes que nous allons pouvoir mesurer les paramètres S avec les formules suivantes:

$$S_{11} = A/R \text{ et } S_{12} = B/R \quad (\text{II .1})$$

On notera que pour obtenir les deux autres paramètres, il faudra retourner les dispositifs sous test (DUT « devices under test ») afin de placer la source RF sur l'accès 2 [11].

II.2.4 Calibration [11]

Les mesures effectuées par les analyseurs de réseaux comportent des erreurs qui peuvent être corrigées selon les cas rencontrés. On distingue trois catégories d'erreurs qui sont :

- les erreurs systématiques : Elles sont dues aux imperfections de l'analyseur et elles sont corrigibles numériquement,
- les erreurs aléatoires : Dues au bruit interne des composants, et donc ne peuvent pas être corrigées,
- les erreurs de dérive : causées par les variations de température et l'utilisateur, elles sont corrigibles numériquement.

Il y a 6 erreurs systématiques qui sont les suivantes (Figure II.3):

- Directivité
- Diaphonie
- Désadaptation de la source
- Désadaptation de la charge
- Réponse fréquentielle du détecteur en réflexion
- Réponse fréquentielle du détecteur en transmission

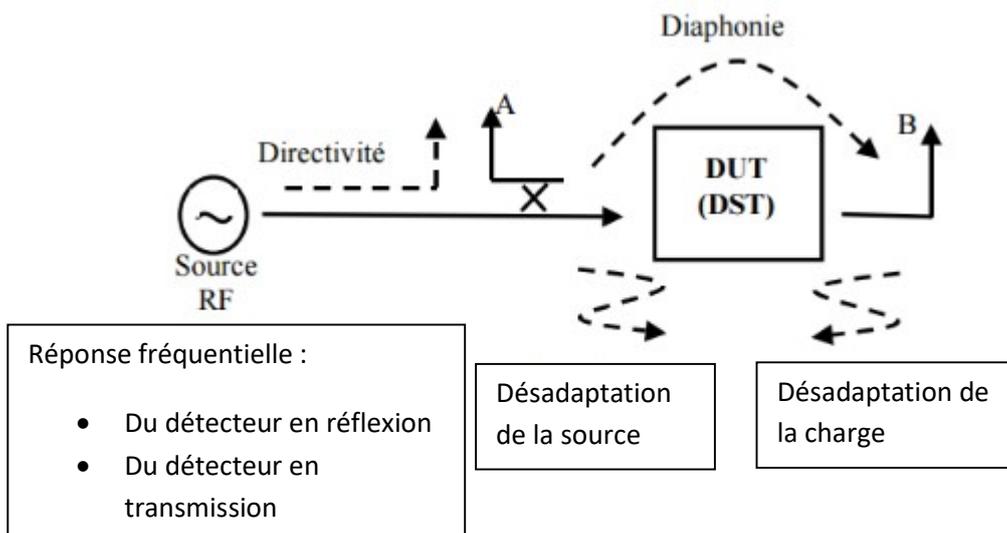


Figure II.3 : Les erreurs systématiques de calibration [7].

Pour corriger les erreurs systématiques, il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'étalonnage qui permettent de calibrer l'analyseur de réseaux vectoriel.

II.2.5 Paramètres S

Afin de simplifier les mesures on associe à chaque multi-pôle et aux ondes qui le traversent les paramètres S. Ces derniers permettent de calculer des grandeurs comme la puissance, le gain, l'atténuation, le facteur de réflexion et l'impédance. L'intérêt pratique est donc considérable puisque c'est aussi presque exclusivement des optimisations de transfert de puissance qui sont recherchées dans les systèmes hyperfréquences [12].

Le quadripôle suivant de la Figure II.5 est représenté avec les ondes incidentes (a_1 et a_2) et les ondes réfléchies (b_1 et b_2) :

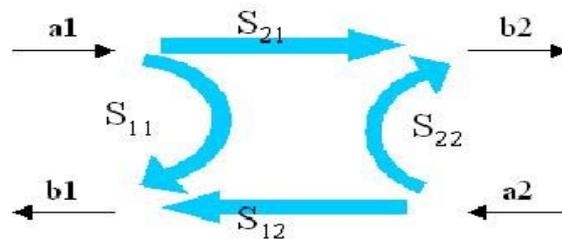


Figure II.5: Quadripôle et paramètres S [8].

Ce quadripôle nous permet de définir les relations suivantes, le liant aux ondes qui le traversent :

- $b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$
- $b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$
- S_{11} : Coefficient de réflexion à l'entrée lorsque la sortie est adaptée
- S_{12} : Coefficient de transmission inverse lorsque l'entrée est adaptée
- S_{21} : Coefficient de transmission direct lorsque la sortie est adaptée
- S_{22} : Coefficient de réflexion à la sortie lorsque l'entrée est adaptée

Dans le cas où $a_2 = 0$, cela signifie que l'accès 2 du quadripôle est adapté, alors : $S_{11} = b_1/a_1$ est le coefficient de réflexion vu à l'accès 1 et $S_{21} = b_2/a_1$ est le coefficient de transmission de l'accès 1 à l'accès 2.

Si $a_1 = 0$, cela signifie que l'accès 1 du quadripôle est adapté, alors le coefficient $S_{22} = b_2/a_2$ est le coefficient de réflexion vu sur l'accès 2 et $S_{12} = b_1/a_2$ est le coefficient de transmission de l'accès 2 vers l'accès 1.

Ces coefficients sont généralement écrits sous forme de matrice, appelée la matrice [S] du multi-pôle [12].

II.2.6 Caractéristique du VNA 3.2 GHz PROTEK A333 [13]

- Gamme de fréquence \Rightarrow 300 KHz à 3.2 GHz.
- Impédance \Rightarrow 50 Ω (75 Ohm).
- Test ports \Rightarrow 2 \times type N.
- Précision en fréquence \Rightarrow +/- 5ppm.
- Résolution en fréquence \Rightarrow 1MHz.
- Nombre de points de tests \Rightarrow 2 à 10001.
- Temps de mesure par point \Rightarrow 125 μ s.
- If Band-width \Rightarrow 1 MHz à 30 KHz.
- Dynamique de mesure IF BW 10Hz \Rightarrow 2 à 3200 Mhz > 125dB.
- Test port output \Rightarrow -45 à +10dBm.
- Précision \Rightarrow inférieure à 1 .0 dB.
- Résolution \Rightarrow 0.05 dB.
- Ecran 10.4 TFT couleur, tactile.
- Disque dur.
- Interfaces RS 232, 2 \times USB, LAN, Imprimante, vidéo, clavier /souris.
- Dimensions \Rightarrow 426 \times 266 \times 300 mm.

II.3 L'analyseur de spectre

II.3.1 Définition

Un analyseur de spectre est un instrument de mesure destiné à afficher un signal dans le domaine fréquentiel contrairement à un oscilloscope qui affiche le signal dans le domaine temporel (Figure II.6). Les signaux peuvent être de natures diverses : Electrique, optique, sonore, radioélectrique. Toutefois, comme pour les oscilloscopes, il existe différents types d'analyseurs de spectre disponibles en fonction des besoins et du budget de chacun [14].

L'objectif principal est donc de déterminer les fréquences contenues dans le signal et avec quelles puissances.

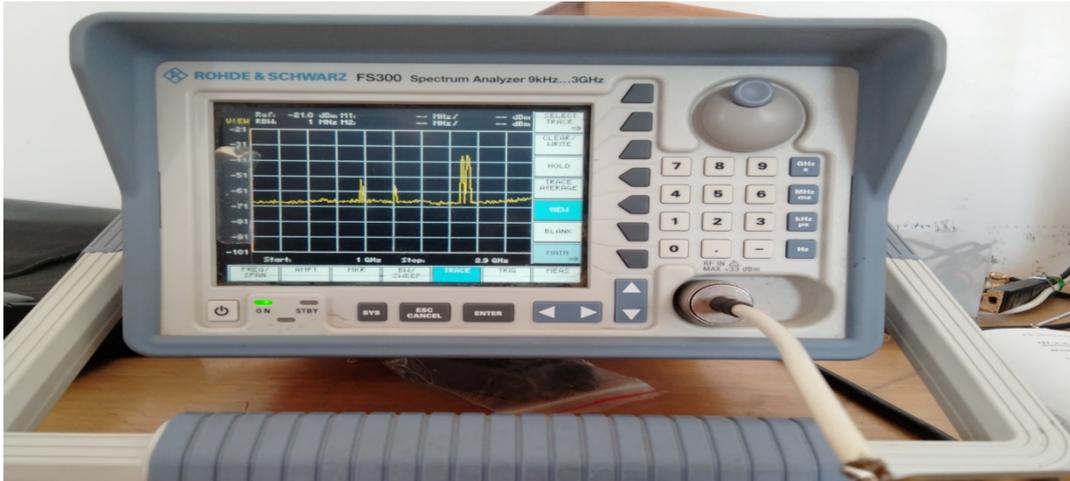


Figure II.6: Vue avant de l'analyseur de spectre R&S®FS300 (9 KHz-3 GHz) disponible au laboratoire du département de génie électrique.

II.3.2 Domaines d'utilisation

Son utilisation principale est de mesurer la puissance du spectre de signaux connus et inconnus. » En d'autres termes, un analyseur de spectre permet aux utilisateurs d'analyser un spectre, c'est à dire de déterminer les composantes fréquentielles présentes dans le signal capté et leur importance en termes de puissances reçues.

II.3.3 Types d'analyseurs de spectre en termes de technologies et formats

Il existe deux catégories principales d'analyseurs de spectre : les analyseurs à balayage de fréquence et les analyseurs en temps réel, également appelés analyseurs de spectre en temps réel ou RTSA (Real-time Spectrum Analyzer). Utilisés depuis de nombreuses années, ces deux types affichent l'amplitude sur l'axe vertical et la fréquence sur l'axe horizontal, mais ce qui les distingue, c'est leur manière d'analyser un spectre [14].

II.3.3.1 Analyseurs à balayage de fréquence :

Étant donné qu'un analyseur de spectre à balayage de fréquence est « tout simplement un voltmètre à sélection de fréquence avec une plage de fréquences réglée). Ces analyseurs traditionnels sont utilisés par la communauté des ingénieurs responsables de la conformité depuis des dizaines d'années [14]. La Figure II.7 en montre un exemple.



Figure II.7 : Analyseurs à balayage de fréquence à plage de fréquences de 9 KHz à 3,2 GHz [9].

II.3.3.2 Analyseurs en temps réel :

Contrairement aux analyseurs de spectre à balayage de fréquence, les analyseurs de spectre en temps réel peuvent évaluer toutes les fréquences simultanément. Un analyseur de spectre en temps réel fonctionne en acquérant tout d'abord des données dans le domaine temporel, puis en les convertissant dans le domaine fréquentiel grâce à la transformation de Fourier rapide (FFT) [15]. Le modèle de la Figure II.6 disponible au laboratoire appartient à cette catégorie.

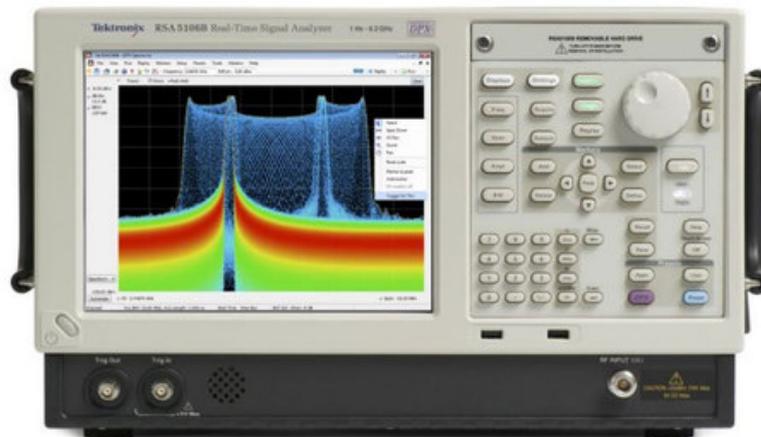


Figure II.8 : Analyseurs de spectre en temps réel jusqu'à 26.5 GHz [10].

II.3.4 Classification par type de mesure [16]

II.3.4.1 Analyseur de spectre électrique :

Un analyseur de spectre électrique permet la mesure de la tension de signaux électriques dans le domaine fréquentiel. Les mesures peuvent aller de quelques dixièmes de Hz à plusieurs centaines de GHz.

II.3.4.2 Analyseur de réseau :

Un analyseur de réseau est un analyseur de spectre électrique équipé d'un générateur de signaux, permettant ainsi l'analyse fréquentielle des lignes de transmission. Cependant il ne permet pas d'analyser les réseaux sans fils.

II.3.4.3 Analyseur de champ électromagnétique :

- **Spectromètre :**

Un spectromètre est un analyseur de spectre de signaux optiques, il est utilisé en chimie pour identifier la composition physique de matériaux.

- **Spectrogramme :**

Un spectrogramme est un analyseur de spectre audio en fonction du temps. Il représente en abscisse le temps, en ordonnée les fréquences. La couleur de chaque point ainsi obtenu dépend de la puissance dans une bande de fréquence et à un instant donné.

II.3.5 Caractéristique de l'analyseur de spectre du laboratoire : Le R&S®FS300 [17]

- Plage de fréquence \Rightarrow de 9KHz à 3GHz
- Bande passante de résolution (-3 dB) \Rightarrow 200Hz à 1MHz
- Large bande passante vidéo \Rightarrow 10Hz à MHz
- Niveau de bruit moyen affiché \Rightarrow <-110dBm, typ -115 dBm(300Hz)
- Intermodulation – gamme libre \Rightarrow <-70dBc à -36dBm niveau d'entrée
- Bruit de phase SSB, décalage de 10 KHz \Rightarrow -90dBc (1 Hz)
- Incertitude de niveau \Rightarrow <1.5 dB, typ 0.7dB

II.4 Conclusion

La description qui on a vue dans ce chapitre sur les deux appareils de mesure le VNA et l'analyseur de spectre, arrive comme suite :

Notre étude menée sur les appareils de mesure dans le domaine de micro-ondes nous a permis d'être plus conscient de besoin crucial de dispositifs de mesure dans les télécommunications. Le choix des caractéristiques dépend en grande partie du domaine d'application et donc de la bande passante.

Vu l'importance de calcul des paramètres S dans le domaine des canaux de transmissions et les dispositifs RF et micro-onde, l'analyseur de réseaux vectoriels s'avère indispensable afin de mesurer ces coefficients et d'autres valeurs caractéristiques. La caractérisation d'un composant passe par trois grandes étapes. Tous d'abord, l'étalonnage qui permet de définir une

référence pour les mesures à viennent, puis les mesures du matériel et enfin le calcul des résultats.

L'analyseur de spectre, quant à lui, permet d'afficher le spectre de fréquences du signal mesuré. En se servant d'une antenne, cet analyseur est capable de visualiser les fréquences des émetteurs RF actifs ambiants avec leurs puissances respectives dans la limite de la bande passante de l'appareil. Toutefois, comme pour les oscilloscopes, il existe différents types d'analyseurs de spectre disponibles en fonction des besoins en premier lieu puis du budget associé.

C

HAPITRE III

Caractérisation des antennes filaires

III.1 Introduction

Par définition, la catégorie des antennes filaires regroupe l'ensemble des antennes formées d'une structure de câble conducteur de diamètre faible où l'on considérera des densités linéiques de courant. Les antennes de base sont : les dipôles, les monopôles, antenne Yagi ...

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord quelques notions d'ordre théorique sur cette catégorie d'antennes avant d'effectuer une procédure complète de caractérisation pratique d'une antenne Yagi fonctionnant autour de Wi-Fi en plus d'une antenne dipôle demi-onde réalisé au laboratoire qui résonne à une fréquence $f_r=1.8$ GHz. Cette caractérisation est basée sur l'utilisation du VNA et de l'analyseur de spectre décrits en détails en Chapitre 2

III.2 Antenne dipolaire

L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, tirée courts et reliés chacun à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire. En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. A la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur [18].

III.2.1 Types d'antennes dipolaires

Il y'a plusieurs type de l'antenne dipolaire par exemple : dipôle élémentaire, dipôle court et dipôle demi-onde.

III.2.1.1 Dipôle élémentaire

Un dipôle élémentaire (Figure III.1) est une petite longueur $\delta\ell$ de conducteur (petite devant la longueur d'onde λ) dans lequel circule un courant alternatif :

$$I = I_0 e^{j\omega t} \quad (\text{III.1})$$

Avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation, et f la fréquence du courant d'alimentation.

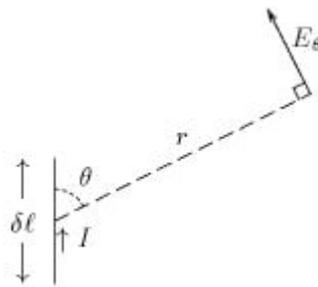


Figure III.1: Schéma géométrique d'un dipôle élémentaire [11].

Il faut remarquer que ce type de dipôle ne peut être fabriqué pratiquement .il faut bien que le courant vienne de quelque part et qu'il sorte quelque part. L'intérêt est que l'on peut calculer facilement le champ électrique lointain de l'onde électromagnétique émise par ce petit bout de conducteur.

Si la distance de mesure du champ est beaucoup plus grand que la longueur d'onde, elle-même plus grand que la longueur du l'expression du champ électrique lointain (en V/m) :

$$E_0 = \frac{jI_0 \sin\theta \delta\ell}{2\epsilon_0 c r \lambda} e^{j(\omega t - k r)} \quad (\text{III.2})$$

Ou :

- $r \gg \lambda \gg \delta\ell$,
- ϵ_0 est la constante de la permittivité du vide ;
- c est la constante de la vitesse de la lumière dans le vide (en m /s) ;
- r est la distance (en m) entre le dipôle le point ou le champ E_0 est évalué ;
- $\delta\ell$ est la longueur (en m) ;
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde (en rad /m) ;
- L'exposant de e rend compte de la variation de phase du champ électrique de l'onde avec le temps et avec la distance au dipôle

Le champ électrique lointain E_0 de l'onde électromagnétique est coplanaire avec le conducteur, il est aussi perpendiculaire à la ligne qui relie le point ou il est évalué au conducteur son orientation étant déterminée par celle du champ dans le conducteur et par le déphasage dépendant de la distance du point de mesure à ce conducteur [18].

III.2.1.2 Dipôle court

Un dipôle court est un dipôle réalisable pratiquement formé par deux conducteurs de longueur totale L très petite comparée à la longueur d'onde λ . La Figure III.2 montre le schéma géométrique d'un dipôle court.

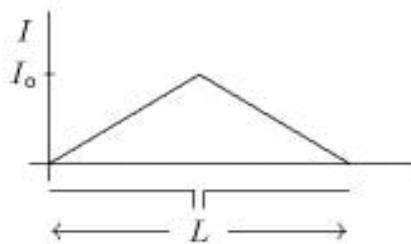


Figure III.2: Schéma géométrique d'un dipôle court [11].

Les brins parallèles sont traversés par des courants circulant en direction opposée, dont les champs électriques s'annulent mutuellement à distance suffisamment grande par rapport à leur distance mutuelle entre les deux brins.

On prend comme hypothèse que le courant est maximum au milieu du dipôle ou se concentrent les charges électriques déplacées par le courant alternatif. Le champ lointain E_0 de l'onde électromagnétique rayonnée par ce dipôle est alors [18]:

$$E_0 = \frac{-jI_0 \sin\theta L}{4\epsilon_0 cr\lambda} e^{j(\omega t - kr)} \quad (III.3)$$

À partir de ce champ électrique on peut calculer la puissance totale émise par ce dipôle et à partir de ça, calculer la partie résistive de l'impédance série de ce dipôle [19]:

Pour $L < \lambda$

$$R_{série} = 80\pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \quad (III.4)$$

Mais en revanche :

$$R_{série} = 20\pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \quad (III.5)$$

Le gain de cette antenne (obtenu en remplaçant dans l'expression générale du gain) est :

$$G = \frac{\pi \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2}{E_0 c \frac{2\pi}{3E_0 c} \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2} = 1,5 = 1,76 \text{ dBi} \quad (III.6)$$

III.2.1.3 Dipôle demi-onde

L'antenne dipôle demi-onde (Figure III.2) correspond au cas particulier d'une longue antenne filaire linéaire utilisée à sa fréquence de résonance. Cette antenne est utilisée pour grand nombre d'application sur les bandes VHF et UHF.

