

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par : Nabil Mohamed Noredine DAHO

Sujet

Etude et Conception des Antennes Reconfigurables dans les Réseaux Radio Cognitifs Destinés aux Applications Médicales

Soutenu publiquement, le **28 /06/2021**, devant le jury composé de :

Mr. FEHAM Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr. MERZOUGUI Rachid	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. BABA-AHMED Mohammed Zakarya	M.C.A	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. RABAH Mohammed Amin	M.R.A	CDS Oran	Co-Encadreur

Année universitaire : **2021 /2022**

Remerciements...

Alhamdou lil'Allah, de m'avoir permis la reprise de mes études après un parcours assez atypique marqué par un long arrêt d'études universitaires, de pouvoir réussir ces deux années de master avec brio et de couronner tout cela par le fameux sésame qu'est le diplôme de master en télécommunications.

Je tiens à remercier mes encadreur à savoir Mr. BABA-AHMED Mohammed Zakarya et Mr. RABAH Mohammed Amin, pour la qualité de l'encadrement et leur disponibilité.

Aux membres du jury que je tiens à remercier pour l'évaluation de notre travail.

À tous mes enseignants que j'ai eus en Master 1&2, que je remercie tant pour leurs compréhensions.

À la prunelle de mes yeux, ma mère, que je ne cesserai jamais de remercier pour son soutien indéfectible.

À Mme. MAMECHAOUI Sarra, pour ses précieux conseils prodigués et son dévouement tout au long du parcours.

À Mr. ZIANI-KERARTI Djalal pour sa disponibilité et son aide si précieuse.

À Mlle. TALEB Rahma, pour son investissement, ses encouragements et prières.

À Mr. MAZOUZ Benali et à toute l'équipe EMRT TLEMCEN, en qui j'exprime toute ma gratitude et mes remerciements.

Au risque d'omettre toute personne qui a contribué de loin comme de près à ce projet, je tiens à la remercier du fond du cœur.

Résumé

Une antenne est dite agile (ou reconfigurable) si elle est capable de modifier dynamiquement sa fonctionnalité après sa fabrication, c'est-à-dire de modifier une ou plusieurs de ses caractéristiques de fonctionnement. L'agilité en fréquence est très utilisée dans les communications sans fil et mobiles à cause de la croissance importante et continue du nombre des standards à utiliser pour chaque système de télécommunication et de leurs exigences en termes de qualité et de nombre d'utilisateurs.

La gestion dynamique et optimale de l'allocation du spectre radio devient un problème majeur dans les réseaux. Divers facteurs peuvent causer des dommages et des interférences entre différents utilisateurs du même spectre radio. La radio cognitive apporte une solution idéale et équilibrée à ces types de problèmes (surcharge et congestion du spectre). Le concept de radio cognitive est basé sur l'utilisation flexible de toute bande de fréquences disponible du spectre radioélectrique qui pourrait être détectée.

Notre dilemme est de satisfaire les utilisateurs secondaires (dite de radio cognitive) ayant des exigences liées au domaine médical grâce à des antennes reconfigurable et flexible dans diverses bandes de fréquences avec une utilisation variée du spectre radio sur des applications médicales.

Mots clés : *Réseaux de radio cognitive, gestion du spectre, antennes reconfigurables, adaptation, fréquence de résonance, applications médicales.*

Abstract

An antenna is said to be agile (or reconfigurable) if it is able to dynamically modify its functionality after its manufacture, that is, to modify one or more of its operating characteristics. Frequency agility is widely used in wireless and mobile communications because of the significant and continuous growth in the number of standards to be used for each telecommunications system and their requirements in terms of quality and number of users.

Dynamic and optimal management of radio spectrum allocation is becoming a major problem in networks. Various factors can cause damage and interference between different users of the same radio spectrum. Cognitive radio provides an ideal and balanced solution to these types of problems (spectrum overload and congestion). The concept of cognitive radio is based on the flexible use of any available frequency band of the radio spectrum that could be detected.

Our dilemma is to satisfy secondary users (so-called cognitive radio) with requirements related to the medical field through reconfigurable and flexible antennas in various frequency bands with a varied use of the radio spectrum on medical applications.

Keywords: *Cognitive radio networks, spectrum management, reconfigurable antennas, adaptation, resonance frequency, medical applications*

ملخص

يقال إن الهوائي رشيق (أو قابل لإعادة التكوين) إذا كان قادرا على تعديل وظائفه ديناميكيا بعد تصنيعه، أي تعديل واحد أو أكثر من خصائص تشغيله. تستخدم خفة الحركة الترددية على نطاق واسع في الاتصالات اللاسلكية والمتنقلة بسبب النمو الكبير والمستمر في عدد المعايير التي سيتم استخدامها لكل نظام اتصالات ومتطلباتها من حيث الجودة وعدد المستخدمين.