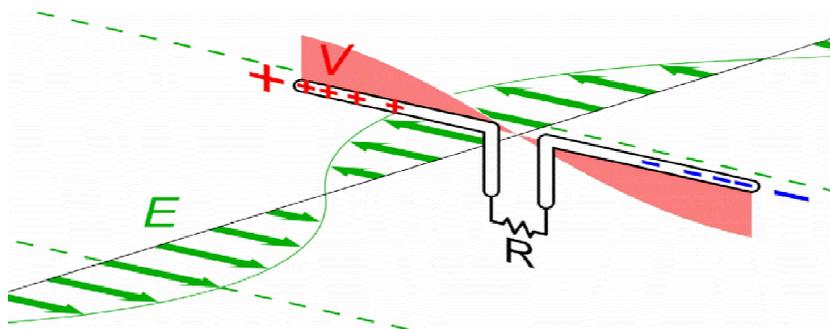


Figure III.3 : Schéma représentant une antenne demi-onde [12].

Un dipôle demi-onde est constitué de 2 tiges cylindriques connectées à une source d'excitation. Son nom vient du fait qu'on utilise cette antenne à sa résonance demi-onde, c'est-à-dire pour travailler autour d'une fréquence où la longueur de l'antenne est égale à la moitié de la

longueur d'onde qui est la forme la plus simple de dipôle résonant avec une directivité maximale obtenue est de 1,64 soit 2,15 dBi ou 0 dBd [20]. Pour rappel : 1 dBd = 1 dBi - 2.14.

III.2.2 Fonctionnement électrique du dipôle

Les fils constituent des selfs en série avec la capacité qui existe entre les deux brins du dipôle. Nous avons donc un circuit résonant série dont l'amortissement est principalement dû à la résistance de rayonnement. Cela veut dire qu'il existe aux abords du dipôle un fort champ réactif. Mais celui-ci ne produit pas de rayonnement lointain. Ce modèle série est valable pour la fréquence de résonance et en dessous (antennes raccourcies). Pour les fréquences supérieures, cela se complique. Le dipôle est représenté par un fil de longueur multiple de $\frac{\lambda}{2}$ [20].

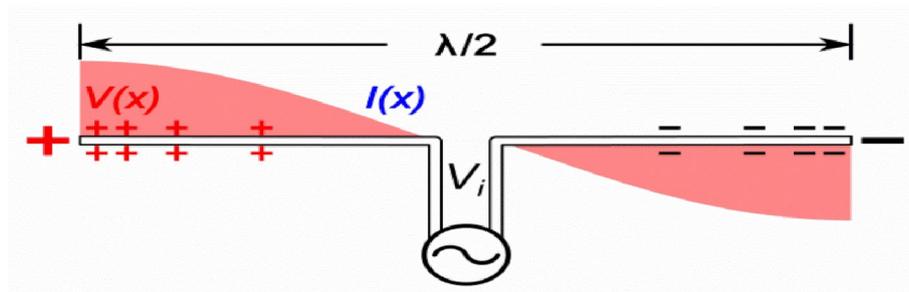


Figure III.4: Fonctionnement électrique du dipôle [13].

III.2.3 Gain de l'antenne dipôle

Le Tableau III.1 suivant définit les variations de gain de dipôle en fonction de sa longueur par rapport à la longueur d'onde λ .

Tableau III.1 : La variation du gain de dipôle en fonction de sa longueur

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_dipolaire]. 21

Longueur en λ	Gain	Note
$L \ll \lambda$	1,50	Dipôle court
$0,5 \lambda$	1,64	Dipôle demi-onde
$1,0 \lambda$	1,80	Dipôle pleine onde
$1,5 \lambda$	2,00	
$2,0 \lambda$	2,30	
$3,0 \lambda$	2,80	
$4,0 \lambda$	3,50	
$8,0 \lambda$	7,10	

III.2.4 Réalisation d'un dipôle

Le dipôle est divisé en deux branches linéaires de longueur égale reliées entre elles dans la partie centrale, à partir duquel le signal est prélevé par l'intermédiaire d'un câble coaxial et il

est amené au dispositif de source dans le cas de transmission ou du récepteur en cas de réception. Pour obtenir de bonnes performances avec cette antenne, à la fois en émission et en réception, il doit être placé à une hauteur d'au moins une demi-longueur d'onde.

Le dipôle peut être orienté horizontalement, verticalement, ou peut aussi être incliné par rapport au sol (dans ce cas on parle de dipôle en V inversé). L'orientation détermine la polarisation du champ électromagnétique transmis et le signal maximal est obtenu lorsque la polarisation de l'antenne de réception est identique à celle de l'antenne d'émission (adaptation de la polarisation) [22].

III.3 Antenne monopôle

Un monopôle correspond à un demi-dipôle au-dessus d'un plan métallique de référence. En raison de la symétrie apportée par le plan métallique, le monopôle se comporte comme un dipôle comme le montre la Figure III.5 [23.]



Figure III.5 : Une antenne monopole [14].

III. 3.1 Caractéristiques du monopôle [23]

- Rayonnement dans un demi-espace
- Gain supérieur de 3 dB
- Quart d'onde : $Z=36,5+j21$ ohms

III.4 Antenne dipôle log-périodique (antenne Yagi)

L'antenne Yagi (Figure III.6) est une antenne directive dont le gain est supérieur à celui du dipôle dans la direction avant et inférieur dans la direction arrière [24]. Elle se compose de :

- un dipôle demi-onde, alimenté comme il se doit en son milieu, c'est l'élément radiateur
- un (ou plusieurs) élément réflecteur, non alimenté
- un (ou plusieurs) élément directeur, non alimenté
- Les éléments non alimentés sont qualifiés de "parasites"

-La configuration minimale pour une antenne Yagi correspond à un dipôle accompagné d'un seul élément parasite, un réflecteur (le plus souvent) ou un directeur.



Figure III.6 : Antenne Yagi 800 - 960 MHz, 13 dBi [15].

III.4.1 Principe de fonctionnement

Si on place un conducteur de longueur égale à une demi-onde à proximité d'un dipôle, le champ électromagnétique rayonné par ce dernier induit un courant HF de même fréquence mais d'amplitude bien moins. On peut comparer ce phénomène à celui qui se produit dans un transformateur, le dipôle jouant le rôle d'enroulement primaire. Le dipôle, élément rayonnant, est appelé "radiateur" dans une antenne Yagi, tandis que les autres éléments qui lui sont subordonnés, sont les éléments parasites. La Figure III.7 montre la position de radiateur, des éléments parasites et de réflecteur.

Si les deux éléments sont placés parallèlement l'un à l'autre et à une distance qui est de l'ordre de $l/10$, les champs électromagnétiques vont se perturber mutuellement [24].

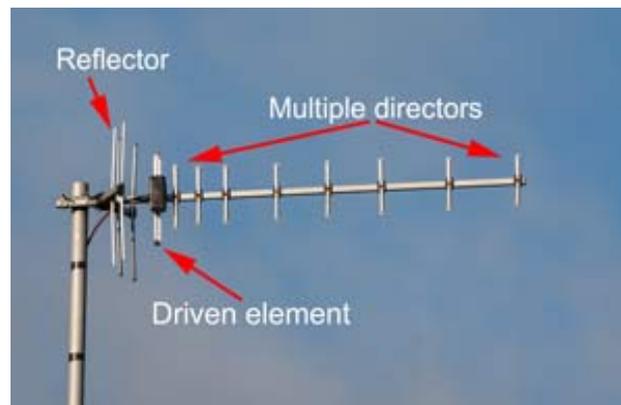


Figure III.7: Fonctionnement de l'antenne Yagi [16].

III.4.2 Caractéristiques

Pour augmenter le gain avant de l'antenne, il suffit d'ajouter des éléments directeurs. Cette pratique a toutefois des limites :

- mécaniques car la longueur de l'antenne peut poser des problèmes de réalisation

- électriques car le gain n'est pas proportionnel au nombre d'éléments et plafonne assez rapidement.

Le rapport avant-arrière est déterminé principalement par les éléments réflecteurs.

La bande passante de l'antenne Yagi est assez étroite mais elle couvre sans problème la totalité d'une bande amateur comme celle des 20 ou 15 m. En télévision UHF, des antennes à large bande sont réalisées à l'aide d'éléments en forme de X. L'impédance au point d'alimentation est généralement de 50 ou 75 ohms. La directivité de l'antenne Yagi est en étroite relation avec son gain. Une Yagi 7 éléments avec un gain de 12 dBi a un angle d'ouverture en polarisation horizontale de l'ordre de 40 degrés à -3 dB [25].

III.4.3 Gain d'une antenne Yagi-Uda

III.4.3.1 Gain avant en fonction du nombre d'éléments :

Le Tableau 2 suivant est purement indicatif, il permet simplement de se faire une idée des dimensions (longueur d'onde et nombre d'éléments) pour obtenir un gain donné. L'antenne est supposée être isolée dans l'espace. Le gain est exprimé par rapport à l'antenne isotrope [26].

Tableau 2 : La variation du gain de l'antenne Yagi en fonction de sa longueur λ [26].

Gain en dBi	Nombre d'éléments	Longueur d'onde (λ)
6	2	0,4
8	3	0,7
9	4	1,1
10	5	1,4
11	6	1,8
12	7	2,1
13	8	2,5
13	9	2,8
14	10	3,2
14	12	3,9
15	14	4,6
15	16	5,3
16	18	6,0
16	20	6,7
17	22	7,4
17	24	8,1

III.4.3.2 Rapport Avant-Arrière :

Le rapport avant-arrière (Figure III.8) indique l'atténuation subie par un signal provenant de l'arrière de l'antenne par rapport au signal reçu dans l'axe du lobe principal. Il est exprimé en décibels. Pour une antenne directive comme la Yagi, les lobes parasites sont généralement d'une amplitude nettement plus faible que celle du la longueur d'onde principal dont le niveau sert de

référence. Le rapport Avant-arrière est relativement stable à l'intérieur de la bande passante de l'antenne [26].

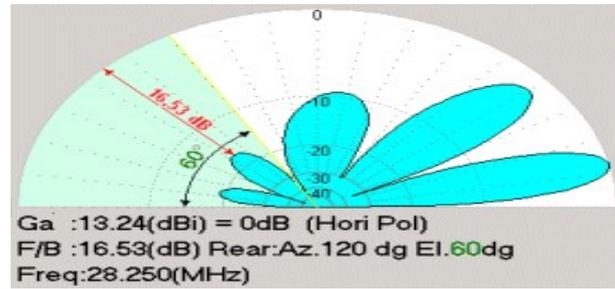


Figure III.8 : Le rapport Avant-arrière d’une antenne Yagi [17].

III.5 Mesures et calculs sur les antennes filaires

III.5.1. Mesures sur l’antenne dipôle log-périodique (Yagi) :

L’antenne Yagi de test à caractériser est représentée sur la Figure III.9.

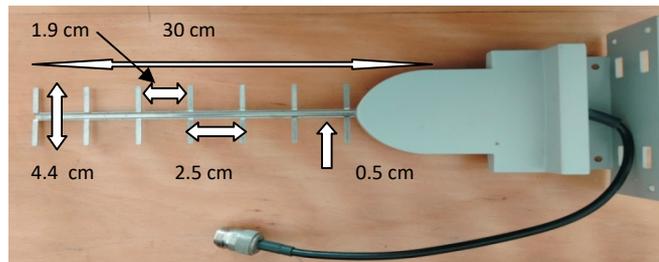


Figure III.9 : Antenne dipôle log-périodique à caractériser dans le laboratoire.

III.5.1.1 Mesure du coefficient de réflexion :

La mesure de coefficient de réflexion (S_{11}) d’une antenne peut être réalisée à l’aide d’un analyseur de réseau vectoriel (VNA) fournissant les paramètres S. Ce paramètre est souvent exprimé en décibel (dB).

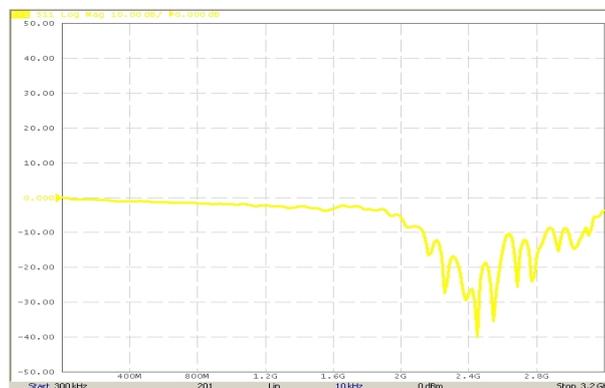


Figure III.10 : Coefficient de réflexion S_{11} de l’antenne Yagi.

La Figure III.10 représente la courbe de variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour l'antenne log-périodique. Cette antenne résonne à la fréquence de 2.45 GHz avec une valeur du coefficient égale à -31.035 dB.

III.5.1.2 Calcul de la bande passante:

La fréquence de résonance de l'antenne log-périodique utilisée est de 2.45 GHz. Soit alors :

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \lambda(m) = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{2.45 \cdot 10^9 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda = 12.24 \text{ cm} \quad (\text{III.7})$$

La bande passante (en anglais *bandwidth*) mesurée à -10 dB est :

$$BW \text{ entre } [2.9 \text{ GHz}-2.2 \text{ GHz}] \Rightarrow BW=700 \text{ MHz} \quad (\text{III.8})$$

Suivant la définition de Taylor, un signal ultralarge bande doit donc occuper une bande passante qui vérifie :

$$BW(\%) = 100 \frac{(f_h - f_l)}{f_c} \geq 25\% \quad (\text{III.9})$$

Soit alors un pourcentage au moins égale à 25% de la bande passante par rapport à la fréquence centrale f_c . Pour notre antenne on obtient :

$$BW(\%) = 100 \frac{(2.9 - 2.2)}{2.45} \Rightarrow BW(\%) = 28.57\% \quad (\text{III.10})$$

III.5.1.3 Détermination de la zone de champ lointain:

La prochain calcul qui est important est la détermination de la zone lointaine ou encore dite zone de Fraunhofer. Elle se situe au-delà de $\frac{2D^2}{\lambda}$ et constitue ce qu'on appelle la zone de champ lointain de l'antenne :

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ avec } D=30 \text{ cm } (D : \text{démontions de l'antenne Yagi à caractériser})$$

Par conséquent :

$$d > \frac{2 \cdot 30^2}{12.24} = 1.47 \text{ m} \quad (\text{III.11})$$

Donc, on doit prendre une distance $d=2$ m entre les deux antennes Yagi si on veut évaluer correctement le S_{21} comme on le montrera ci-après.

III.5.1.4 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss})

L'atténuation physique due à la propagation dans l'espace libre est donnée par :

$$P_{\text{loss}}(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (\text{III.12})$$

$$P_{\text{loss}}(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{12.24 * 10^{-2}}{4\pi * 2}\right)$$

$$P_{\text{loss}}(\text{dB}) = -46.24 \text{ (dB)} \tag{III.13}$$

III.5.1.5 Calcul du paramètre S_{21} et du gain de l'antenne :

Le paramètre S_{21} de l'antenne est donné par le VNA comme représenté dans la Figure III.11.

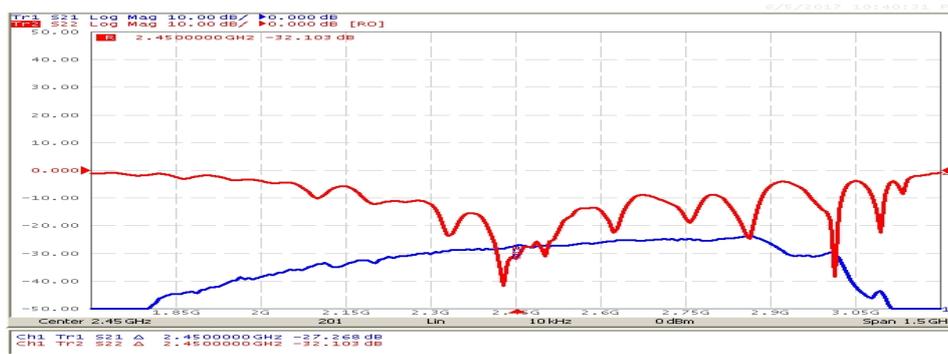


Figure III.11 : Les coefficients S_{11} et S_{21} d'antennes dipôles log-périodiques selon le VNA PROTEK A333.

Selon la Figure III.11 on trouve:

$$S_{21} = -33(\text{dB}) \Rightarrow S_{21} = 20 \log_{10} S_{21} \text{ (dB)} \tag{III.14}$$

A.N:

$$S_{21} = 10^{S_{21}/20} \Rightarrow S_{21} = 10^{-33.45/20} \Rightarrow S_{21} = 0.021 \tag{III.15}$$

$$\frac{pr}{pe} = G_1 G_2 \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \Rightarrow \frac{pr}{pe} = (S_{21})^2 \tag{III.16}$$

Puisque les deux antennes Yagi utilisées dans la procédure de caractérisation sont identiques, elles ont alors le même gain : $G_1 = G_2 = G$. Il vient que :

$$\frac{pr}{pe} = G \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \Rightarrow (S_{21})^2 = G^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \Rightarrow G^2 = \frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2} (S_{21})^2 \Rightarrow G = \frac{(4\pi r)}{\lambda} (S_{21}) \tag{III.17}$$

$$\text{A.N: } G = \frac{(4\pi r)}{0.1224} (0.02) = 4.30 \Rightarrow G(\text{dB}) = 10 \log_{10}(4.30) = 6.33 \text{ dB} \tag{III.18}$$

Donc le gain de l'antenne log-périodique à caractériser est $G=6.33$ dB.

III .5.1.6 Calcul de la densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant:

Pour se faire, on utilise un analyseur de spectre. La puissance par unité de surface (densité de puissance) P est donnée en fonction du champ électrique E par la relation :

$$P = \frac{1}{2} \frac{E^2}{Z_0} \quad (III.19)$$

Avec: $Z_0 = 120\pi \approx 377\Omega$ étant l'impédance de vide.

La puissance captée par l'antenne P_c est:

$$P_c = P \Sigma \quad (III.20)$$

Σ : Surface effective de l'antenne donnée par :

$$\Sigma = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (III.21)$$

Où G_r est le gain de l'antenne de réception. Il en résulte que :

$$P_c = P G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (III.22)$$

Si l'antenne est parfaitement adaptée, la puissance captée par l'antenne P_c est égale à celle reçue par l'analyseur de spectre $P_{re\cure}$ soit :

$$P_c = P_{re\cure} = \frac{V^2_{eff}}{R} \quad (III.23)$$

On lit la valeur de $P_{re\cure}$ au niveau de l'écran de l'analyseur de spectre exprimée en dBm comme affichée sur la Figure III.12.

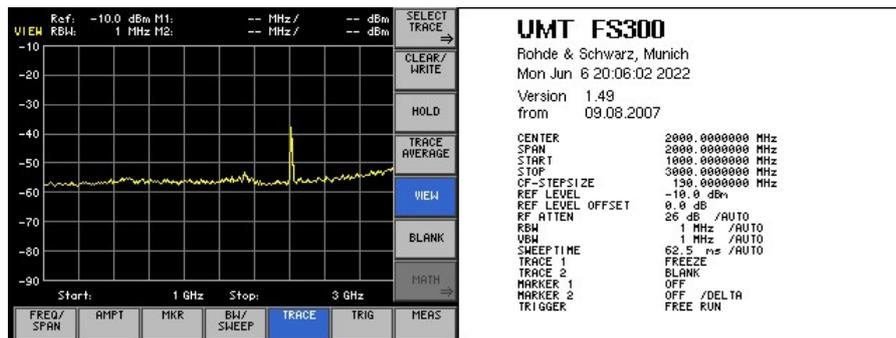


Figure III.12 : Le spectre de fréquence affiché sur l'analyseur de spectre R&S® FS300 branché à une antenne Yagi raisonnant à 2.45 GHz.

D'après le graphe ci-dessus, on obtient les valeurs suivantes :

$$P_{re\cure} = -35.7 \text{ dBm (analyseur de spectre)} \quad (III.24)$$

$$P_{re\cure}(\text{dBm}) = 10 \log_{10} P_{re\cure}(\text{mw}) \quad (III.25)$$

$$\Rightarrow P_{re\cure}(\text{mw}) = 10^{\frac{P_{re\cure}}{10}}$$

A.N $\Rightarrow P_{re\cure}(\text{mw}) = 10^{\frac{-35.7}{10}} = 2.68 \times 10^{-4}(\text{mw})$

Donc la puissance ambiante reçue au niveau de l'antenne Yagi est:

$$P_c = P_{re\cure}(\text{mw}) = 2.68 \times 10^{-4}(\text{mw}) \quad (III.26)$$

Remarque : En télécommunications, les signaux reçus sont en générale très faibles et les microvolts (μV) et milliwatts (mW) sont les unités les plus courantes. On rencontre souvent des rapports exprimés en dBm.

D’après l’équation (III.22), la densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant P est :

$$P = \frac{P_c 4\pi}{G_r \lambda^2} \Rightarrow p = \frac{4\pi 2.69 \times 10^{-4}}{4.3 \times (0.12)^2}$$

Soit : $P = 0.045 \text{ (W/m}^2\text{)}$ (III.27)

Dans le même contexte, on peut calculer le champ électrique ambiant comme suit :

$$E = \sqrt{2PZ_0} = \sqrt{(120\pi 2P)}$$
 (III.28)

Soit:

$$E = 6.408 \text{ (mW/m)}$$
 (III.29)

Ce calcul est intéressant par exemple pour déterminer la distance minimale de sécurité à respecter pour garantir que le champ électrique reçu par le corps humain répond aux normes, c.-à-d. $E < E_{\max}$.

Enfin, il est à noter que lorsque l’antenne n’est pas correctement adaptée, on a :

$$P_r = (1 - \Gamma^2) P_c$$
 (III.30)

Avec : $\Gamma = S_{11} = -31 \text{ dB}$ comme obtenu à partir du VNA. Donc :

$$\Gamma = S_{11} = 10^{\frac{-3}{20}} = 10^{-1.55} = 0.028$$
 (III.31)

Et : $P_c = \frac{2.69 \times 10^{-4}}{(1 - 0.028^2)} = 2.69 \times 10^{-4} \approx P_{reçue}$ (III.32)

III.5.2 Mesures sur l’antenne dipôle

Le dipôle qu’on veut caractériser est un dipôle demi-onde ($L = \lambda/2$) résonnant à la fréquence $f_r = 1.8 \text{ GHz}$ comme illustré dans la Figure III.13.

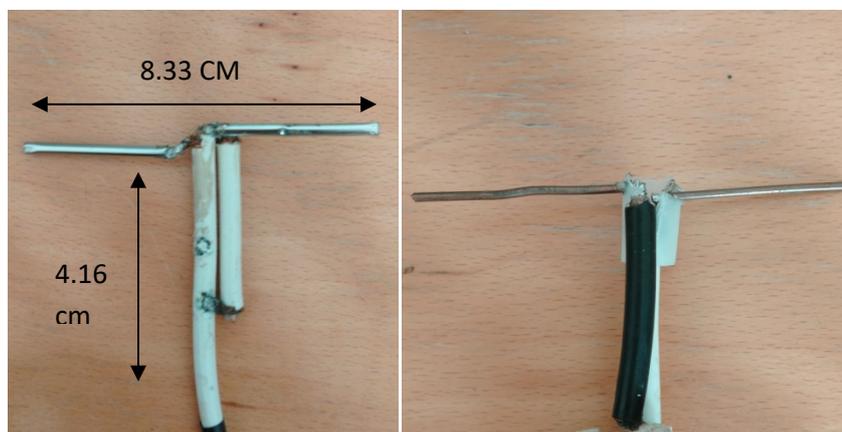


Figure III.13 : Antenne dipôle $\lambda/2$ à caractériser raisonnant à $f_r = 1.8 \text{ GHz}$.

III.5.2.1 Mesure du coefficient de réflexion S_{11} :

La Figure III.14 montre le coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne réalisée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) fournissant les paramètres S. Le seuil classiquement utilisés pour juger de l'adaptation est -10 dB.

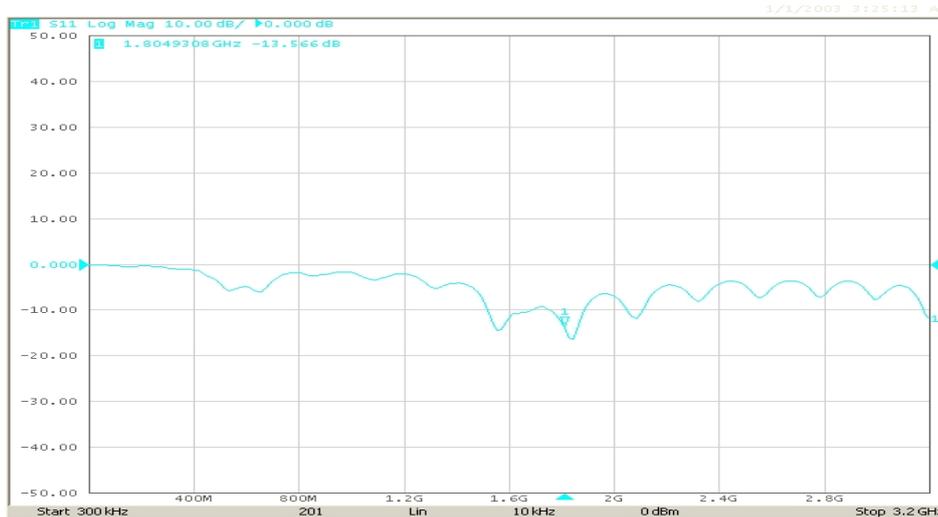


Figure III.14 : Coefficient S_{11} de l'antenne dipôle.

Cette antenne résonne à la fréquence de 1.8 GHz avec une valeur du coefficient de réflexion égale à -13.218 dB. Selon le graphe de la Figure III.14, nous observons un pic du coefficient S_{11} autour de la fréquence de résonance de notre antenne dipôle avec une largeur de bande acceptable pour certaines applications.

III.5.2.2 Calcul de la bande passante:

$$BW = 1.92 \text{ GHz} - 1.6 \text{ GHz} \Rightarrow BW = 320 \text{ MHz} \tag{III.33}$$

$$BW (\%) = 100 \frac{(f_h - f_l)}{f_c}$$

A.N:
$$BW (\%) = 100 \frac{(1.92 - 1.6)}{1.8} \Rightarrow BW(\%) = 17.77\% \tag{III. 34}$$

III.5.2.3 Détermination de la zone de champ lointain:

La fréquence de résonance de l'antenne dipôle utilisée est de 1.8 GHz. Soit alors :

$$\Rightarrow \lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1.8 \cdot 10^9 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda = 16.66 \text{ cm} \tag{III.35}$$

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ avec } D = 8.33 \text{ cm (} D : \text{longueur de l'antenne dipôle à caractériser)}$$

Par conséquent, la zone du rayonnement du champ lointain doit vérifier :

$$d > \frac{2 \cdot 8.33^2}{16.66} = 8.33 \text{ cm} \tag{III.36}$$

III.5.2.4 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss}) :

A partir de l'équation (III.12) on a :

$$p_{loss}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{16,66}{4\pi 60} \right) \Rightarrow p_{loss}(dB) = -33,10 \text{ dB} \quad (III.37)$$

III.5.2.5 Calcul du paramètre S_{21} et du gain de l'antenne :

Le paramètre S_{21} de l'antenne est donné par le VNA comme représenté dans la Figure III.15.



Figure III.15: Les coefficients S_{11} et S_{21} de l'antenne dipôle 1800 MHz prélevés du VNA PROTEK A333.

La Figure III.16 représente la position des deux dipôles et la distance entre eux pendant la lecture du paramètre S_{21} au niveau du VNA en respectant la condition (III.36) du champ lointain.



Figure III.16 : La position des deux dipôles et la distance entre eux pendant la lecture du paramètre S_{21} au niveau du VNA.

Selon la Figure III.15 on trouve :

$$S_{21}(dB) = -28,8 \text{ (dB)}$$

A.N:
$$S_{21} = 10^{S_{21}(dB)/20} \Rightarrow S_{21} = 10^{-28,8/20} \Rightarrow S_{21} = 0,036 \quad (III.38)$$

Puisque les deux antennes dipôles utilisées dans la procédure de caractérisation sont identiques, elles ont alors le même gain : $G_1 = G_2 = G$. Il vient d'après l'équation (III.16) que :

$$\frac{p_r}{p_e} = G^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \Rightarrow (S_{21})^2 = G^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \Rightarrow G^2 = \frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2} (S_{21})^2 \Rightarrow G = \frac{(4\pi r)}{\lambda} (S_{21})$$

$$\text{A.N: } G = \frac{(4\pi \cdot 2)}{0.1224} (0.036) = 1.35 \Rightarrow G(\text{dB}) = 10 \log(1.35) = 1.32 \text{ dB} \quad (\text{III.39})$$

Donc le gain de l'antenne dipôle à caractériser est : $G = 1.32 \text{ dB}$.

III.5.2.6 Calcul de la densité de puissance de rayonnement électromagnétique ambiant:

En se référant aux équations (III.19-III.23), on trouve les résultats suivants :

On lit la valeur de $P_{\text{reçue}}$ au niveau de l'écran de l'analyseur de spectre exprimée en dBm. On trouve :

$$\begin{aligned} P_{\text{reçue}}(\text{dBm}) &= -28,9 \text{ dBm} \\ \Rightarrow P_{\text{reçue}}(\text{mW}) &= 10^{\frac{-28,9}{10}} = 1.28 \times 10^{-3} \text{ (mW)} \end{aligned} \quad (\text{III.40})$$

Donc la puissance reçue au niveau de récepteur est : $P_{\text{reçue}}(\text{mW}) = 1.28 \times 10^{-3}(\text{mW})$

La densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant P est :

$$\Rightarrow p = \frac{p_c 4\pi}{G_r \lambda^2} \Rightarrow p = \frac{4\pi \times 1.28 \times 10^{-3}}{1.35 \times 0.16^2}$$

$$\text{Soit : } \Rightarrow p = 0.465 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{III.41})$$

Dans le même contexte, on peut calculer le champ électrique ambiant à partir de l'équation (III.28) comme suit :

$$E = \sqrt{(120\pi \times 2p)} = 0.59 \text{ V/m} \quad (\text{III.42})$$

Dans le cas où l'antenne n'est pas parfaitement adaptée et selon l'équation (III.30), et sachant que : $\Gamma = S_{11} = -13.218 \text{ dB}$, on trouve :

$$\Gamma = 10^{\frac{-13.218}{20}} = 10^{-1.55} = 0.028$$

$$\text{Et : } p_c = \frac{1.28 \times 10^{-3}}{(1-0.028^2)} = 1.28 \times 10^{-3} \approx p_{\text{reçue}}. \quad (\text{III.43})$$

III.5.3 Mesure de la densité de puissance de rayonnement électromagnétique ambiant autour de 1.8 GHz

Afin de déterminer les émetteurs actifs dans la bande de fréquence correspondante à la norme DSC-1800 du téléphone portable, on branche l'antenne dipôle demi-onde raisonnant à $f_c=1.8 \text{ GHz}$ qu'on a caractérisé avec l'analyseur de spectre R&S®FS300. Le choix de cette antenne est justifié du fait qu'il couvre la bande passante allant de 1.6 GHz à 1.92 GHz.

Il est à rappeler que pour le DCS-1800 (Digital Communication System), les communications montantes se font entre 1710 et 1785 MHz tandis que les communications descendantes se réalisent entre 1805 et 1880 MHz.

D'après le graphe affiché sur l'écran de l'analyseur de spectre et reporté sur la Figure III.17, nous remarquons que l'antenne dipôle capte un premier pic de puissance EM à la fréquence 1710 MHz correspondante à la voie montante et un deuxième pic autour de la fréquence 1820 MHz relative à la voie descendante. En ce qui suit, on calculera la densité de puissance de rayonnement EM ambiant pour chacune des deux fréquences.

III.5.3.1 Mesures à la fréquence de la voie descendante ($f_M=1.71$ GHz):

Lors de communications mobiles entre deux personnes présentes au laboratoire, utilisant des opérateurs divers de téléphonie cellulaire, on a eu le spectre de fréquence présenté à la Figure III.18.

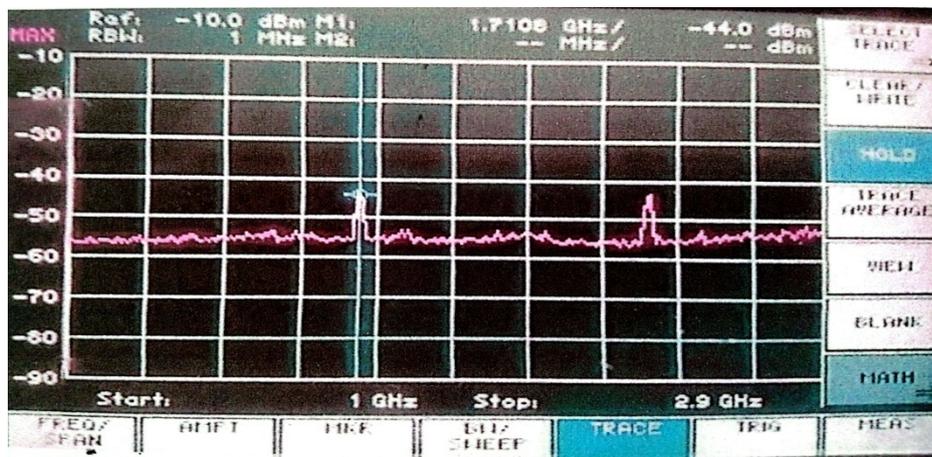


Figure III.18 : Pic de fréquence de la voie montante localisé à $f_M= 1710$ MHz par l'antenne dipôle comme obtenu lors des tests au laboratoire signaux et systèmes.

En se référant aux équations (III.19-III.23), et en tenant compte des résultats de caractérisation ($\lambda_{(1.82\text{ GHz})}=16.48$ cm et $G_r = 1.32$ dB), on trouve les résultats suivants :

La puissance captée par l'antenne p_c est la même que la puissance reçue par l'antenne dipôle 1800 MHz, notée $P_{reçue}$. On lut la valeur de $P_{reçue}$ au niveau de l'écran de l'analyseur de spectre exprimée en dBm:

$$\begin{aligned}
 P_{reçue} \text{ (dBm)} &= -44 \text{ dB} \\
 \Rightarrow P_{reçue} \text{ (mW)} &= 10^{\frac{-44 \text{ (dBm)}}{10}} \\
 \Rightarrow P_{reçue} \text{ (mW)} &= 3.98 \times 10^{-5} \text{ (mW)}
 \end{aligned}
 \tag{III.44}$$

Donc la puissance reçue au niveau du récepteur est : $P_{reçue} = 3.98 \times 10^{-5} \text{ (mW)}$

La densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant p est :

$$p = \frac{p_c 4\pi}{G_r \lambda^2} \Rightarrow p = \frac{4\pi \times 3.98 \times 10^{-5}}{1.35 \times 0.16^2}$$

Soit : $p = 0.014 \text{ (mW/m}^2\text{)}$ (III.45)

Dans le même contexte, on peut calculer le champ électrique ambiant comme suit :

$$E = \sqrt{(120\pi \times 2p)} = 95 \text{ (mV/m)} \quad (\text{III.46})$$

Dans le cas où l'antenne n'est pas parfaitement adaptée et selon l'équation (III.30), et sachant que: $\Gamma = S_{11} = -13.218 \text{ dB}$, on trouve :

$$\Gamma = S_{11} = 10^{\frac{-1.218}{20}} = 10^{-1.55} = 0.028$$

Et :

$$p_c = \frac{3.98 \times 10^{-5}}{(1-0.028^2)} \approx P_{\text{reçue}} = 3.98 \times 10^{-5} \text{ (mW)} \quad (\text{III.47})$$

III.5.3.2 Mesures à la fréquence de la voie descendante ($f_D=1.82 \text{ GHz}$) :

La Figure III.19 permet de distinguer le pic de puissance reçu par l'antenne dipole correspondant à la voie descendante. On lit la valeur $f_D=1.82 \text{ GHz}$.



Figure III.19 : Pic de fréquence de la voie descendante localisé à $f_D=1820 \text{ MHz}$ par l'antenne dipôle comme obtenu lors des tests au laboratoire signaux et systèmes.

En reprenant les mêmes calculs de la sous-section III.5.3.1 mais cette fois-ci on mesure la puissance reçue en μV . On obtient ce qui suit :

La puissance reçue au niveau du récepteur est :

$$P_{\text{reçue}} (\mu\text{V}) = 225 \mu\text{V} \text{ (analyseur de spectre).}$$

$$P_{\text{reçue}} (\text{W}) = \frac{U^2}{R} \quad (\text{III.48})$$

$$\Rightarrow P_{\text{reçue}} (\text{dB}) = 10 \log \frac{U^2}{0.1}$$

$$\Rightarrow P_{\text{reçue}} (\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{(225 \times 10^{-6})^2}{0.1}$$

$$P_{\text{reçue}} (\text{dB}) = -62.95 \text{ (dB)} \quad (\text{III.49})$$

La densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant p est :

$$P_{\text{reçue}} (\text{W}) = 10^{(P_{\text{reçue}}(\text{dB})/10)}$$

$$\Rightarrow P_{\text{reçue}} (\text{W}) = 5.06 \times 10^{-7} \text{ (W)} \quad (\text{III.50})$$

$$p = \frac{p_c 4\pi}{G_r \lambda^2} \Rightarrow p = \frac{4\pi \times 5.06 \times 10^{-7}}{1.35 \times 0.16^2}$$

$$\Rightarrow p = 1.83 \times 10^{-4} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{III.51})$$

Le champ électrique ambiant vaut alors :

$$E = \sqrt{(120\pi \times 2p)} = 11.74 \text{ (mV /m)} \quad (\text{III.52})$$

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié et caractérisé deux types d'antennes de très grande utilité pratique à savoir l'antenne log-périodique et l'antenne dipôle demi-onde. Cette caractérisation inclut d'une part une série de mesures prises par l'analyseur de réseau vectoriel le PROTEC A333 et l'analyseur de spectre R&S®FS300 (9 KHz-3 GHz), ainsi que des calculs numériques annexes.

Ces antennes sont omniprésentes dans notre vie quotidienne et très utilisées dans différents domaines, ce qui fait que la détermination de leurs propriétés de rayonnement est très utile pour la formation de futurs télé-communicateurs.

Le chapitre 4 est consacré à un autre type d'antennes qui sont de plus en plus utilisées dans des applications très diverses. Il s'agit des antennes planaires, encore dites imprimées ou patch.

C

HAPITRE IV

**Caractérisation des antennes
planaires et PIFA**

IV.1 Introduction

Les antennes imprimées ont de nombreuses utilisations pratiques surtout avec la possibilité offerte de fabriquer des antennes miniaturisées pouvant facilement être intégrées dans des dispositifs électriques embarqués et mobiles. Dans ce chapitre, nous parlerons des antennes patch et PIFA, nous allons d'abord définir les antennes imprimées, puis citer leurs différentes caractéristiques. Ensuite, nous allons présenter les applications des antennes microbandes. Le reste du chapitre est consacré à la description d'une procédure complète de caractérisation pratique d'une antenne patch et d'une antenne Pifa fonctionnant autour de Wi-Fi. Les deux types d'antennes étaient réalisées au laboratoire signaux et systèmes. Cette caractérisation est basée sur l'utilisation du VNA et de l'analyseur de spectre décrits en détails en Chapitre 2.

IV.2 Antennes imprimées

Dans les années soixante, la technologie de circuit imprimé avait été largement mise à contribution notamment dans le domaine de l'électronique. Cette technologie est actuellement appliquée aux antennes microbandes (ou antennes patch).

IV.2.1 Définition des antennes patch

L'antenne patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face et est donc favorable à une production industrielle. Le concept d'antenne patch est apparu dans les années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970. Elle peut être utilisée seule ou comme élément d'un réseau. De même, elle peut être intégrée au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface [26].

IV.2.2 Utilisation

Les antennes planaires sont utilisées lorsqu'on veut réduire l'encombrement d'une antenne, notamment sa hauteur au-dessus d'un plan de masse, par exemple sur les émetteurs récepteurs portables de radiocommunications, sur les récepteurs GPS, ... Les antennes planaires en réseau sont employées en Wifi, en radio amateurisme et dans de nombreuses transmissions professionnelles. L'antenne patch en réseau actif est une des technologies permettant la réalisation des antennes radar à faisceau contrôlé, en navigation aérienne, surveillance ou observation de la Terre par satellite [27].

IV.2.3 Structure d'une antenne patch

L'antenne microbande, est constituée d'un mince conducteur métallique (habituellement de 17,5 à 35 μm d'épaisseur en hyperfréquence et 9 μm en millimétrique) de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat épais utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par l'effet joule et améliorer la bande passante de l'antenne (voir la Figure IV.1). La face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse.

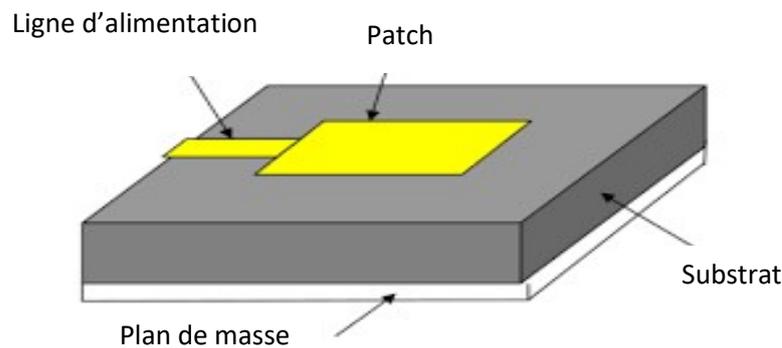


Figure IV.1: Schéma générale d'une antenne patch [1].