أصبحت الإدارة الديناميكية والمثلى لتوزيع الطيف الراديوي مشكلة رئيسية في الشبكات. يمكن أن تسبب عوامل مختلفة أضرارا وتداخلا بين مختلف المستخدمين من نفس الطيف الراديوي. يوفر الراديو المعرفي حلا مثاليا ومتوازنا لهذه الأنواع من المشاكل (الحمل الزائد والازدحام الطيفي). يعتمد مفهوم الراديو المعرفي على الاستخدام المرن لأي نطاق تردد متاح من الطيف الراديوي يمكن اكتشافه.

تتمثل معضلتنا في إرضاء المستخدمين الثانويين (ما يسمى الراديو المعرفي) بالمتطلبات المتعلقة بالمجال الطبي من خلال هوائيات مرنة قابلة لإعادة التكوين في نطاقات تردد مختلفة مع استخدام متنوع للطيف الراديوي في التطبيقات الطبية.

الكلمات الرئيسية: الشبكات الراديوية المعرفية، وإدارة الطيف، والهوائيات القابلة لإعادة التكوين، والتكيف، وتردد الرنين، والتطبيقات الطبية.

Table des matières

Remerciement	I
Résumé	II
Table des matières	IV
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Acronymes et abréviations	XII
Introduction générale	1

Chapitre I : La technologie de la radio cognitive

I.1 Introduction	5
I.2 La radio logicielle (Software Radio)	5
I.3 La radio logicielle restreinte (SDR)	5
I.4 La radio cognitive	6
I.5 Architecture de la radio cognitive	6
I.6 Relation entre radio cognitive et radio logicielle	7
I.7 Cycle de cognition	8
I.7.1 Phase d'observation (détecter et percevoir)	9
I.7.2 Phase d'orientation	9
I.7.3 Phase de planification	9
I.7.4 Phase de décision	10
I.7.5 Phase d'action	10
I.7.6 Phase d'apprentissage	10
I.8 Composantes de la radio cognitive	10
• Emetteur / Récepteur:	11
• Analyseur de spectre (Spectrum analyzer):	11

• Prise de décision (Decision making): _____	12
I.9. Fonctions de la radio cognitive _____	12
I.9.1. Détection du spectre (Spectrum sensing) _____	12
I.9.2. Gestion du spectre (Spectrum management) _____	12
I.9.3. Mobilité du spectre (Spectrum mobility) _____	12
I.10. Domaines d'applications de la radio cognitive _____	13
I.10.1. Les réseaux sans fil de prochaine génération _____	13
I.10.2. Catégories des réseaux sans fil _____	13
I.10.2.1 WBAN (Wireless Body Area Network) _____	13
I.10.2.2 WPAN (Wireless Personal Area Network): _____	14
I.10.2.3 WLAN (Wireless Local Area Network) _____	14
I.10.2.4 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) _____	14
I.10.2.5 WWAN (Wireless Wide Area Network) _____	14
I.10.2.6 WRAN (Wireless Regional Area Network) _____	15
I.10.3 Différents types de réseaux sans fil _____	15
I.10.3.1. Réseaux utilisant les ondes infrarouges _____	15
I.10.3.2 Réseaux utilisant les ondes radio _____	15
I.10.3.2.1 Bluetooth _____	15
I.10.3.2.2 Home RF (Home Radio Frequency) _____	15
I.10.3.2.3 HiperLAN (High Performance LAN) _____	16
I.10.3.2.4. Norme IEEE 802.11 _____	16
a) Norme 802.11a _____	16
b) Norme 802.11af _____	16
c) Norme 802.11b (Wi-Fi) _____	17
d) Norme 802.11g _____	17
e) Norme 802.11i _____	17
f) Norme 802.11e _____	17
g) Norme 802.11n _____	18
I.10.3.2.5 WiMAX _____	18
I.10.4. Norme IEEE 802.22 _____	19
I.10.5. La coexistence de différentes technologies sans fil _____	19
I.10.6. Services de cyber santé (e-Health Services) _____	20

I.10.7. Réseaux militaires	20
I.11. Conclusion	20

Chapitre II : Les antennes reconfigurables

II.1 Introduction	23
II.2 Les caractéristiques des antennes	23
II.2.1 Impédance, fréquence de fonctionnement et bande passante	23
II.2.2 Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (TOS)	25
II.2.3 Caractéristiques de rayonnement	25
II.2.4 Polarisation	27
II.3 Types des antennes	28
II.3.1 Les antennes filaires	28
II.3.2 Les antennes directives	29
II.3.2.1 Antenne cornet	29
II.3.2.2 Antenne à transition progressive (Vivaldi)	29
II.3.3 Les antennes à fente	30
II.3.4 Le dipôle demi-onde	31
II.3.5 Les antennes paraboliques	31
II.3.6 Antennes omnidirectionnelles	32
II.3.6.1 Antenne biconique	32
II.3.6.2 Antenne Discône	33
II.3.7 Antenne log-périodique	33
II.3.8 Antenne Patch (micro-ruban)	34
II.3.8.1 Description d'une antenne imprimée	34
II.3.8.2 Structure d'une antenne imprimée	34
II.3.8.3 Les paramètres géométriques d'une antenne imprimée	35
a) Largeur du patch	35
b) Longueur du patch	36
c) Choix du substrat	36
II.3.8.4 Techniques d'alimentation	37
a) Alimentations par contact	37