La plaque rayonnante est généralement constituée de cuivre ou d'or (à cause de leurs conductivités élevées). Elle peut avoir une forme arbitraire, mais les formes régulières sont les plus utilisées, pour faciliter leur analyse et leur modélisation. Pour avoir un meilleur rendement, le constant diélectrique du substrat ϵ_r utilisé doit être aussi petit que possible pour minimiser l'effet des ondes de surface [28].

IV.2.4 Caractéristiques des antennes patch

La réduction en taille d'une antenne se traduit généralement par une réduction importante de la bande passante ainsi qu'une diminution de son efficacité de rayonnement. En effet, la réduction des dimensions de l'antenne entraîne une augmentation de l'intensité des champs électromagnétiques au voisinage de la structure. C'est pourquoi, les antennes imprimées ont la particularité de présenter des performances médiocres qui se dégradent en même temps que leurs dimensions se réduisent. De plus, les antennes sont sensibles aux matériaux métalliques et diélectriques qui constituent leur proche environnement de rayonnement [28].

IV.2.5 Principe de fonctionnement des antennes patch

L'élément rayonnant le plus classique est un rectangle. Il ya deux modèles qui sont utilisés pour comprendre le fonctionnement d'une antenne patch et déterminer des formules analytiques de leur rayonnement et de leur impédance d'entrée. L'alimentation de ce type de structure s'opère de différentes façons : Par sonde coaxiale, par ligne micro ruban, par effet de proximité ou encore par fenêtre. Dans son fonctionnement normal d'utilisation, une antenne imprimée sur substrat diélectrique peut être considérée en première approximation comme une cavité résonnante imparfaite, présentant des murs magnétique verticaux à pertes. En générale, le mode de fonctionnement de l'antenne est celui de base, qui se caractérise par la répartition du champ électrique de rayonnement dont la dimension au moins la moitié de la longueur d'onde [29]. La Figure IV.2 au dessous montre la structure la plus commune d'une antenne imprimée en précisant ces dimensions.

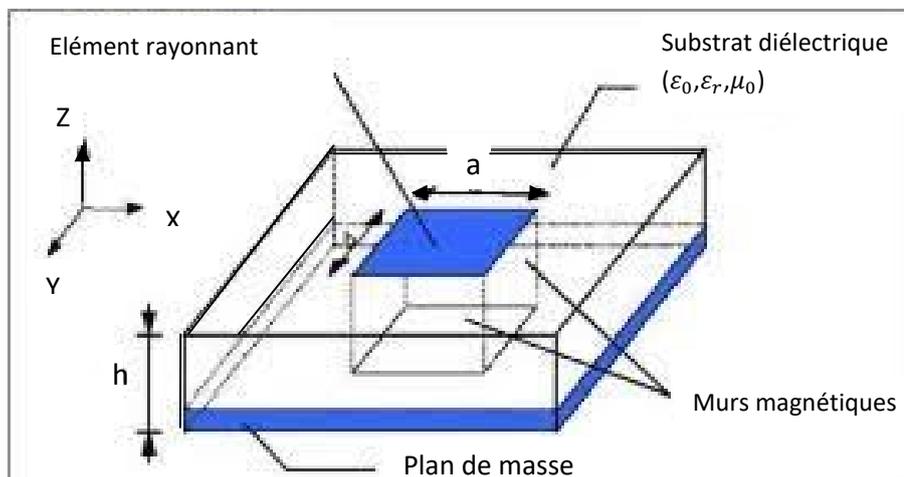


Figure IV.2 : Structure et dimensions d'une antenne patch [2].

IV.2.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Les antennes imprimées présentent de nombreux avantages et inconvénients comparés aux antennes microondes classiques [26].

Avantage :

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles
- Faible coût de fabrication, production en masse possible
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne
- Simplicité de leurs structures
- Faible volume
- Faible épaisseur

Inconvénients

- Bande passante souvent étroite de l'ordre de 1 à 5% (pour les éléments résonants de géométrie simple)
- Généralement faible gain
- Facteur de qualité Q élevé, va d'environ de 50 jusqu'à 75
- Supportent uniquement des faibles puissances
- Rendement limité de surface
- Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits
- Risque de rayonnement parasite dû aux jonctions avec l'alimentation ou à la limitation du plan de masse
- Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisation

IV.2.7 Applications des antennes imprimées

Les antennes microbandes remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications. Parmi ces applications on cite [30]:

- La commande et contrôle
- La télémétrie par missile
- Les équipements portatifs
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes
- Les antennes d'émission utilisées en médecine
- Les récepteurs satellite de navigation

IV.2.8 Antenne patch rectangulaire

Les éléments rayonnants les plus simples ont la forme d'un rectangle, d'un carré, d'un disque circulaire ou encore d'un triangle (Figure IV.3).

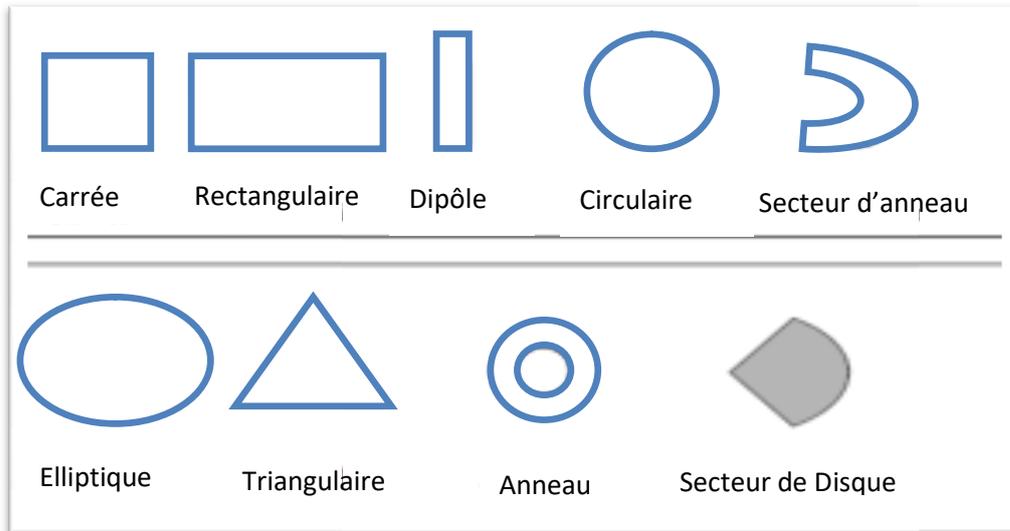


Figure IV.3 : Divers types d'élément rayonnants [3].

IV.2.8.1 Modélisation d'antenne patch rectangulaire [31]

Ce type d'antennes est représenté par une cavité résonnante délimitée des murs magnétiques sur les cotés latéraux et des murs électriques (métalliques) sur les cotés supérieurs. En posant les équations de propagation avec les conditions aux limites adéquates, on peut déterminer aisément les fréquences de l'antenne patch rectangulaire :

$$f_{mn} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{\pi W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n}{\pi L_{eff}}\right)^2} \tag{IV.1}$$

Avec :

$$W_{eff} = W + 2DW \tag{IV.2}$$

$$L_{eff} = L + 2DL \tag{IV.3}$$

Ou DL et DW représentent respectivement les extensions de longueur et de largeur. Le patch est électriquement étendu d'une valeur ΔL de chaque côté tel que :

$$\Delta L = 0.412 h \left[\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} + 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.813\right)} \right] \tag{IV.4}$$

IV.2.8.2 Calcul des paramètres géométriques [31]

a) Largeur : La largeur à un effet mineur sur le rayonnement et les fréquences de résonances. Elle joue aussi un rôle important sur l'impédance à l'entrée et sur la bande passante. Pour permettre un bon rendement de l'entenne, il suffit de définir.

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r + 1}} \tag{IV.5}$$

b) La longueur : La longueur permet de définir la fréquence de résonance. Les formules avec correction sont :

$$L = \frac{\lambda_{diélectrique}}{2} - 2\Delta L \quad (IV.6)$$

$$L = \frac{C}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (IV.7)$$

IV.3 Mesures et calculs sur l'antenne patch

IV.3.1 Calcul théorique des dimensions de l'antenne patch

L'antenne patch réalisée au laboratoire est de forme carrée imprimée sur du FR4 en respectant les restrictions suivantes :

- Fréquence de résonance $f_r = 2.5$ GHz
- Constante diélectrique $\epsilon_r = 4.3$
- Epaisseur du substrat : $h = 1.6$ mm
- Largeur W du patch : $W = \frac{C}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
- $C = 3.10^8$ m/s : Vitesse de la lumière dans le vide
- ϵ_{eff} : Le constant diélectrique effectif est fonction de W . Elle est donnée par la relation :

$$\epsilon_{eff} = \frac{1+\epsilon_r}{2} + \frac{1-\epsilon_r}{2} \left(1 + \frac{10h}{W}\right)^{-0.555} \quad (IV.8)$$

La largeur est calculée par itérations successives. La valeur initiale de $W = W_0$ est :

$$W_0 = \frac{C}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff_0}}} \text{ et } \epsilon_{eff_0} = \frac{1+\epsilon_r}{2} \quad (IV.9)$$

Donc :

$$W_0 = \frac{C}{2f_r \sqrt{\frac{1+\epsilon_r}{2}}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.5 \times 10^9 \sqrt{\frac{1+4.3}{2}}} = 36.8 \text{ mm} \quad (IV.10)$$

Ce qui implique un constant diélectrique effectif qui vaut :

$$\epsilon_{eff_1} = \frac{1+4.3}{2} + \frac{1-4.3}{2} \left(1 + \frac{10 \times 1.6}{36.8}\right)^{-0.555} = 4 \quad (IV.11)$$

Et une largeur W_1 mise à jour égale à :

$$W_1 = \frac{C}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff_1}}} \Rightarrow W_1 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.5 \times 10^9 \sqrt{4}} = 33.3 \text{ mm} \quad (IV.12)$$

Après, on procède aux itérations comme suit :

$$\epsilon_{eff_2} = \frac{1+4.3}{2} + \frac{1-4.3}{2} \left(1 + \frac{10 \times 1.6}{33.3}\right)^{-0.555} = 3.97 \quad (IV.13)$$

$$W_2 = \frac{C}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff_2}}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.5 \times 10^9 \sqrt{3.97}} = 30 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{eff_3} = \frac{1+4.3}{2} + \frac{1-4.3}{2} \left(1 + \frac{10 \times 1.6}{30}\right)^{-0.555} = 3.95 \quad (IV.14)$$

$$W_3 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.5 \times 10^9 \sqrt{3.95}} = 30.1 \text{ mm}$$

Après la quatrième itération on trouve :

$$W = 30.1 \text{ mm et } \epsilon_{eff}=3.95$$

La longueur effective est donnée par :

$$L_{eff}=W \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{IV.15}$$

La longueur réelle du patch peut être réécrite comme suit :

$$L=L_{eff}-2\Delta L \tag{IV.16}$$

$$\Delta L = 0.412 \left(\frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}+0.258)\left(\frac{W}{h}+0.813\right)} \right) \tag{IV.17}$$

On a :

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.64\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad \text{et } \epsilon_{eff}=3.95 \tag{IV.18}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{(3.95+0.3)\left(\frac{30.1}{1.6}+0.64\right)}{(3.95-0.258)\left(\frac{30.1}{1.6}+0.8\right)} = 0.46$$

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.46 \Rightarrow \Delta l = 0.46 \times h = 0.46 \times 1.6 = 0.736 \text{ mm} \tag{IV.19}$$

Soit :

$$L = 30.1 - 2 \times 0.736 = 28.6 \text{ mm} \tag{IV.20}$$

Les mesures qui suivent seront alors effectuées sur l'antenne patch réalisée au laboratoire raisonnant à 2.5 GHz dont la dimension est : $L = 2.8 \text{ cm}$.

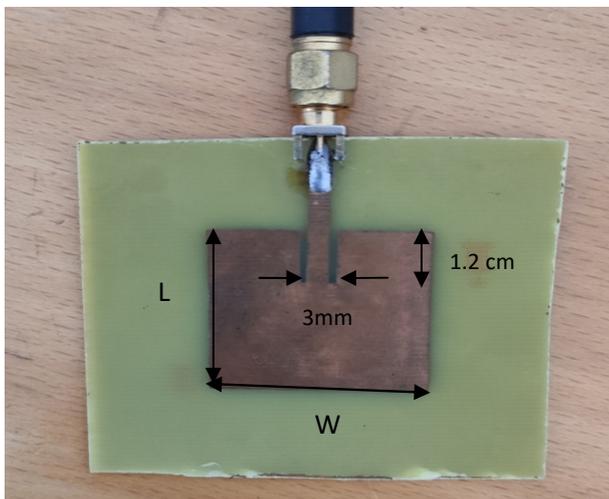


Figure IV.4 : L'antenne patch réalisée au laboratoire raisonnant à 2.5 GHz et ces dimensions.

IV.3.2 Mesure du coefficient de réflexion

La Figure IV.5 représente la courbe de variation de coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour l'antenne patch. Cette antenne résonne à la fréquence de 2.5 GHz avec une valeur du coefficient de réflexion (S_{11}) égale à -19.94 dB .

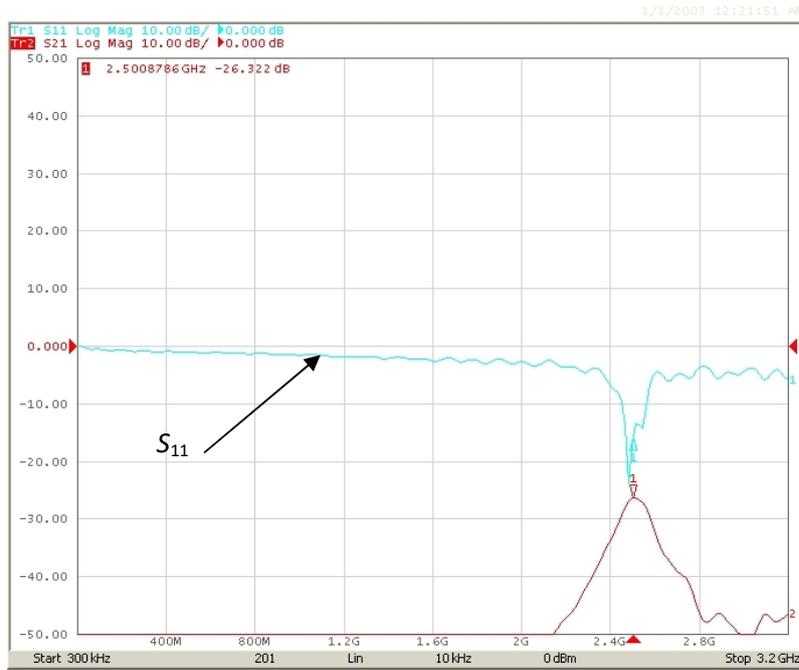


Figure IV.5 : Coefficient de réflexion S_{11} de l’antenne patch résonnant à 2.5 GHz.

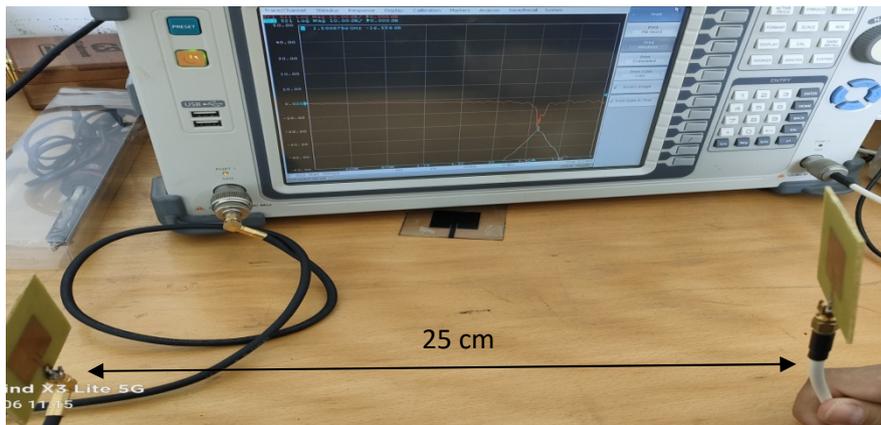


Figure IV.6 : Position des deux antennes patch et la distance entre eux pendant l’analyse par le VNA.

IV.3.3 Calcul de la bande passante

La fréquence de résonance de l’antenne patch utilisé est de 2.5 GHz soit alors :

$$\lambda \text{ (m)} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.5 \times 10^9 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda = 12 \text{ cm} \tag{IV.21}$$

La bande passante mesurée à -10 dB est :

$$\begin{aligned} BW &= [2.48 \text{ GHz} - 2.42 \text{ GHz}] \Rightarrow BW = 60 \text{ MHz} \\ BW(\%) &= 100 \frac{f_H - f_L}{f_c} = 100 \frac{(2.48 - 2.42)}{2.5} = 24\% \end{aligned} \tag{IV.22}$$

IV.3.4 Détermination de la zone de champ lointain

Le prochain calcul qui est important est la détermination de la zone de rayonnement du champ lointain vérifiant:

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ avec } D = 6 \text{ cm (} D : \text{démontions de l'antenne patch à caractériser)}$$

Soit :
$$d > \frac{2 \cdot 6^2}{12} = 6 \text{ cm} \tag{IV.23}$$

Par conséquent, on a décidé de prendre une distance $d = 25 \text{ cm}$ entre les deux antennes patch pour évaluer le S_{21} comme on le montrera ci-après. La Figure IV.6 montre une photo prise au laboratoire en respectant la condition du champ lointain.

IV.3.5 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss})

L'atténuation physique due à la propagation dans l'espace libre est donnée par :

$$P_{loss} \text{ (dB)} = 20 \log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) = 20 \log_{10}\left(\frac{12}{4\pi \times 25}\right) = -28.35 \text{ dB} \tag{IV.24}$$

IV.3.6 Calcul du paramètre S_{21} et du gain de l'antenne

Le paramètre S_{21} de l'antenne est donné par le VNA comme représenté sur la Figure IV.6 reportant aussi le coefficient de réflexion S_{11} .

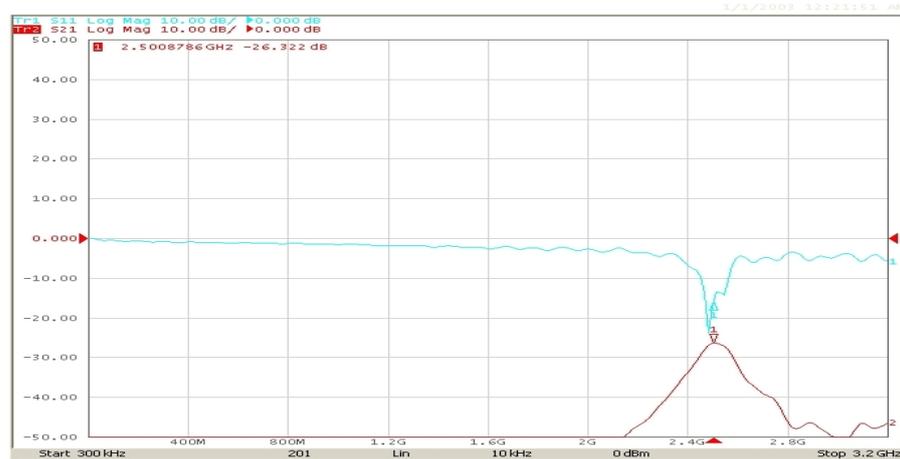


Figure IV.6 : Les paramètres S_{21} et S_{11} de l'antenne patch mesurés à partir du VNA PROTEK A333.

D'après la Figure IV.6 on trouve :

$$S_{21} \text{ (dB)} = -26 \text{ (dB)} \Rightarrow S_{21} = 20 \log S_{21} \text{ (dB)} \Rightarrow S_{21} = 10^{S_{21}/20} = 0.05 \tag{IV.25}$$

Puisque les deux antennes patch utilisées dans la procédure de caractérisation sont identiques, elles ont alors le même gain donc : $G_1 = G_2 = G$. Il vient que :

$$\frac{P_r}{P_e} = G^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \Rightarrow (S_{21})^2 = G^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \Rightarrow G^2 = \frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2} (S_{21})^2$$

$$\text{A.N: } G = \frac{(4\pi \cdot 2)}{12} (0.05) = 1.30 \Rightarrow G \text{ (dB)} = 10 \log_{10} (1.30) = 1.16 \text{ dB} \quad (\text{IV.26})$$

Donc le gain de l'antenne patch à caractériser est : $G = 1.16 \text{ dB}$

IV.4 Antennes PIFA (Planar Inverted F Antenna)

IV.4.1 Définition des antennes PIFA

L'antenne PIFA est le résultat de la transformation de l'antenne IFA (Inverted F Antenna) d'un élément filaire horizontale à une structure planaire afin de compenser ses pertes de désadaptation et améliorer ses caractéristiques de rayonnement. Cette structure est constituée d'un élément rayonnant métallique parallèle au plan de masse (Figure IV.6). Un des bords du patch est relié à la masse par un plan de court-circuit qui constitue l'un des particularités de cette antenne. L'élément supérieur est généralement excité par une sonde coaxiale qui pénètre dans le substrat diélectrique. La variation de ses dimensions, la position d'alimentation, le plan du court-circuit, la hauteur du substrat modifient les performances du PIFA [30].

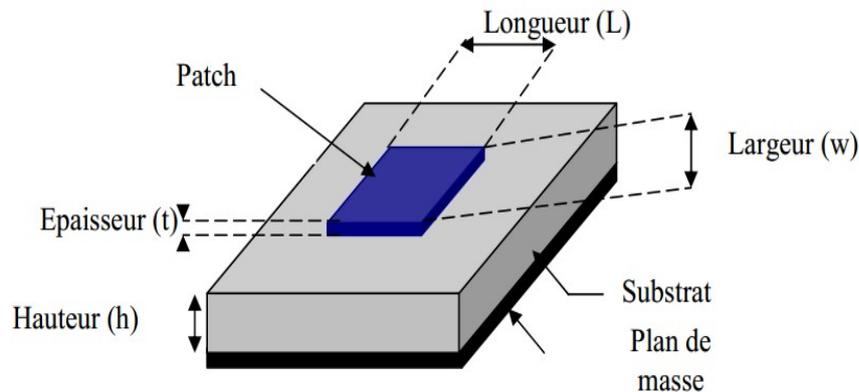


Figure IV.6: Structure d'antenne PIFA [4]

IV.4.2 Différents types d'antennes PIFA

Le type d'antenne PIFA fait référence à la fréquence de résonance à laquelle elle fonctionne. Nous pouvons en trouver plusieurs types qui fonctionnent sur une voire deux ou plusieurs bandes. Nous citons les deux types suivants :

IV.4.2.1 Antennes PIFA multi-bande[29]

IL s'agit d'une antenne fonctionnant dans deux bandes de fréquences ou plus, de sorte que l'antenne s'adapte à toutes les fréquences. Son avantage est l'utilisation d'éléments rayonnants indépendants pour chaque bande.

IV.4.2.2 Antennes PIFA bi- bandes

C'est une antenne qui assure un bon fonctionnement au coin de plan de masse. Elles sont mise en œuvre dans le but de satisfaire l'utilisateur qui demande une combinaison d'application sur le même appareil [26].

IV.4.3 Fréquence de résonance

La fréquence de résonance d'une antenne PIFA peut-être approximée par :

$$f_r = r^k f_1 + (1 - r^k) f_2 \quad \text{Si } \frac{W_p}{L_p} \geq 1 \quad \text{(IV.27)}$$

$$f_r = r f_1 + (1 - r) f_2 \quad \text{Si } \frac{W_p}{L_p} \leq 1 \quad \text{(IV.28)}$$

$$f_1 = \frac{c}{4(L_p + h)}, f_2 = \frac{c}{4(L_p + h + W_p + W_s)}, r = W_s / W_p k = \frac{W_p}{L_p}$$

L_p et W_s sont respectivement la longueur et la largeur de l'élément rayonnant.

W_s : La largeur du plan de court-circuit et h sa hauteur.

IV.4.4 Avantages et inconvénients d'une antenne PIFA [26]

L'antenne PIFA possède plusieurs avantages parmi lesquels on cite :

- Structure simple et flexible
- Volume réduit
- Faible cout de fabrication
- Facilité d'intégration
- Fréquence de résonance modifiable grâce à l'insertion des fentes
- Sensible à la polarisation horizontale et verticale
- Diagramme de rayonnement omnidirectionnel
- Antenne multi – bande (double ou triple bande)

L'inconvénient majeur de l'antenne PIFA est la génération d'une bande passante étroite ainsi que sa faible efficacité.

IV.5 Mesures sur l'antenne PIFA 2.45 GHz

IV.5.1 Mesure du coefficient de réflexion

La mesure de coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne patch à caractériser était effectuée par le VNA comme affiché sur la Figure IV.8

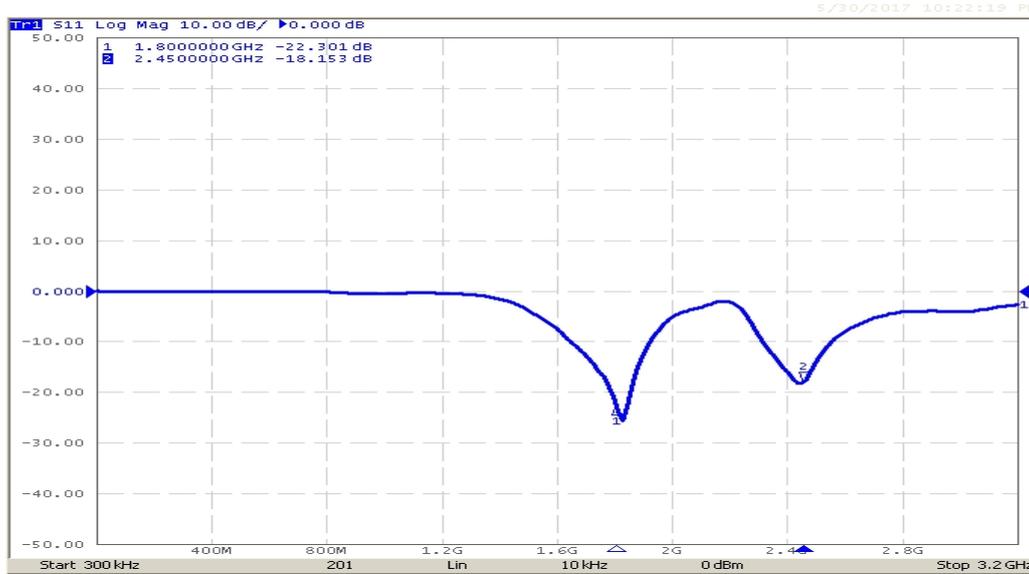


Figure IV.8 : Coefficient de réflexion S_{11} de l’antenne PIFA raisonnant à 2.45 GHz.

On voit que cette antenne résonne bien à la fréquence 2.45 GHz avec une valeur du coefficient S_{11} égale à -17.153 dB.

IV.5.2 Calcul de la bande passante autour de 2.45 GHz

D’après le tracé des variations du coefficient S_{11} en fonction de la fréquence présenté sur la Figure IV.8, la bande passante autour de la fréquence 2.45 GHz est :

$$BW = 2.63 \text{ GHz} - 2.36 \text{ GHz} = 270 \text{ MHz} \tag{IV.29}$$

Soit alors :

$$BW(\%) = 100 \frac{(2.63 - 2.36)}{2.45} = 11.02\% \tag{IV.30}$$

IV.5.3 Calcul de la zone de champ lointain

La fréquence de résonance de l’antenne PIFA qu’on a pris en considération est $f_r = 2.45$ GHz. Soit alors :

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2.45 \cdot 10^9 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda = 12.24 \text{ cm} \tag{IV.31}$$

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ avec } D = 30 \text{ cm}$$

$D = 30$ cm, pour rappel, est la dimension de l’antenne Yagi à utiliser avec l’antenne PIFA pour déterminer le gain de ce dernier.

Par conséquent, la zone du rayonnement du champ lointain doit vérifier :

$$d > \frac{2 \cdot 30^2}{12.24} = 1.47 \text{ m} \tag{IV.32}$$

Donc, on a pris une distance $d = 1.5$ m entre l’antenne Yagi et l’antenne PIFA afin d’évaluer correctement le S_{21} comme on le montrera ci-après.

IV.5.4 Calcul des pertes dans l'espace libre (P_{loss})

A partir de l'équation (III.12) on a :

$$P_{loss}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{12.24 \times 10^{-2}}{4\pi \times 1.5} \right) = -43.75 \text{ dB} \quad (IV.33)$$

IV.5.5 Calcul du paramètre S_{21} et du gain de l'antenne

La Figure IV.9 représente la position des antennes Yagi et PIFA et la distance entre eux pendant la lecture du paramètre S_{21} au niveau du VNA en respectant la condition (IV.32) du champ lointain. Le paramètre S_{21} de l'antenne PIFA, quant à lui, est donné par le VNA comme représenté sur la Figure IV.10.



Figure IV.9 : La position des deux antennes Yagi et PIFA et la distance entre eux pendant la Lecture du paramètre S_{21} au niveau du VNA.

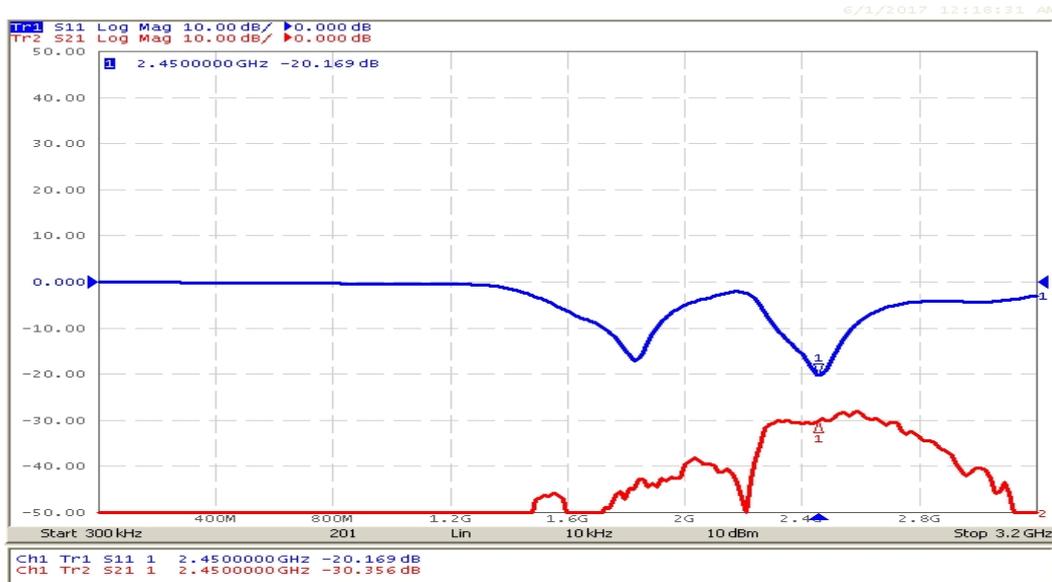


Figure IV.10 : Les coefficients S_{11} et S_{21} de l’antenne PIFA 2450 MHz prélevés du VNA PROTEK A333.

Selon la Figure IV.10 on trouve :

$$S_{21(dB)} = -30.357(dB) \Rightarrow S_{21} = 10^{-30.357/20} = 0.03 \quad (IV.34)$$

Puisque les deux antennes dipôles utilisées dans la procédure de caractérisation ne sont pas identiques, elles ont alors le même gain : $G_1 = G_2 = G$. Il vient que :

$$\frac{P_r}{P_e} = (S_{21})^2 = G_1 G_2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (IV.35)$$

Où $G_2 = G_{2(\log\text{-périodique})} = 4.3$.

On trouve alors:

$$G_1 = \frac{S_{21}^2 (4\pi r)^2}{G_2 \lambda^2} = \frac{(0.03)^2 (4\pi \times 1.5)^2}{4.30 (0.12)^2} \Rightarrow G_1 \approx 5 \quad (IV.36)$$

Donc le gain de l’antenne PIFA à caractériser à la fréquence de résonance $f_r=2.45$ GHz est : $G \approx 7dB$.

IV.6 Mesure de la densité de puissance de rayonnement électromagnétique ambiant autour de 2.45 GHz

Ces mesures sont faites par le billet de l’analyseur de spectre qui a capté les fréquences reportées sur la Figure IV.11.

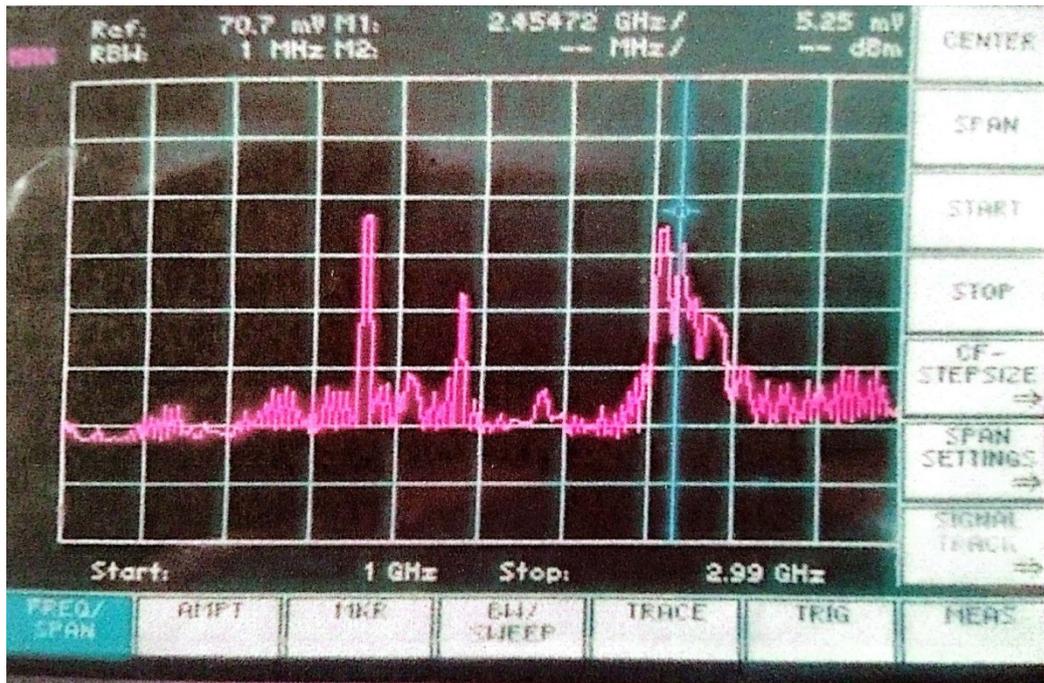


Figure IV.11 : Amplitudes spectrales captées par l’antenne PIFA en utilisant l’analyseur de Spectre.

En reprenant les mêmes calculs de la sous-section III.5.3.2, et en se focalisant notre attention autour de la fréquence 2.45 GHz, on obtient ce qui suit :

La puissance reçue au niveau du récepteur est :

$$\begin{aligned}
 P_{re\grave{c}ue} \text{ (mV)} &= 5.25 \text{ mV (analyseur de spectre)} \\
 P_{re\grave{c}ue} \text{ (W)} &= \frac{U^2}{R} \\
 \Rightarrow P_{re\grave{c}ue} \text{ (dB)} &= 10 \log_{10} \frac{U^2}{0.1} \\
 \Rightarrow P_{re\grave{c}ue} \text{ (dB)} &= 10 \log_{10}((5.25 \cdot 10^{-3})^2 / 0.1) = -35.6 \text{ (dB)} \tag{IV.37}
 \end{aligned}$$

La densité de puissance du rayonnement électromagnétique ambiant p est :

$$\begin{aligned}
 P_{re\grave{c}ue} \text{ (W)} &= 10^{(P_{re\grave{c}ue} \text{ (dB)} / 10)} \\
 \Rightarrow P_{re\grave{c}ue} \text{ (W)} &= 2.76 \times 10^{-4} \text{ (W)} \tag{IV.38}
 \end{aligned}$$

$$p = \frac{P_c 4\pi}{Gr\lambda^2} \Rightarrow p = \frac{4\pi \times 2.76 \times 10^{-4}}{4.95 \times 0.12^2} \Rightarrow p = 0.048 \text{ (W/m}^2\text{)} \tag{IV.39}$$

Le champ électrique ambiant vaut alors :

$$E = \sqrt{(120\pi \times 2p)} = 6.001 \text{ (mV / m)} \tag{III.51}$$

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié et caractérisé deux types d'antennes de très grande utilité pratique à savoir l'antenne patch 2.5 GHz et l'antenne PIFA 2.45 GHz. Cette caractérisation comprend, d'une part, une série de mesures prises par l'analyseur de réseau vectoriel le PROTEC A333 et l'analyseur de spectre R&S®FS300 (9 KHz-3 GHz), et d'autre part, les calculs numériques associés.

Ces antennes sont omniprésentes dans notre vie quotidienne et très utilisées dans différents domaines, ce qui fait que la détermination de leurs propriétés de rayonnement soit très utile dans la formation de futurs télé-communicateurs surtout dans la discipline de conception et réalisation des antennes pour différentes applications commercialisées.

Conclusion générale

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les applications de ce domaine qui ont attiré plus d'attentions sont les antennes. Elles sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace.

Dans ce mémoire de fin du cycle master, nous abordons les différentes mesures et calculs associés conduisant à une caractérisation de deux types d'antennes très utilisées en pratique, à savoir les antennes filaires et les antennes planaires. Ce travail a une dimension pédagogique très importante car nous avons pu préparer cinq fascicules de travaux pratiques dédiés aux étudiants licence et master en télécommunications. Pour cet effet, le mémoire contient un aperçu assez détaillé sur les caractéristiques générales des antennes et leurs applications dans les systèmes de télécommunication.

Les travaux décrits dans de ce mémoire s'inscrivent dans le domaine de la conception et de la caractérisation d'antennes large bande dans un spectre de fréquence WPLAN allant de 2 à 3 GHz et WWAN allant de 1600 à 1900 MHz, qui est destinée principalement à des applications en télécommunications sans fils et cellulaires.

La technologie Large Bande est l'une des technologies les plus utilisées au sein de systèmes de communication à cause de leurs caractéristiques attractives. L'intérêt de cette technologie est augmenté de manière sans précédent après la réservation de la bande [1.6, 3 GHz] pour ses applications qui ne sont employées que des antennes opèrent sur toute cette bande, ce qui améliore la qualité de service des systèmes de communication.

Dans le but de mesurer la densité de puissance électromagnétique ambiant, plusieurs antennes (Dipôle, Yagi, Patch et antenne Pifa) ont été étudiées.

Sur la base de cette étude numérique, deux prototypes d'antennes ont été caractérisés avec une alimentation par câble coaxial connecté directement aux antennes par une prise de type SMA.

Pour caractériser les antennes sous test au laboratoire, nous avons besoin de deux instruments de mesures très indispensables à savoir :

Conclusion générale

- L'analyseur de réseaux vectoriels **PROTEK A333** qui permet de mesurer les paramètres S et d'afficher leurs variations en fonction de la fréquence dans la bande [300 KHz-3.2 GHz],
- L'analyseur de spectre **R&S® FS300** qui mesure la puissance du rayonnement électromagnétique dans le milieu environnant, captée par chacune des antennes sous test. Dans ce contexte, nous avons pu distinguer les transmissions téléphoniques cellulaires de plusieurs opérateurs actifs correspondantes à la voie montante et à la voie descendante et ceci en utilisant une antenne dipôle demi-onde résonnant à 1.8 GHz de bande passante égale à 320 MHz.

Nous recommandons les futurs étudiants à considérer d'autres types d'antennes en incluant d'autres travaux pratiques sur les logiciels de simulation en HF comme par exemple le FHSS ou le CST ainsi que la réalisation pratique des antennes cornets. Ce dernier type sera utilisé pour tracer les diagrammes de rayonnement des antennes à caractériser et comparer les résultats à ceux obtenus à partir des simulations.