• Alimentation par une ligne micro-ruban _____	37
• Alimentation coaxiale directe _____	37
b) Alimentations par proximité _____	38
• Alimentation par couplage électromagnétique _____	38
• Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse _____	38
II.3.9 Techniques d'adaptation des antennes patch _____	39
II.3.9.1 Adaptation par ligne quart d'onde _____	39
II.3.9.2 Adaptation par STUB _____	39
II.3.9.3 Adaptation avec encoche _____	40
II.3.10 Avantages et inconvénients des antennes imprimées _____	40
II.3.10.1 Avantages _____	40
II.3.10.2 Inconvénients _____	40
II.3.11 Applications des antennes patch _____	41
II.4 Les antennes reconfigurables _____	41
II.4.1 Définition _____	41
II.4.2 La nécessité de la reconfiguration _____	42
II.4.3 Technologie Ultra Large Bande _____	42
II.4.4 Les techniques de reconfiguration _____	43
II.4.4.1 Diode PIN _____	44
II.4.4.3 Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) _____	45
II.4.4.4 Les matériaux agiles _____	46
II.4.4.5 Commutateur optique _____	46
II.4.5 Classification de reconfiguration _____	46
II.4.5.1 La reconfiguration en fréquence _____	46
➤ Principe de la reconfiguration en fréquence _____	47
II.4.5.2 La reconfiguration en rayonnement _____	48
II.4.5.3 La reconfiguration en polarisation _____	49
II.4.6 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable _____	50
II.4.7 Conclusion _____	51

Chapitre III : Conception et simulation des antennes reconfigurables pour l'imagerie médicale

III.1 Introduction	53
III.2 Modélisation par commutation	54
III.2.1 Conception d'une antenne patch rectangulaire reconfigurable en fréquence	54
III.2.2 Outil de simulation	55
III.2.3 Géométrie de l'antenne simulée	55
III.2.4 Antenne patch à fente reconfigurable en fréquence	57
III.2.5 Résultats de la simulation	57
III.3 Reconfiguration par insertion des diodes PIN	61
III.3.1 Résultats de la simulation	63
III.4 Conclusion	74
Conclusion générale	77
Bibliographie	78

Liste des figures

Chapitre I : La technologie de la radio cognitive

<i>Figure I.1 : Architecture d'un système radio cognitive</i>	6
<i>Figure I.2 : Schéma simplifié de la radio cognitive</i>	7
<i>Figure I.3 : Cycle de cognition de Mitola</i>	8
<i>Figure I.4 : Cycle de cognition simplifié</i>	8
<i>Figure I.5 : Composantes de la radio cognitive</i>	11
<i>Figure I.6 : Fonctions de la Radio Cognitive</i>	13
<i>Figure I.7 : Catégories des réseaux sans fil</i>	13
<i>Figure I.8 : Le WiMAX et ses concurrents</i>	19

Chapitre II : Les antennes reconfigurables

<i>Figure II.1 : Exemple de coefficient de réflexion et de la bande passante associée</i>	25
<i>Figure II.2 : Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive</i>	26
<i>Figure II.3 : Exemple de diagramme de rayonnement en 3D d'une antenne</i>	27
<i>Figure II.4 : Les types de polarisation</i>	28
<i>Figure II.5 : Antenne Filaire et antenne Yagi</i>	28
<i>Figure II.6 : Différents types d'antennes Cornet</i>	29
<i>Figure II.7 : Différentes structures de l'antenne Vivaldi</i>	29
<i>Figure II.8 : Antenne Vivaldi</i>	30
<i>Figure II.9 : Antenne à fentes</i>	30
<i>Figure II.10 : Dipôle demi-onde</i>	31
<i>Figure II.11 : Antenne parabolique</i>	31
<i>Figure II.12 : Antenne omnidirectionnelle</i>	32
<i>Figure II.13 : Les coordonnées cartésiennes d'une antenne omnidirectionnelle verticale et horizontale</i>	32
<i>Figure II.14 : Antenne Biconique</i>	33
<i>Figure II.15 : Antenne discône</i>	33
<i>Figure II.16 : Antenne Log-périodique</i>	34
<i>Figure II.17 : Présentation d'une antenne imprimée</i>	35
<i>Figure II.18 : Différentes formes d'antennes micro-ruban</i>	35
<i>Figure II.19 : Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban</i>	37
<i>Figure II.20 : Alimentation coaxiale directe</i>	38