Bibliographie

- [1] cour Antennes et lignes de transmissions. 3A. Licence Télécommunication, PP.50, 2016-2017.
- [2][3] [4] Alexandre Boyer, cour de l'antenne, 5ème Année Réseau et Télécom, institut national des sciences applique Toulouse, pp.16-17-18-19-21-22,2011.
- [5] [6] [7] ZITOUNI Ahmed, Polycopié de Cours Antennes de la 1ère Master en Télécommunications, Département d'Electronique,UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, PP.15-20 Septembre, 2018
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_(electrical))
- [9] 1file:///C:/Users/CLINIC%20PC/Downloads/VNA.pdf
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_(electrical))
- [11] 1file:///C:/Users/CLINIC%20PC/Downloads/VNA.pdf
- [12] Laurent Chusseau. Paramètres S - Antennes. DEA. De 2001 à 2005 à l'Université Montpellier 2, France. 2005, pp.107. ffccl-00343873f
- [13] Touhami Houssyn , Benzaza Saddek, antennes large bande pour la mesure des champs E-M ambient, mémoire de master2 , département Génie électrique, université Abdelhamid Iben Badis de Mostaganem , pp.74, 2016-2017
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyseur_de_spectre
- [15] <https://www.digikey.fr/fr/blog/spectrum-analyzers-what-are-they-and-what-are-the-different-types#:~:text=Son%20utilisation%20principale%20est%20de,signal%20dans%20le%20domaine%20temporel>
- [16] Touhami Houssyn , Benzaza Saddek, antennes large bande pour la mesure des champs E-M ambient, mémoire de master2 , département Génie électrique, université Abdelhamid Iben Badis de Mostaganem , pp.71, 2016-2017
- [17] Touhami Houssyn , Benzaza Saddek, antennes large bande pour la mesure des champs E-M ambient, mémoire de master2 , département Génie électrique, université Abdelhamid Iben Badis de Mostaganem , pp.72, 2016-2017

- [18] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Antenne-dipolaire.html>
- [19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_dipolaire
- [20] https://hmn.wiki/fr/Dipole_antenna]
- [21] <https://boowiki.info/art/antennes/dipole-antenna.html>
- [22] <https://f5zv.pagespersoorange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08y/RM08y00.htm>
- [23] <https://fr.lambdageeks.com/yagi-uda-antenna-design/>
- [24] <https://fr.lambdageeks.com/yagi-uda-antenna-design/>
- [25] <https://f5zv.pagespersoorange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08y/RM08y03.html>
- [26] [https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_(electrical))
- [27] 1file:///C:/Users/CLINIC%20PC/Downloads/VNA.pdf
- [28] Laurent Chusseau. Paramètres S - Antennes. DEA. De 2001 à 2005 à l'Université Montpellier 2, France. 2005, pp.107. ffcel-00343873f
- [29] Touhami Houssyn , Benzaza Saddek, antennes large bande pour la mesure des champs E-M ambient, mémoire de master2 , département Génie électrique université Abdelhamid Iben Badis de Mostaganem , pp.74, 2016-2017
- [30] *Kennouche Nourelhouda Bounoua Maissa , Etude et Conception des antennes Pifa bi-bandes pour applications biomédicales,mémoire de master, Département d'Electronique,Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj,pp.18, 15/09/2021.*
- [31] Ahmadouche Ahmed, Master 1 systèmes des télécommunication, université de Mostaganem, département de génie électrique,2022 .
- [32] ZITOUNI Ahmed, Polycopié de Cours Antennes de la 1ère Master en Télécommunications, Département d'Electronique, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, PP.40 Septembre, 2018
- [33] Touhami Housseyn –Benzaza Saddek, Antennes large bande pour la mesure des champs E-M ambient, mémoire de master,département de génie électrique ,université Abdelhamid Ibn Badi de Mostaganem,p. 17 , 2016/2017

Les Références des Figures:

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_rayonnement
- [2] https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-rayonnement-obtenu-dans-les-trois-phases-de-conception-En-appliquant-la_fig2_278382141
- [3] <https://www.technologuepro.com/cours-electronique/chapitre-5-polarisation-transistor.pdf>
- [4] https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Polarisation_des_transistors_BJT_et_FET
- [5] https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Polarisation_des
- [6] https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Polarisation_des
- [7] 1 file:///C:/Users/CLINIC%20PC/Downloads/VNA.pdf
- [8] Laurent Chusseau. Paramètres S - Antennes. DEA. De 2001 à 2005 à l'Université Montpellier 2, France. 2005, pp.107. Ffcel-00343873f
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyseur_de_spectre
- [10] <https://www.digikey.fr/fr/blog/spectrum-analyzers-what-are-they-and-what-are-the-different-types#:~:text=Son%20utilisation%20principale%20est%20de,signal%20d%20ans%20le%20domaine%20temporel>
- [11] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Antenne-dipolaire.html>
- [12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_dipolaire
- [13] https://hmn.wiki/fr/Dipole_antenna
- [14] <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08y/RM08y00.html>
- [15] <https://fr.lambdageeks.com/yagi-uda-antenna-design/>
- [16] <https://f5zv.pagespersoorange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08y/RM08y03.html>
- [17] https://www.researchgate.net/figure/A-gauche-Schema-3D-dune-antenne-patch-Le-dipole-source-point-rouge-est-place-au_fig19_280793195
- [18] <https://www.elliptika.com/fr/case-studies/antenne-patch/>

[19] https://www.researchgate.net/figure/Geometrie-dune-antenne-PIFA_fig14_41308589

[20] <http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/13505/1/Doc.Tel.Belhedef.pdf>

Annexe A

Fascicule de Travaux Pratiques des Antennes

Annexe A : Fascicules de Travaux Pratiques d'Antennes

M1 Systèmes des Télécommunications

Table des matières

Partie I : Rappel sur les caractéristique d'une antenne

2. Introduction	A02
2. Les caractéristiques radioélectriques.....	A03
2.1 Coefficient de réflexion	A03
2.2 Rendement.....	A03
2.3 Impédance d'entrée.....	A03
3. Les caractéristiques en rayonnement.....	A04
3.1 Diagramme de rayonnement.....	A04
3.2 Directivité.....	A05
3.3 Gain.....	A05
3.4 Polarisation.....	A05
3.5 Zones de champs.....	A06

Partie II : Caractérisation des antennes

TP0: Principe de fonctionnement et utilisation de l'analyseur de réseaux vectoriels et l'analyseur de spectre.....	A10
TP1 : Caractérisation d'une antenne dipôle.....	A19
TP2 : Caractérisation d'une antenne Yagi.....	A21
TP3: Caractérisation d'une antenne patch	A24
TP4 : Caractérisation d'une antenne Pifa.....	A26

Partie I : Rappel sur les caractéristiques d'une antenne

Sommaire

2. Introduction A02

2. Les caractéristiques radioélectriques..... A03

 2.1 Coefficient de réflexion A03

 2.2 Rendement..... A03

 2.3 Impédance d'entrée..... A03

3. Les caractéristiques en rayonnement..... A04

 3.1 Diagramme de rayonnement..... A04

 3.2 Directivité..... A05

 3.3 Gain..... A05

 3.4 Polarisation..... A05

 3.5 Zones de champs..... A06

I. Introduction

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique (EM) en émission et vis versa en réception afin d'assurer la transmission analogique des signaux. On peut les qualifier comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

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

Réciproquement, à la réception l'antenne capte et transmet l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur. Il s'agit d'une conversion de l'énergie EM libre en énergie EM guidée à travers le câble.

II. les Caractéristiques radioélectriques

II.1 Coefficient de Réflexion

Le coefficient de réflexion donne le transfert d'énergie par l'antenne (l'adaptation de l'antenne) qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation suivant :

$$S_{11} = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c}$$

Z_c : est l'impédance de normalisation, en générale égale à 50Ω .

Le module du coefficient de réflexion est habituellement présenté en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit: $S_{11}(\text{dB}) = 20 \log_{10} S_{11}$

2. 2 Rendement

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_A sous forme de puissance rayonnée P_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations 4 et 5, on voit que le rendement relie le gain et la directivité.

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow \eta = \frac{P_{ray}}{P_a}$$

$$G = \eta \cdot D$$

2.3 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme le rapport entre la tension et le courant aux terminaux de l'antenne ou comme le rapport entre les composantes appropriées des champs électriques et magnétiques. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne Z_{ant} se décompose en une partie réelle R_{ant} et une partie imaginaire X_{ant} et s'écrit comme suit :

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

Z_{ant} = impédance caractéristique de ligne d'alimentation

La partie réelle de l'impédance R_{ant} regroupe une partie due aux pertes ohmiques et diélectriques des matériaux et la résistance de rayonnement de l'antenne et elle s'écrit comme suit :

$$Z_{ant} = R_{ray} + R_{perts}$$

III Les Caractéristiques en Rayonnement

En plus de propriétés électriques, il est primordial de qualifier les propriétés en rayonnement d'une antenne, propriétés qui font d'ailleurs la spécificité de ce composant

III.1 Diagrammes de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta_0, \varphi_0)$ qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Fig.1). En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H

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

φ : puissance rayonnée dans une direction quelconque

φ_0 : Puissance rayonnée max

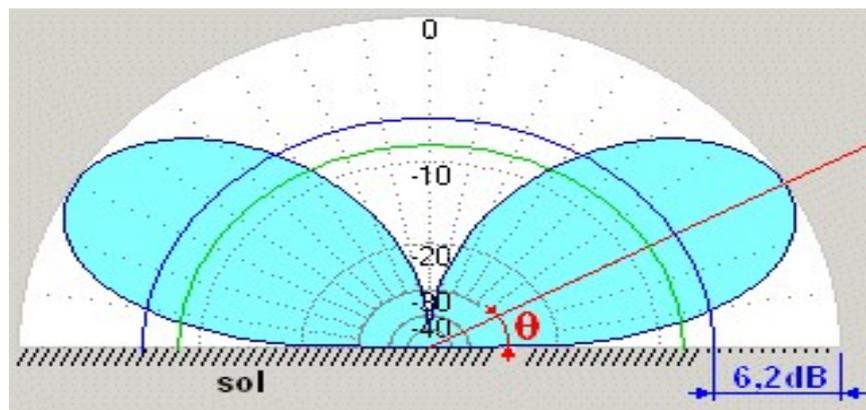


Figure II : diagramme de rayonnement.

Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes

3.2 Directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope.

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

3.3 Gain

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

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

P_A : La puissance d'alimentation.

3.4 Polarisation

La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée. Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique.



Figure III : Types de polarisation.

4.4 Champs autour d'une antenne

Une antenne, utilisée en émission, ne crée une onde plane qu'à une certaine distance. On peut distinguer quatre zones dans l'environnement de l'antenne, au fur et à

Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes

mesure qu'on s'éloigne de celle-ci :

- **Zone de champs réactifs** : Très proche des éléments composant l'antenne, on trouve des champs \vec{E} et des champs H , fonction des tensions et des courants sur ces conducteurs. À proximité d'une tension élevée, on trouvera essentiellement un champ E , et à proximité des courants, essentiellement un champ H

Zone de Rayleigh : On trouve une zone où la puissance par unité de surface décroît peu en fonction de la distance, bien que le rapport E/H soit déjà proche de 377 Ohms.

- **Zone de Fresnel** : Au-delà de la zone de Rayleigh, on constate que le rapport E/H s'est équilibré à 377 ohms. Mais on observe des variations importantes des champs, et même des ondulations si l'antenne est de grande dimension. On ne peut pas faire encore de mesure du gain de l'antenne dans cette zone.

- **Zone de Fraunhofer** : Dans cette zone, qui s'étend jusqu'à l'infini, on peut considérer que l'on a une onde plane, les champs décroissent en $1/D$, et on peut mesurer le gain de l'antenne. C'est aussi seulement dans cette zone que le diagramme de rayonnement est valable. Cette zone commence à une distance égale à deux fois le carré de la plus grande dimension perpendiculaire à la direction considérée, divisé par λ . Cette distance peut être très grande pour les antennes à grand gain.

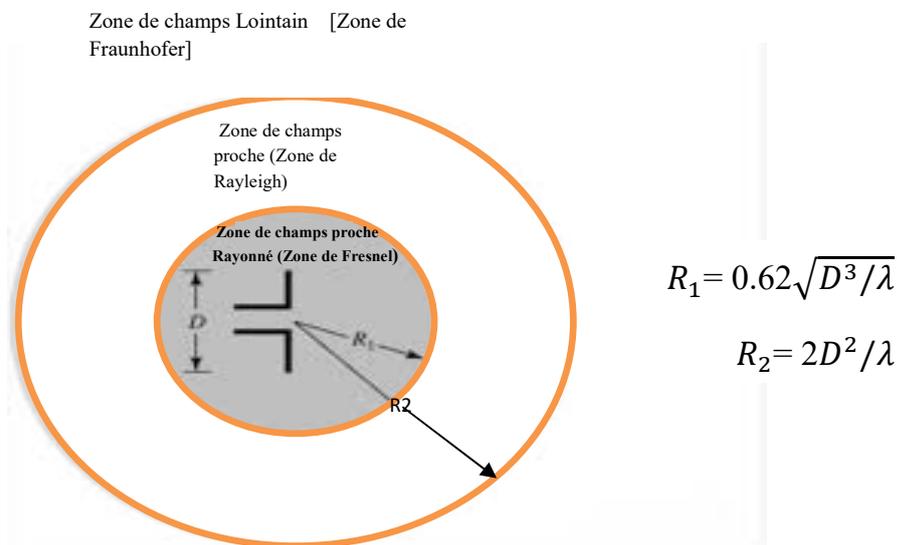


Figure IV : Les zones de champs autour d'une antenne.

Partie II : Caractérisation des antennes

TP0: Principe de fonctionnement et utilisation de l'analyseur de réseaux vectoriels et l'analyseur de spectre.....	A10
TP1 : Caractérisation d'une antenne dipôle.....	A19
TP2 : Caractérisation d'une antenne Yagi.....	A21
TP3 : Caractérisation d'une antenne Patch.....	A24
TP4 : Caractérisation d'une antenne PIFA.....	A26

Introduction

Une antenne filaire est généralement constituée d'un ou plusieurs brins métalliques qui peuvent être droits ou courbes. Les premières antennes étudiées et réalisées ont été les antennes filaires. Elles ont l'avantage d'être très simples à réaliser. De plus, elles sont peu coûteuses, c'est pourquoi on les retrouve encore dans de nombreuses applications. Cette partie est consacrée à la présentation et la caractérisation des antennes filaires de type :

- Dipôle
- Yagi-Uda

En suite la caractérisation d'une antenne imprimée (patch) de forme rectangulaire, et PIFA

Matériel nécessaire

Le tableau ci-dessous montre le matériel nécessaire pour la réalisation des travaux pratiques concernant la caractérisation des antennes de type : Dipôle, Yagi-Uda, Patch rectangulaire, et PIFA

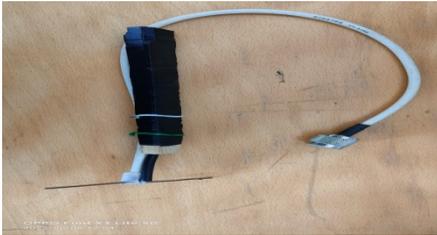
Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes



Analyseur de réseaux vectoriels (VNA) 3.2 GHz



Analyseur de spectre 3 GHz



Antennes dipôle



Antennes Yagi- Uda



Antennes PIFA



Antennes Patch



Câble coaxial d'interconnexion



Câble coaxial d'interconnexion

Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes



Antennes Dipôles



Connecteurs SMA

TP0 : Principe de fonctionnement et utilisation de l'analyseur de réseaux vectoriels et l'analyseur de spectre

I- Fonctionnement et mode d'utilisation du VNA



Figure A.4 : Vue de face de l'analyseur de réseaux vectoriels (VNA) 3.2 GHz

1. Définition de l'analyseur de réseau vectoriel :

Un analyseur de réseau est un instrument de mesure qui permet de déterminer les paramètres S d'un circuit électrique. Les analyseurs de réseau les plus avancés mesurent également d'autres paramètres, tels que les paramètres Y, Z et H. Cet instrument est généralement utilisé pour caractériser des quadripôles (tels que des amplificateurs ou des filtres), mais peut être utilisé sur d'autres réseaux (notamment avec un plus grand nombre de pôles). Un analyseur de réseau est généralement utilisé dans le domaine des radiofréquences pour caractériser les filtres, les câbles et les antennes. L'analyseur de réseau permet de tracer le nomogramme de Smith (ou abaque de Smith) du réseau étudié.

Il se compose de :



La touche « PRESET » rétablit l'état initial de l'Analyseur. Les valeurs des paramètres par défaut sont représentées en annexe



L'interrupteur ON/STANDBY bascule entre On et États de veille de l'analyseur. En état de veille, l'analyseur est connecté à 220 V secteur ; les circuits internes d'ordinateur et de mesure sont éteints. Dans l'état On, appuyer sur la touche lancera l'arrêt de Windows arrêt. L'analyseur entré dans l'état de veille.



Touches fonctionnelles

Les touches fonctionnelles contrôlent les fonctions de l'Analyseur avec les Touche logicielle



Clavier de CONTRÔLE

Les touches de commande vous permettent d'accéder directement au contrôle des fonctions de l'analyseur. Ils permettent d'accéder à une fonction spécifique en appuyant simplement sur une touche, nous ne citerons ci-dessous que les touches les plus utilisées.



Touche «Stimulus»

La touche « Stimulus » active le sous-menu de touches logicielles pour les réglages des paramètres de stimulation du canal. Ces paramètres sont telles que les valeurs de démarrage et d'arrêt de la fréquence plage de balayage, nombre de points de balayage, puissance de stimulation, etc .



Touche «Meas

La touche « Meas » active le sous-menu de touches logicielles pour une sélection du paramètre mesuré (S11, S21, S12 ou S22).



Touche «Format»

La touche « Format » active le sous-menu de touches logicielles sélection du format d'affichage des données mesurées. Ces formats sont tels que l'amplitude logarithmique, la phase, le TOS, etc.



Touche «Scale»

La touche « Scale » active le sous-menu de touches logicielles pour le diagramme mise à l'échelle.



Touche «Avg»

La touche «Avg» active le sous-menu. Ce sous-menu permet de régler IF paramètres de bande passante, de moyen-âge et de lissage.



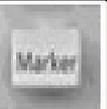
Touche «Display»

La touche «Display» active le sous-menu de touches logicielles pour l'affichage paramétrage. Ce sous-menu permet de régler nombre de traces, et leur affectation à l'écran, enregistrement des traces dans la mémoire, réglage de la couleur des traces, police taille et d'autres paramètres.



Touche «Save/Recall»

La touche «Save/Recall» active le sous-menu de « softkeys » pour sauvegarde et rappel de l'état de l'analyseur, étalonnage coefficients et traces de données.



Touche « Marqueur »

La touche « Marqueur » active le sous-menu de touches logicielles pour le marqueur manipulations. Ce sous-menu permet d'activer/désactiver les marqueurs et pour régler les paramètres des marqueurs.



Touches de navigati

Les touches de navigation « HAUT » et « BAS » sont utilisées pour effectuent la sélection entre les sous-menus du menu de touches logicielles. Et s'il y a un champ de saisie de données numériques actif, La flèche HAUT augmente la valeur, la flèche vers le BAS diminue la valeur.

Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes

Dans d'autres cas, ces Les touches de navigation « GAUCHE » et « DROITE » sont utilisées : la flèche GAUCHE amène l'utilisateur à un niveau supérieur du menu de touches logicielles, flèche DROITE amène l'utilisateur à un niveau inférieur de la touche programmable menu.



Connecteurs USB

Les connecteurs USB permettent la connexion de divers périphériques externes.

Périphériques compatibles USB, tels que carte mémoire flash, souris, clavier et imprimante.

- La vue arrière de l'A333 est représentée sur la figure 3.2. Panneau arrière équipé avec les pièces suivantes :

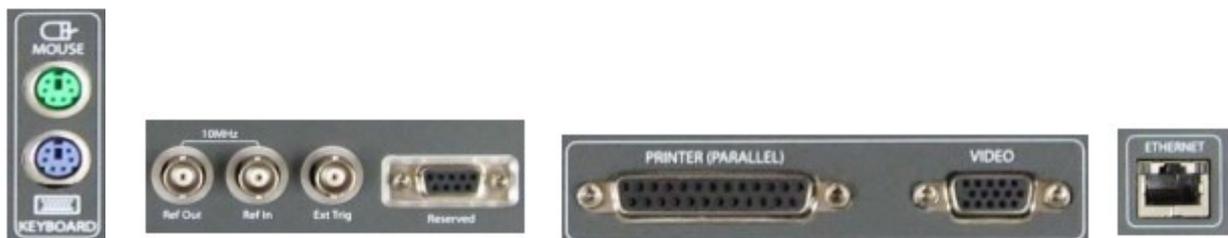


Figure A 5: l'interface arrière de l'A333

- câble d'alimentation
- connecteur GPIB (en option) ;
- Connecteur de clavier mini-DIN ;
- Connecteur mini-souris DIN ;
- port parallèle pour l'imprimante ;
- port moniteur VGA externe ;
- port COM ;
- Connecteur Ethernet
- admirateur
- Connecteur d'entrée de signal de déclenchement externe ;
- Connecteur d'entrée de fréquence de référence externe (10 MHz) ;
- Connecteur de sortie de fréquence de référence interne (10 MHz) ;
- port réservé.

Pour lancer une caractérisation pratique d'une antenne, on suit les étapes suivantes :

- Vérifier si le VNA est allumé et le clavier et la souris sont branchés sur l'appareil,
- Brancher le câble coaxial entre l'antenne à caractériser et le port 1 du VNA,



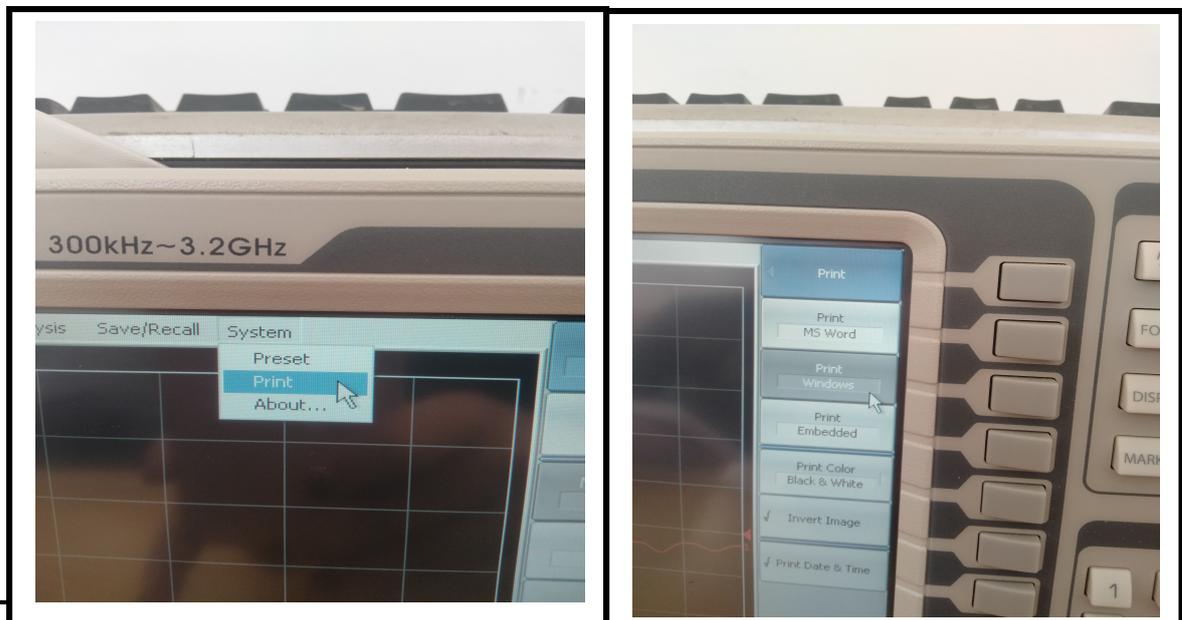
- A partir du menu principal (Main Menu), vérifier que le mode « Mesurment » est bien positionné sur le S11,



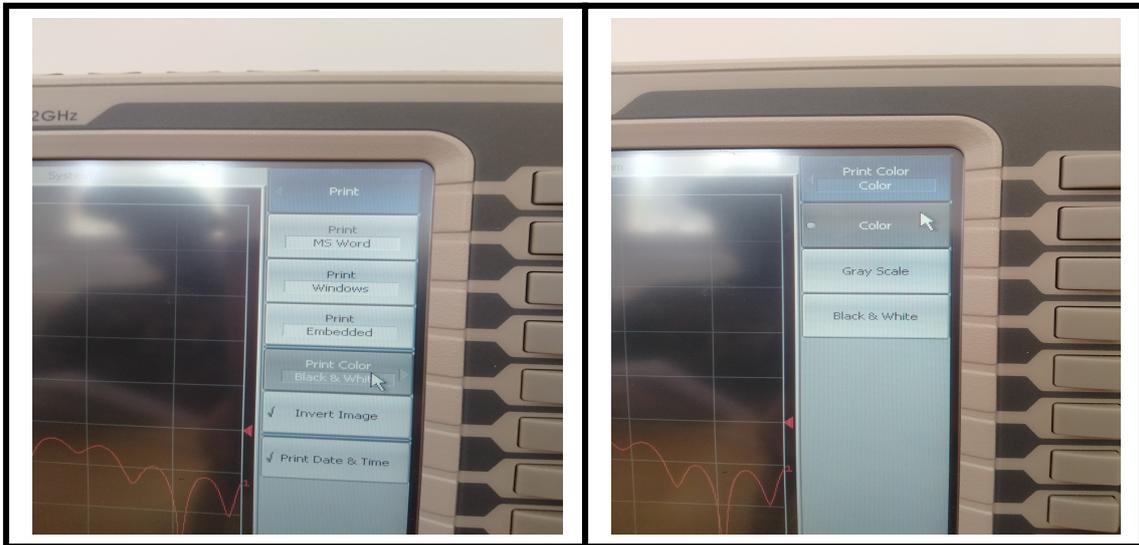
- A partir du tracé de S11, extraire la fréquence de résonance, la bande passante et les autres caractéristiques comme expliqué en détails dans les Chapitres 3 et 4,
- Pour mesurer le S21, il faut brancher une deuxième antenne au port 2 du VNA puis activer la touche S21 sur le sous-menu « Mesurment »,



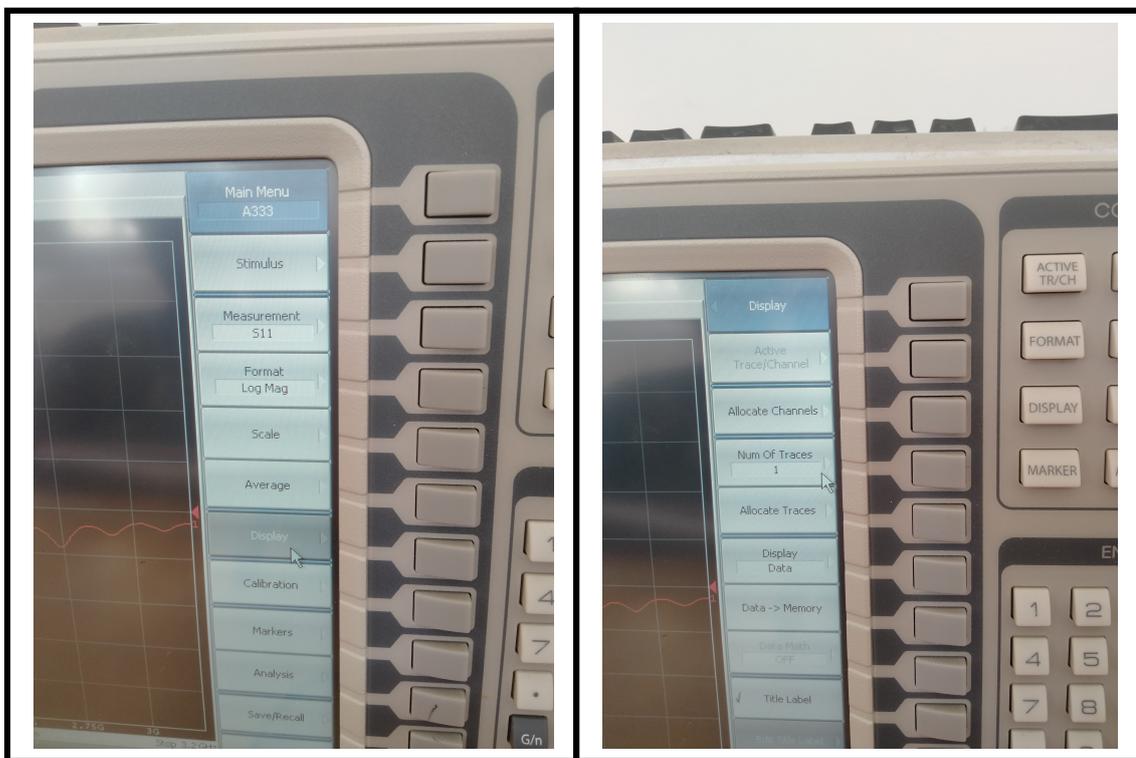
- Pour enregistrer les graphes sous format image en niveaux de gris, on procède comme suit : System>Print>PrintWindows



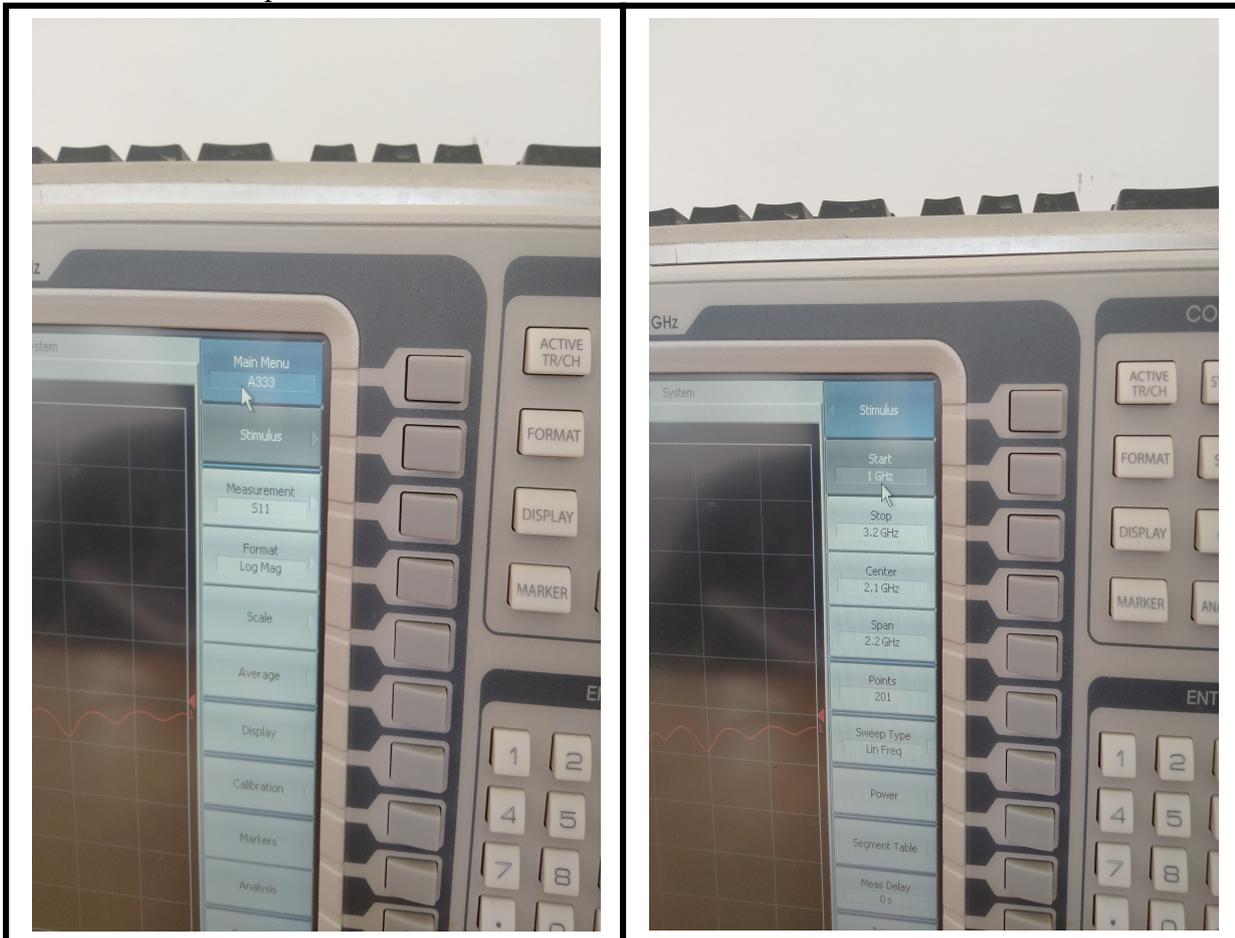
Si une impression couleur est exigée, on doit passer par : System>Print>Print Color>Color> PrintWindows,



- Pour sauvegarder l'image chez le manipulateur, il faut tout d'abord brancher une clé USB formatée et scannée pour ne pas endommager le VNA puis la récupérer du répertoire « Windows »,
- Pour afficher des tracés multiples, procéder comme suit sur le menu principal: Display>Num Of Traces>Choisir un nombre.



- Pour personnaliser la bande passante affichée, on procède comme suit sur le menu principal : Stimulus>Start pour fixer la fréquence minimale f_{\min} et Stimulus>Stop pour fixer la fréquence maximale f_{\max} .



II- Fonctionnement et mode d'utilisation du l'analyseur du spectre

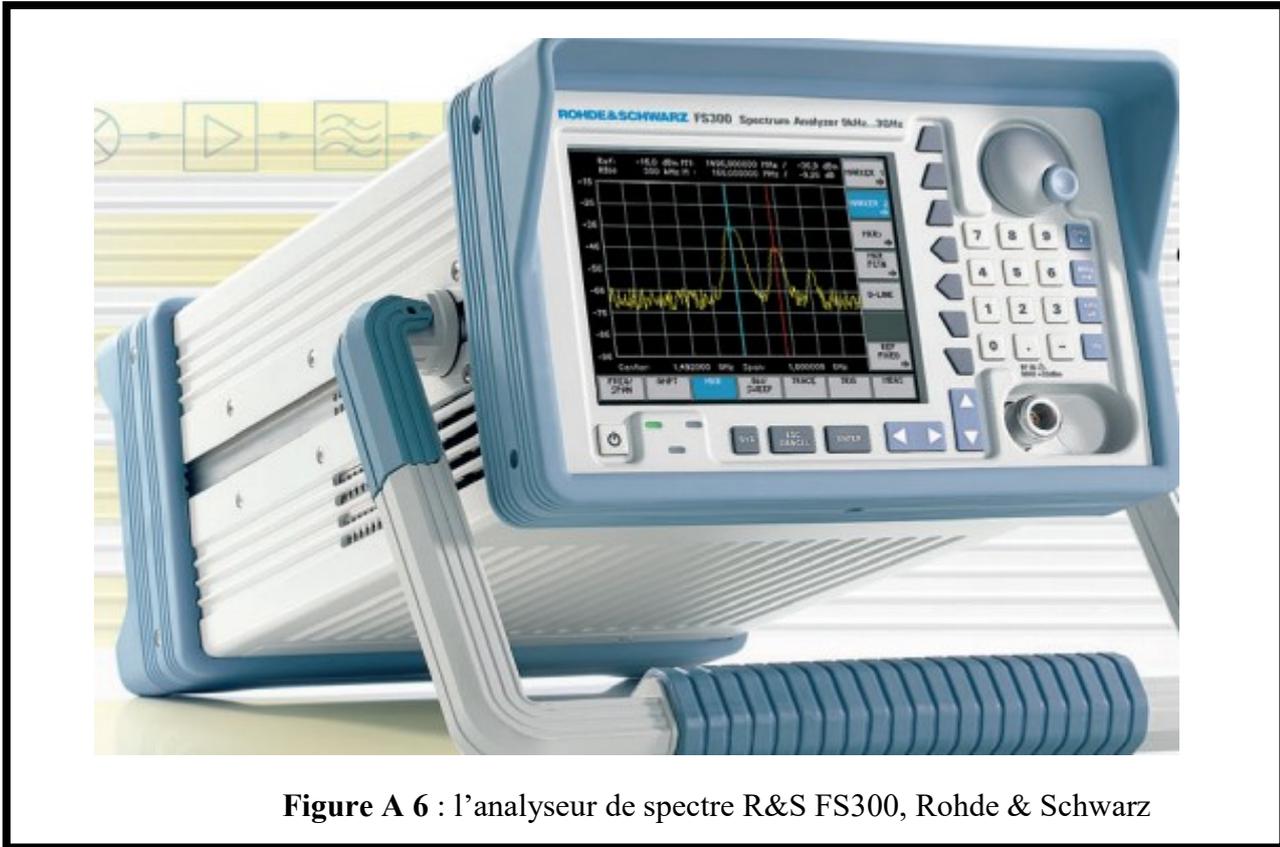
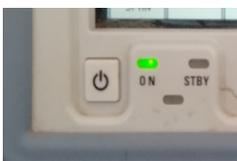


Figure A 6 : l'analyseur de spectre R&S FS300, Rohde & Schwarz

Définition de l'analyseur de spectre :

Un analyseur de spectre est un instrument de mesure destiné à afficher un signal dans le domaine fréquentiel contrairement à un oscilloscope qui affiche le signal dans le domaine temporel. Les signaux peuvent être de natures diverses : électrique, optique, sonore, radioélectrique.

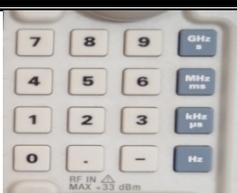
Il se compose de :



La touche ON :

L'interrupteur ON bascule entre On et États de veille de l'analyseur. Pour allumer l'analyseur cliquez deux fois sur cette touche.

Même pour étendre l'analyseur cliquer sur cette touche



Clavier d'ENTREE :

Les touches d'entrée vous permettent d'entrer directement des Chiffres données en GHz et MHz et KHz et le Hz .



SYS : pour entré au système.

ESC CANCEL : pour annulez le ESC.

ENTER : ce touche permettre de l'entrer de

Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes

Les Touches fonctionnelles

Les touches fonctionnelles contrôlent les fonctions de l'Analyseur avec les Touche logicielle

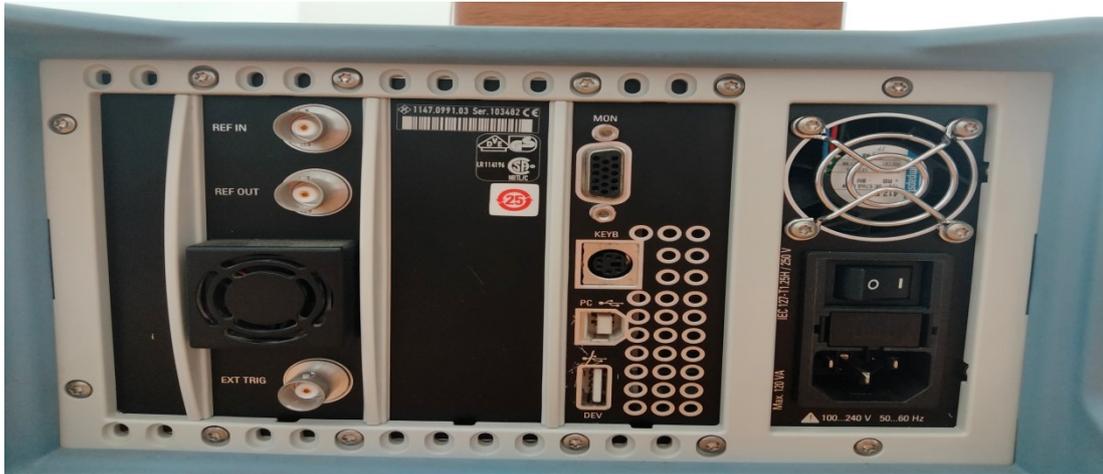
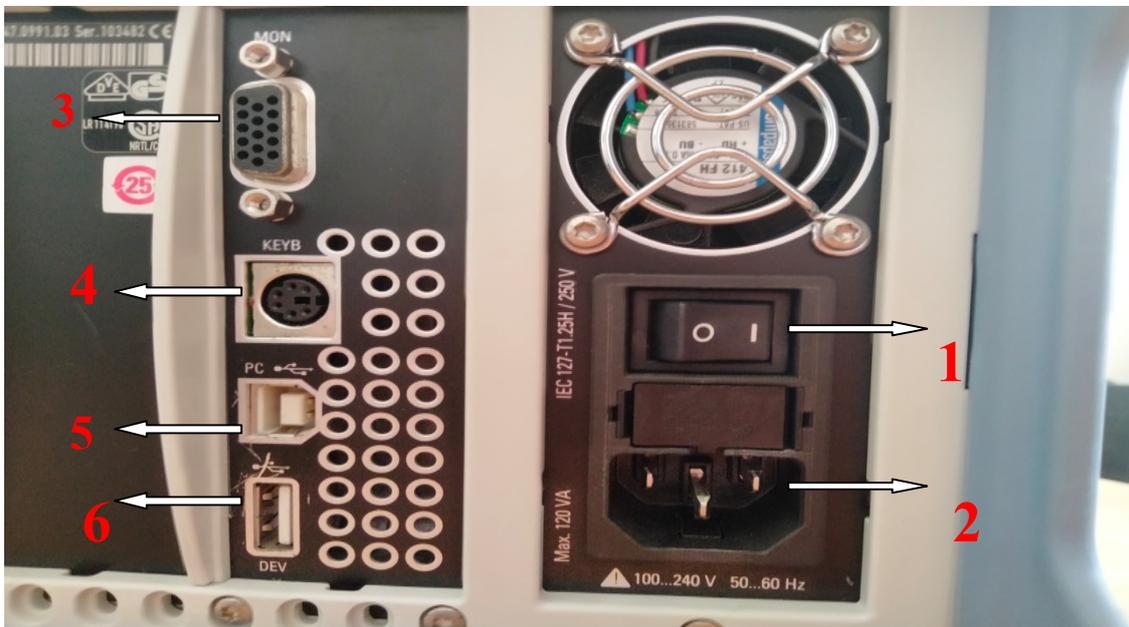
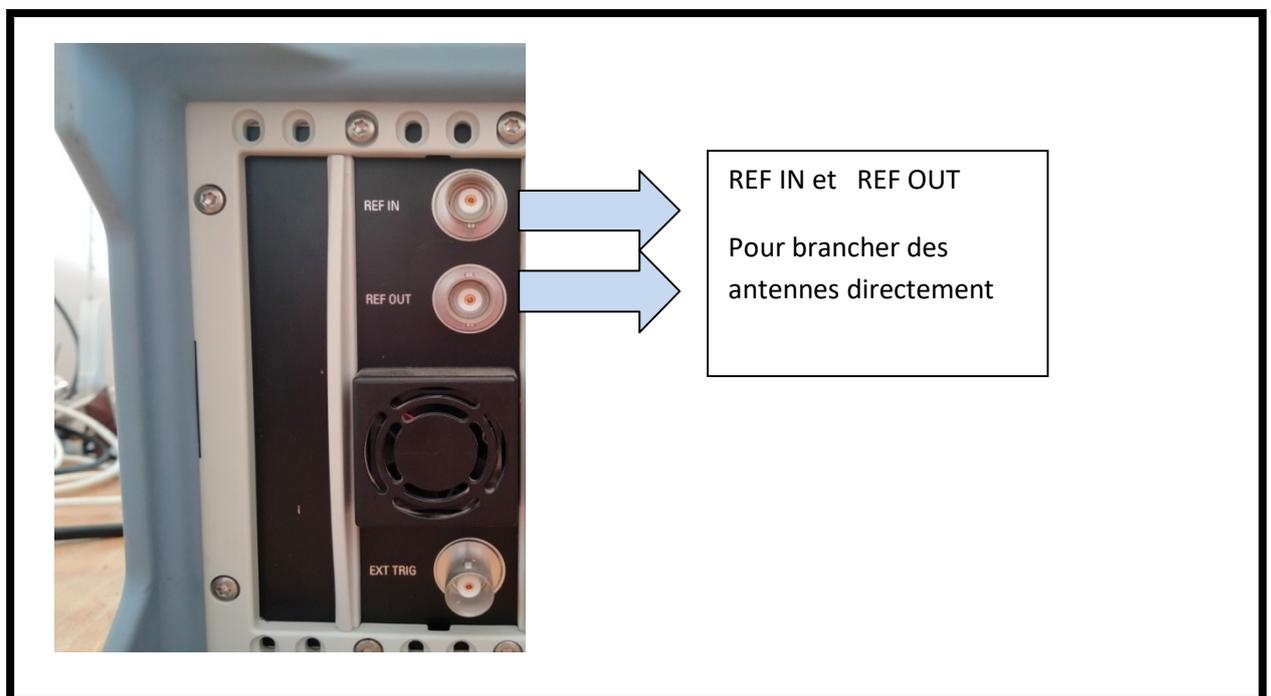