Figure II.21 : Alimentation par couplage électromagnétique	38
Figure II.22 : Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse	39
Figure II.23 : Adaptation par ligne quart d'onde	39
Figure II.24 : Adaptation par STUB	39
Figure II.25 : Adaptation avec encoche	40
Figure II.26 : La densité spectrale des différentes normes de communication	43
Figure II.27 : Les différentes techniques de reconfiguration	43
Figure II.28 : Le circuit équivalent d'une diode dans les états ON et OFF	44
Figure II.29 : Symbole et circuit équivalent d'une diode Varactor	45
Figure II.30 : Commutateur MEMS	45
Figure II.31 : (a) : Cristal liquide (PVA : Poly Vinyl Alcohol) et (b) : méta-matériau	46
Figure II.32 : Illustration de l'agilité fréquentielle	47
Figure II.33 : La reconfiguration de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b)	48
Figure II.34 : La reconfiguration en rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée	49
Figure II.35 : La reconfiguration en polarisation en utilisant une antenne PASS	50

Chapitre III : Conception et simulation des antennes reconfigurables pour l'imagerie médicale

Figure III. 1 : Antenne Patch rectangulaire à fente	55
Figure III. 2 : Outil de simulation CST Studio Suite 2019.....	55
Figure III. 3 : Dimension d'une antenne Patch rectangulaire à fente	56
Figure III. 4 : Forme de l'antenne simulée en (a) : avec languettes métalliques et en (b) : sans languettes	57
Figure III. 5 : Les six modes de l'antenne simulée	58
Figure III. 6 : Les coefficients de réflexion S11 des six modes.....	59
Figure III. 7 : Les taux d'ondes stationnaires VSWR des six modes	59
Figure III. 8 : Les gains en fonction de la fréquence des six modes.....	60
Figure III. 9 : Diagramme de rayonnement en (a) : 2D ; (b) : 3D, à $f = 2.5$ GHz.....	60
Figure III. 10 : Diagramme de rayonnement en (a) : 2D ; (b) : 3D, à $f = 2.75$ GHz	60
Figure III. 11 : Antenne Patch simulée en utilisant les diodes PIN ; en (a) : Une diode, en (b) : Trois diodes, en (c) : Cinq diodes.....	62
Figure III. 12 : Les coefficients de réflexion du mode M1.....	63

Figure III. 13: en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence ; (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.75$ GHz du premier mode M1.	64
Figure III. 14: Courbes des coefficients de réflexion de la 1ère comparaison du mode M2	65
Figure III. 15: en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence ; (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.76$ GHz lors de la 1ère comparaison du mode M2.....	66
Figure III. 16: Courbes des coefficients de réflexion de la 2ème comparaison du mode M2	67
Figure III. 17: en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D aux fréquences $f = 2.485$ et 2.746 GHz, lors de la 2ème comparaison du mode M2.	68
Figure III. 18: Courbes des coefficients de réflexion S11 de la 1ère comparaison du mode M3. ...	69
Figure III. 19 : (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.5$ et 2.75 GHz lors de la 1ère comparaison du mode M3.....	70
Figure III. 20: Courbes des coefficients de réflexion S11 de la 2ème comparaison du mode M3 ...	71
Figure III. 21: (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.45$ GHz lors de la 2ème comparaison du mode M3.....	71
Figure III. 22: Courbes des coefficients de réflexion S11 de la 3ème comparaison du mode M3. ...	72
Figure III. 23: (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence ; (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.52$ et 2.73 GHz lors de la 3ème comparaison du mode M3.	73

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les mode de fonctionnement de l'antenne reconfigurable	57
Tableau III.2 : Récapitulatif des fréquences de résonances et coefficients de réflexion respectifs des six modes	61

Acronymes et abréviations

AES	Advanced Encryption Standard.
BPSK	Binary Phase Shift Keying.
C	Capacité.
CST	Computer Simulation Technology.
dB	décibel.
DS	Design Studio.
FCC	Commission fédérale des communications.
FET	Field Effect Transistor.
GSM	Global System Mobile.
HyperLAN	High Performance Local Area Network.
ISM	Industrielles, Scientifiques et Médicales.
L	Inductance.
MCS	Modulation Coding Scheme.
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
MU-MIMO	Multi-User Multiple-Input Multiple-Output.
MWS	Micro-Wave Studio.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access.
PIN	Positif – Intrinsèque – Négatif.
PU	Primary User.
PVA	Poly Vinyl Alcohol.
QoI	Quality of Information.
QoS	Quality of Service.
R	Résistance.
RC	Radio Cognitive.
RF	Radio Frequency.
RL	Reflection Loss.
SDR	Radio logicielle restreinte.
SP	Sensory Perception.
STM	Short Term Memory.
SU	Secondary User.
TEC	Transistors à Effet de Champs.

TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
TOS	Taux d'Onde Stationnaire.
TSA	Tapered Slot Antenna.
TVWS	Television White Space.
ULB	Ultra Large Bande.
UWB	Ultra-Wide Band.
VariCap	Variable Capacity.
VNA	Vector Network Analyzer.
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio.
WBAN	Wireless Body Area Network.
WEP	Wired Equivalent Privacy.
Wi-Fi	Wireless Fidelity.
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
WLAN	Wireless Local Area Network.
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network.
WPA	Wireless Protected Access.
WPAN	Wireless Personal Area Network.
WRAN	Wireless Regional Access Network.
WWAN	Wireless Wide Area Network.

INTRODUCTION GENERALE

Le développement ultra rapide des technologies sans fil, marqué par l'apparition de nouveaux appareils intelligents, capables d'offrir des débits très élevés et des services innovants pour une variété d'applications de communication, a entraîné une demande très gourmande en termes de ressources spectrales.

Ces ressources peuvent être soit :

Sous licence : utilisées pour des services spécifiques.

Sans licence : disponible gratuitement pour les services sans fil et les besoins de la recherche (les bandes ISM : Industrielles, Scientifiques et Médicales).

Selon une étude faite par la commission fédérale des communications (FCC), la majorité des bandes de fréquences sont occupées par diverses applications et l'utilisation du spectre n'est pas uniforme ; les bandes sous licence sont sous-exploitées contrairement aux bandes ISM qui sont surchargées, créant ainsi une grande variation de l'utilisation des bandes de fréquences attribuées : de 15 % à 85 % sont occupées dans des emplacements particuliers et à des moments particuliers. C'est pour toutes ces raisons que la radio cognitive (RC) est apparue comme nouvelle technologie qui allie à la fois le domaine des télécommunications et celui de l'intelligence artificielle permettant ainsi d'exploiter le spectre existant de manière opportuniste et efficace tout en évitant les collisions et les interférences.

Le principe de la RC nécessite une gestion alternative du spectre, définie comme suit : un utilisateur secondaire (SU) pourra à tout instant accéder à des bandes de fréquence libres inoccupées par l'utilisateur primaire (PU) qui possède une licence sur cette bande.

Le SU devra céder les bandes de fréquence une fois le service terminé ou bien après qu'un PU voudra accéder à son propre spectre.

L'étude des paramètres d'une antenne est importante car elle permet de concevoir une antenne en fonction de son utilisation. L'objectif ultime de ce mémoire est de concevoir un modèle d'antenne reconfigurable intelligente qui permettra d'acquérir de meilleures performances et apportera de nouvelles possibilités pour le développement de la radio cognitive dans le domaine médical.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu général sur la radio logicielle ainsi que sur la radio cognitive et ses différents aspects : principes, architecture, fonctions et les différents domaines d'application.

Dans le chapitre qui suit, nous allons décrire les caractéristiques générales des antennes et définir quelques notions de base sur les antennes reconfigurables. Ensuite, on va s'atteler sur les antennes reconfigurables intelligentes, agiles et indispensables au développement des réseaux radio cognitive.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous allons concevoir avec l'outil CST, une antenne Patch rectangulaire, reconfigurable en fréquence, en utilisant une technique de modélisation par commutation et une méthode reconfiguration par les diodes PIN. Notre antenne sera conçue pour avoir un comportement radio cognitif grâce à la reconfiguration en fréquence et fonctionner dans un spectre fréquentiel compris entre 1 et 10 GHz au profit des applications médicales.

CHAPITRE I

La Technologie de la Radio Cognitive.

Sommaire

I.1 Introduction	5
I.2 La radio logicielle (Software Radio)	5
I.3 La radio logicielle restreinte (SDR)	5
I.4 La radio cognitive	6
I.5 Architecture de la radio cognitive	6
I.6 Relation entre radio cognitive et radio logicielle	7
I.7 Cycle de cognition	8
I.7.1 Phase d'observation (détecter et percevoir)	9
I.7.2 Phase d'orientation	9
I.7.3 Phase de planification	9
I.7.4 Phase de décision	10
I.7.5 Phase d'action	10
I.7.6 Phase d'apprentissage	10
I.8 Composantes de la radio cognitive	10
• Emetteur / Récepteur:	11
• Analyseur de spectre (Spectrum analyzer):	11
• Extraction de connaissances et apprentissage (Knowledge extraction/learning):	11
• Prise de décision (Decision making):	12
I.9. Fonctions de la radio cognitive	12
I.9.1. Détection du spectre (Spectrum sensing)	12
I.9.2. Gestion du spectre (Spectrum management)	12
I.9.3. Mobilité du spectre (Spectrum mobility)	12
I.10. Domaines d'applications de la radio cognitive	13
I.10.1. Les réseaux sans fil de prochaine génération	13
I.10.2. Catégories des réseaux sans fil	13
I.10.2.1 WBAN (Wireless Body Area Network)	13

La Technologie de la Radio Cognitive

I.10.2.2 WPAN (Wireless Personal Area Network):	14
I.10.2.3 WLAN (Wireless Local Area Network)	14
I.10.2.4 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)	14
I.10.2.5 WWAN (Wireless Wide Area Network)	14
I.10.2.6 WRAN (Wireless Regional Area Network)	15
I.10.3 Différents types de réseaux sans fil	15
I.10.3.1. Réseaux utilisant les ondes infrarouges	15
I.10.3.2 Réseaux utilisant les ondes radio	15
I.10.3.2.1 Bluetooth	15
I.10.3.2.2 Home RF (Home Radio Frequency)	15
I.10.3.2.3 HiperLAN (High Performance LAN)	16
I.10.3.2.4. Norme IEEE 802.11	16
a) Norme 802.11a	16
b) Norme 802.11af	16
c) Norme 802.11b (Wi-Fi)	17
d) Norme 802.11g	17
e) Norme 802.11i	17
f) Norme 802.11e	17
g) Norme 802.11n	18
I.10.3.2.5 WiMAX	18
I.10.4. Norme IEEE 802.22	19
I.10.5. La coexistence de différentes technologies sans fil	19
I.10.6. Services de cyber santé (e-Health Services)	20
I.10.7. Réseaux militaires	20
I.11. Conclusion	20

I.1 Introduction :

La demande en fréquence augmente continuellement avec le développement de nouvelles techniques de télécommunications permettant ainsi l'augmentation de l'allocation du spectre statique, ce qui représente un problème majeur dans les réseaux sans fils.

Une radio cognitive est un système de communication « conscient » de son environnement et qui décide de son mode de fonctionnement. Elle est capable de modifier ses paramètres d'émission en cours de fonctionnement en interagissant avec l'environnement dans lequel elle fonctionne afin d'avoir une meilleure efficacité spectrale.

Dans ce premier chapitre, nous donnerons un aperçu général sur la radio logicielle ainsi que sur la radio cognitive et ses différents aspects : principes, architecture, fonctions et les différents domaines d'application.

I.2 La radio logicielle (Software Radio) :

Le Dr. Joseph Mitola, connu comme étant le « père de la radio logicielle » est l'un des auteurs les plus cités dans le domaine. Il combine son expérience dans la radio logicielle avec sa passion pour les techniques d'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle afin de mettre en place la technologie de la radio cognitive [3], [4].

La radio intelligente (ou radio cognitive) est l'évolution ultime de la radio logicielle [3]. La radio logicielle définit une classe de radio reprogrammable et reconfigurable. Elle représente un système de communication sans fil, multimodes, multistandards, reconfigurable, où la majeure partie du traitement est réalisée en logiciel. Les fonctions typiques de l'interface radio de la radio logicielle telles que la fréquence porteuse, la largeur de bande du signal, la modulation et l'accès au réseau, généralement réalisés en matériel sont réalisés sous forme logicielle [3].

Le concept de la radio logicielle permet aux usagers, fabricants et aux fournisseurs de services d'être plus indépendants des normes ; ceci implique que les interfaces radio peuvent être adaptées aux besoins d'un service particulier pour un usager particulier dans un environnement donné à un instant donné [3].

I.3 La radio logicielle restreinte (SDR) :

La radio logicielle intègre toutes les fonctionnalités en logiciel mais impose le passage par des phases intermédiaires (combinant à la fois, anciennes et nouvelles techniques) à cause des contraintes de puissance de calcul, de consommation électrique et de coût ; on parle alors de la radio logicielle restreinte (SDR) [3].

La radio logicielle restreinte est un système de communication radio qui s'adapte automatiquement à n'importe quelle bande de fréquence et reçoit n'importe quelle modulation en utilisant le même matériel. Les équipements SDR peuvent fonctionner dans des réseaux sans fil hétérogènes, ce qui permet à la SDR de résoudre les problèmes de la gestion dynamique du spectre [3].

I.4 La radio cognitive :

La radio intelligente (ou radio cognitive) est l'évolution ultime de la radio logicielle. Le concept de la radio cognitive a également été proposé par Joseph Mitola en 1998 et publié par la suite dans un article de Mitola et Gerald Q. Maguire, Jr. en 1999 [1], [2].