Figure A 7: l'interface arrière de l'analyseur de spectre R&S FS300, Rohde & Schwarz



Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes

1	Touche d'alimentation
2	l'alimentation
3	Lecteur HDMI
4	Connecteur PS /2
5	Lecteur PC
6	Lecteur USB



TP1 : Caractérisation d'une antenne dipôle

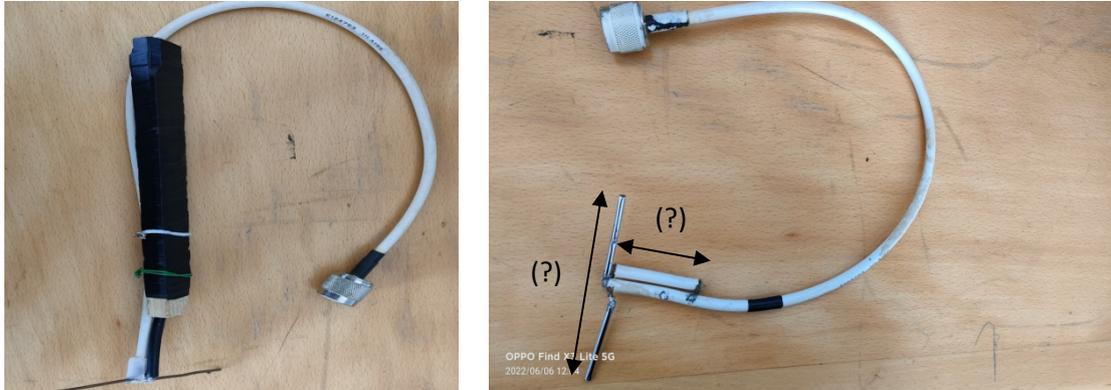


Figure I : Antenne dipôle $\lambda/2$ de $f_r = 1.8$ GHz

Objectifs de TP

L'antenne dipolaire, élaborée par Heinrich Rudolph Hertz vers 1886, est une antenne constituée de deux brins métalliques, alimentée en son milieu et destinée à transmettre ou recevoir de l'énergie électromagnétique. L'objectif de ce TP est la caractérisation de cette antenne.

Partie Théorique (à préparer à l'avance)

1. Présentation de l'antenne dipôle/dipôle demi-onde
2. Etude analytique de l'antenne dipôle demi-onde (Rayonnement, Gain,...)

Travail à réaliser :

1. Brancher l'antenne dipôles à caractériser sur le port 1 du VNA comme montré sur la Figure TP1.1
2. Représenter la courbe de variation de coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence
3. Mesurer la fréquence de résonance de l'antenne. En déduire la longueur d'onde λ .

Fascicules de Travaux pratiques d'Antennes

4. Déterminer les dimensions de cette antenne filaire marquées par (?)
5. Déterminer à partir du tracé du S_{11} la bande passante de fréquence à -10 dB. En déduire le rapport $100 \frac{(f_H - f_L)}{f_c}$ Que conclure ?
6. Calculer la distance d correspondante à la zone lointaine (zone de Fraunhofer).
7. Brancher la 2^{ème} antenne dipôle sur le port 2 du VNA
 - 7.1. Calculer l'atténuation physique due aux pertes dans l'espace libre
 - 7.2. Représenter le tracé du paramètre S_{11} et S_{21} simultanément sur le même graphe en utilisant le VNA
 - 7.3. A partir du tracé de la question 7.2), déterminer S_{21} en dB puis S_{21} linéaire à la fréquence centrale
 - 7.4. Calculer le gain de puissance $\frac{P_r}{P_e}$
 - 7.5. Calculer le gain de l'antenne dipôles G en utilisant la formule suivante :
$$G = \frac{(4\pi r)}{\lambda} (S_{21})$$
8. Calculer la densité de puissance du rayonnement EM ambiant en passant par les étapes suivantes :
 - 8.1. Brancher l'antenne sur l'analyseur de spectre comme le montre la Figure TP1.2
 - 8.2. Prélever la puissance captée par l'antenne en dBm et en mW, notée P_c en supposant que l'antenne est parfaitement adaptée (c-à-d. $P_{re\grave{c}ue} = P_c$). Rappelons que la lecture de P_c est faite à la fréquence de résonance. Vérifier si la condition $P_r \approx P_c$ peut être applicable sachant que : $P_r = (1 - S_{11}) P_c$.
 - 8.3. En déduire la densité de puissance du rayonnement EM ambiant p en utilisant la formule : $p = \frac{P_c \times 4\pi}{G_r \lambda^2}$
 - 8.4. Calculer le champ électrique ambiant E
9. Etablir une communication entre deux téléphones portables sur un réseau mobile fonctionnel (Mobilis, Djezzy ou Ooreedo)
 - 9.1. Prélever la puissance captée par l'antenne en liaison montante (en dBm et en mW), notée P_c en supposant que l'antenne est parfaitement adaptée (c-à-d. $P_{re\grave{c}ue} = P_c$). Rappelons que la lecture de P_c est faite à la fréquence $f = 1.7$ GHz. Vérifier si la condition $P_r \approx P_c$ peut être applicable sachant que : $P_r = (1 - S_{11}) P_c$.
 - 9.2 Refaire les étapes 8.1 à 8.4 en considérant la liaison descendante ($f = 1.8$ GHz).

TP2 : Caractérisation d'une antenne Yagi- Uda

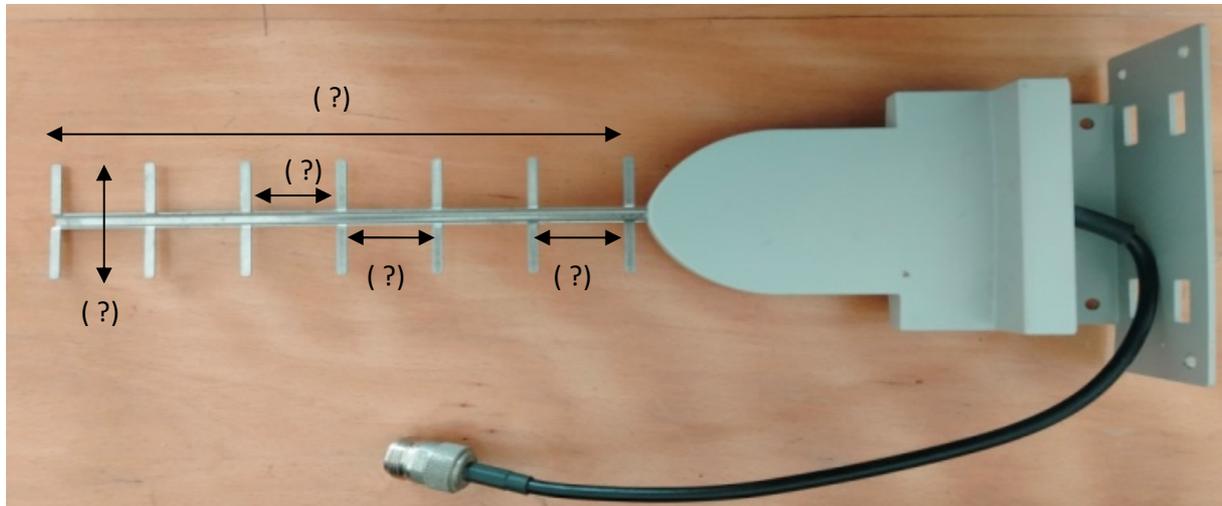


Figure II : antenne dipôles log-périodique.

Objectifs de TP

L'antenne Yagi-Uda, élaborée par Hidetsugu Yagi et Shintaro Uda en 1926 au Japon, cette antenne est installée dans des millions de résidences de par le monde, servant à la réception Des ondes radio et de télévision. L'objectif de ce TP est la caractérisation de cette antenne.

Partie Théorique (à préparer à l'avance)

1. Présentation de l'antenne Yagi-Uda
2. Etude analytique de l'antenne Yagi-Uda (Rayonnement, Gain,...)

Travail à réaliser :

1. Brancher l'antenne Yagi à caractériser sur le port 1 du VNA comme montré sur la Figure TP2.2
2. Représenter la courbe de variation de coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence
3. Mesurer la fréquence de résonance de l'antenne. En déduire la longueur d'onde λ .
4. Déterminer les dimensions de cette antenne filaire marquées par (?)
5. Déterminer à partir du tracé du S_{11} la bande passante de fréquence à -10 dB . En déduire le rapport $100 \frac{(f_H - f_L)}{f_c}$ Que conclure ?
6. Calculer la distance d correspondante à la zone lointaine (zone de Fraunhofer).
7. Brancher la 2^{ème} antenne Yagi sur le port 2 du VNA
 - 7.1 Calculer l'atténuation physique due aux pertes dans l'espace libre
 - 7.2 Représenter le tracé du paramètre S_{11} et S_{21} simultanément sur le même graphe en utilisant le VNA
 - 7.3 A partir du tracé de la question 7.2), déterminer S_{21} en dB puis S_{21} linéaire à la fréquence centrale
 - 7.4 Calculer le gain de puissance $\frac{P_r}{P_e}$
 - 7.5 Calculer le gain de l'antenne Yagi G en utilisant la formule suivante :
$$G = \frac{(4\pi r)}{\lambda} (S_{21})$$
8. Calculer la densité de puissance du rayonnement EM ambiant autour de la fréquence 2.45 GHz en passant par les étapes suivantes :
 - 8.1. Brancher l'antenne sur l'analyseur de spectre comme le montre la Figure TP1.2
 - 8.2. Prélever la puissance captée par l'antenne en dBm et en mW, notée P_c en supposant que l'antenne est parfaitement adaptée (c-à-d. $P_{\text{reçue}} = P_c$). Rappelons que la lecture de P_c est faite à la fréquence de résonance. Vérifier si la condition $P_r \approx P_c$ peut être applicable sachant que : $P_r = (1 - S_{11}) P_c$.
 - 8.3. En déduire la densité de puissance du rayonnement EM ambiant p en utilisant la formule : $p = \frac{P_c \times 4\pi}{G_r \lambda^2}$
 - 8.4. Calculer le champ électrique ambiant E

TP 3 : Caractérisation d'une antenne patch

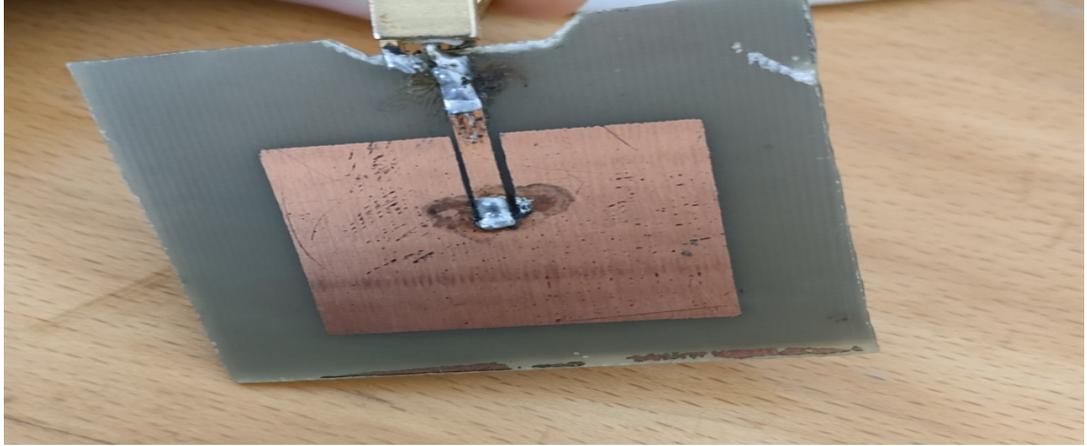


Figure III : L'antenne patch 2.5 GHz et ces dimensions.

Objectifs de TP

L'antenne planaire ou *patch* (en anglais) est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, et est donc favorable à une production industrielle. Le concept d'antenne patch est apparu dans les années 1950, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970. L'objectif de ce TP est la caractérisation d'une antenne patch de forme rectangulaire.

2 Partie Théorique (à préparer à l'avance)

1. Présentation de l'antenne Patch
2. Etude analytique de l'antenne patch rectangulaire (Rayonnement, Gain,...)

Travail à réaliser

- 1- Brancher l'antenne Patch à caractériser sur le port 1 du VNA comme montré sur la Figure TP3.3
- 2- Représenter la courbe de variation de coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence
- 3- Mesurer la fréquence de résonance de l'antenne. En déduire la longueur d'onde λ .
- 4- Déterminer les dimensions de cette antenne imprimée marquées par (?)
- 5- Déterminer à partir du tracé du S_{11} la bande passante de fréquence à -10 dB. En déduire le rapport $100 \frac{(f_H - f_L)}{f_c}$. Que conclure ?
- 6- Calculer la distance d correspondante à la zone lointaine (zone de Fraunhofer).
- 7- Brancher la 2^{ème} antenne patch sur le port 2 du VNA
 - 7.1 Calculer l'atténuation physique due aux pertes dans l'espace libre
 - 7.2. Représenter le tracé du paramètre S_{11} et S_{21} simultanément sur le même graphe en utilisant le VNA
 - 7.3 A partir du tracé de la question 7.2), déterminer S_{21} en dB puis S_{21} linéaire à la fréquence centrale
 - 7.4 Calculer le gain de puissance P_r/P_e
8. Calculer la densité de puissance du rayonnement EM ambiant autour de la fréquence 2.5 GHz en passant par les étapes suivantes :
 - 8.1. Brancher l'antenne sur l'analyseur de spectre comme le montre la Figure TP1.2
 - 8.2. Prélever la puissance captée par l'antenne en dBm et en mW, notée P_c en supposant que l'antenne est parfaitement adaptée (c-à-d. $P_{\text{reçue}}=P_c$). Rappelons que la lecture de P_c est faite à la fréquence de résonance. Vérifier si la condition $P_r \approx P_c$ peut être applicable sachant que : $P_r = (1 - S_{11}) P_c$.
 - 8.3. En déduire la densité de puissance du rayonnement EM ambiant p en utilisant la formule : $p = \frac{P_c \times 4\pi}{G_r \lambda^2}$
 - 8.4. Calculer le champ électrique ambiant E

TP4 : Caractérisation d'une antenne Pifa



Figure IV : Antenne PIFA.

Objectifs de TP

L'antenne PIFA est le résultat de la transformation de l'antenne IFA (Inverted F Antenna) d'un élément filaire horizontale à une structure planaire afin de compenser ses pertes de désadaptation et améliorer ses caractéristiques de rayonnement, cette structure est constituée d'un élément rayonnant métallique parallèle au plan de masse. L'objectif de cette TP est la caractérisation de cette antenne.

Partie Théorique (à préparer à l'avance)

1. Propriétés et conception de l'antenne PIFA

Travail à réaliser

1. Brancher l'antenne PIFA à caractériser sur le port 1 du VNA comme montré sur la Figure TP6.1
 2. Représenter la courbe de variation de coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence
 3. Mesurer la fréquence de résonance de l'antenne. En déduire la longueur d'onde λ .
 4. Déterminer à partir du tracé du S_{11} la bande passante de fréquence à -10 dB. En déduire le rapport $100 \frac{(f_H - f_L)}{f_c}$ Que conclure ?
 5. Calculer la distance d correspondante à la zone lointaine (zone de Fraunhofer).
 6. Brancher la 2^{ème} antenne PIFA sur le port 2 du VNA
- 7.1 Calculer l'atténuation physique due aux pertes dans l'espace libre
 - 7.2 Représenter le tracé du paramètre S_{11} et S_{21} simultanément sur le même graphe en utilisant le VNA
 - 7.3 A partir du tracé de la question 7.2), déterminer S_{21} en dB puis S_{21} linéaire à la fréquence centrale
 - 7.4 Calculer le gain de puissance $\frac{P_r}{P_e}$
 - 7.5 Calculer le gain de l'antenne PIFA G en utilisant la formule suivante :
$$G = \frac{(4\pi r)}{\lambda}(S_{21})$$
8. Calculer la densité de puissance du rayonnement EM ambiant autour de 2.5 GHz en passant par les étapes suivantes :
 - 8.1. Brancher l'antenne sur l'analyseur de spectre comme le montre la Figure TP6.2
 - 8.2. Prélever la puissance captée par l'antenne en dBm et en mW, notée P_c en supposant que l'antenne est parfaitement adaptée (c-à-d. $P_{re\grave{c}ue}=P_c$). Rappelons que la lecture de P_c est faite à la fréquence de résonance. Vérifier si la condition $P_r \approx P_c$ peut être applicable sachant que : $P_r = (1 - S_{11}) P_c$.
 - 8.3. En déduire la densité de puissance du rayonnement EM ambiant p en utilisant la formule : $p = \frac{P_c \times 4\pi}{G_r \lambda^2}$
 - 8.4. Calculer le champ électrique ambiant E

9. Etablir une communication entre deux téléphones portables sur un réseau mobile fonctionnel (Mobilis, Djazzy ou Ooredoo)

9.1. Prélever la puissance captée par l'antenne en liaison montante à 1710 MHz (en dBm et en mW), notée P_c en supposant que l'antenne est parfaitement adaptée (c-à-d. $P_{reçue}=P_c$). Rappelons que la lecture de P_c est faite à la fréquence $f=1.7$ GHz. Vérifier si la condition $P_r \approx P_c$ peut être applicable sachant que : $P_r=(1-S_{11}) P_c$.

9.2 Refaire les étapes 8.1 à 8.4 en considérant la liaison descendante ($f=1.8$ GHz).