La radio cognitive est considérée comme une forme de communication sans fil où un émetteur/récepteur arrive à détecter intelligemment les canaux de communication qui sont en cours d'utilisation et ceux qui ne le sont pas, et peut se déplacer dans les canaux inutilisés. L'utilisation des fréquences radio disponibles dans le spectre est alors optimisée et les interférences avec d'autres utilisateurs sont minimisées [3].

L'ultime objectif de la radio cognitive est donc l'augmentation significative de l'efficacité des transmissions dans le monde futur des communications sans fil [4].

I.5 Architecture de la radio cognitive :

On définit l'architecture d'un système radio cognitive par un ensemble cohérent de règles de conception par lequel un ensemble spécifique de composantes réalise une série de fonctions, de produits et de services [4].

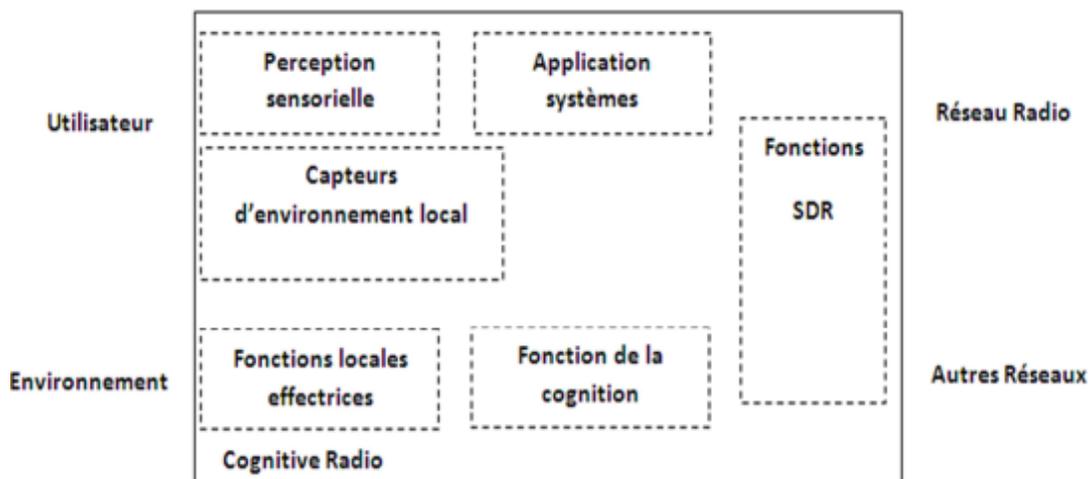


Figure I. 1: Architecture d'un système radio cognitive [4]

Les six composantes fonctionnelles de l'architecture d'un système radio cognitive sont [4] :

- La perception sensorielle (Sensory Perception : SP) de l'utilisateur qui inclut l'interface haptique (sens du toucher), l'acoustique, la vidéo et les fonctions de détection et de perception.
- Les capteurs de l'environnement local (emplacement, température, etc...).
- Les applications système (les services médias indépendants comme les jeux en réseau).
- Les fonctions SDR (qui incluent la détection RF et les applications radio de la SDR).
- La fonction de la cognition (pour les systèmes de contrôle, de planification et d'apprentissage).
- Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias).

I.6 Relation entre radio cognitive et radio logicielle :

L'une des principales caractéristiques de la RC est la capacité d'adaptation des paramètres de la radio (fréquence porteuse, puissance, modulation, bande passante) qui peuvent être modifiés en fonction de l'environnement radio, de la situation, des besoins de l'utilisateur, de l'état du réseau, de la géolocalisation, ...etc.

D'autre part, la radio logicielle est capable d'offrir en plus, les fonctionnalités de flexibilité et de reconfiguration à l'aspect d'adaptation de la radio cognitive. Par conséquent, la RC doit être mise en œuvre autour d'une radio logicielle. En d'autres termes, la radio cognitive englobe la radio logicielle.

L'un des plus simples modèles qui décrit la relation entre la radio cognitive et la radio logicielle est illustré par la Figure ci-dessous [4].

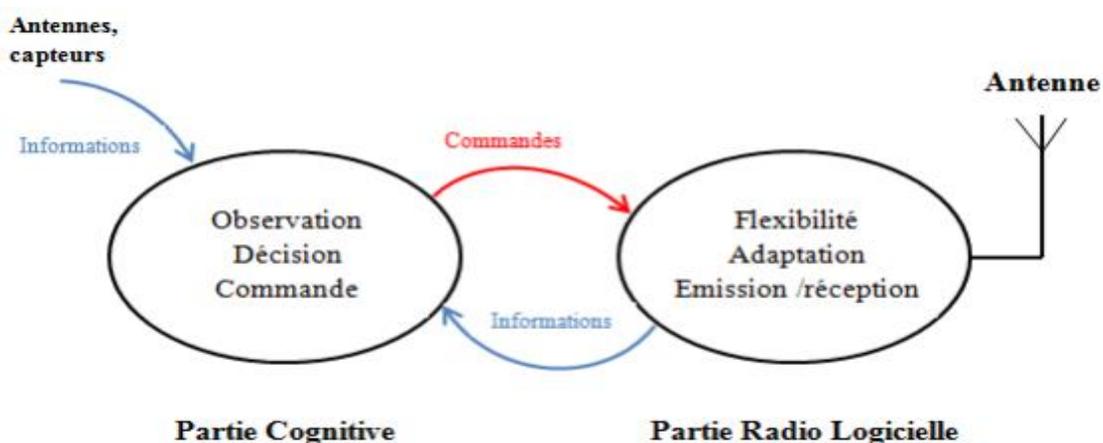


Figure I. 2: Schéma simplifié de la radio cognitive [4]

La partie cognitive comporte la détection des conditions de fonctionnement (antenne, environnement) et la décision des caractéristiques d'émission/réception ainsi que de la bande à utiliser. La partie radio logicielle doit alors être suffisamment souple pour pouvoir s'adapter à ces décisions [4].

I.7 Cycle de cognition :

La composante cognitive de l'architecture de la radio cognitive comporte une organisation temporelle, des flux d'inférences ainsi que des états de contrôle. Le cycle de cognition synthétise cette composante cognitive de manière évidente. Les stimuli entrent dans la RC comme des interruptions sensorielles transmises dans le cycle de cognition pour une réponse. Une telle radio cognitive observe l'environnement, s'oriente, crée des plans, décide, ensuite agit [5].

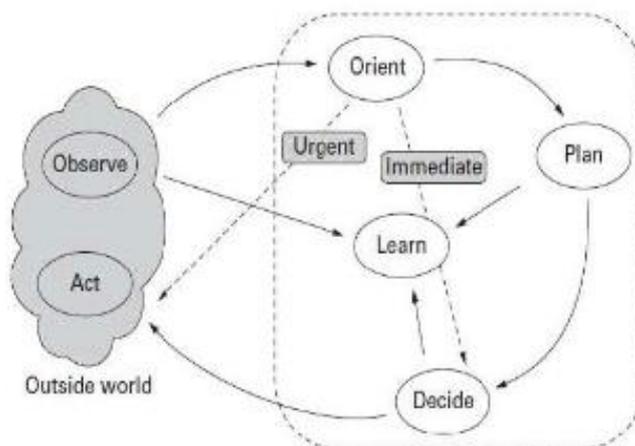


Figure I. 3: Cycle de cognition de Mitola [5]

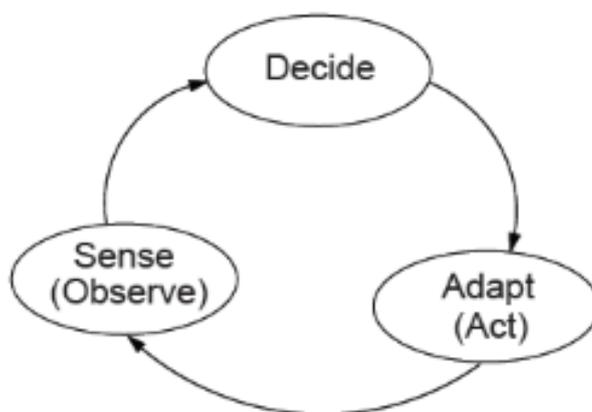


Figure I. 4: Cycle de cognition simplifié [5]

I.7.1 Phase d'observation (détecter et percevoir) :

La RC observe son environnement par l'analyse du flux de stimuli qui entre. Dans la phase d'observation, la radio cognitive associe l'emplacement, la température, le niveau de lumière des capteurs, et ainsi de suite pour en ressortir le contexte de communication. Cette phase lie ces stimuli à des expériences antérieures pour percevoir les modèles au fil du temps. La radio cognitive rassemble et mémorise toutes les expériences [5].

I.7.2 Phase d'orientation :

Cette phase détermine l'importance d'une observation en associant à celle-ci une série connue de stimuli. La phase d'orientation fonctionne au sein des structures de données qui sont semblables à la mémoire à court terme (STM), celle que les gens utilisent pour engager une discussion sans forcément se souvenir de tout, à la même mesure que dans la mémoire à long terme (LTM). Le milieu naturel fournit la répétition nécessaire pour lancer le transfert de la STM vers la LTM. La correspondance entre les stimuli courants et les expériences stockées se fait par reconnaissance des stimuli ou par assemblage.

La reconnaissance des stimuli se produit lorsqu'il y a une correspondance exacte entre un stimulus courant et une expérience antérieure. La réaction peut être appropriée ou dans l'erreur.

Chaque stimulus est placé dans un contexte plus large, qui inclut d'autres stimuli et les états internes, y compris le temps. Parfois, la phase d'orientation provoque une action qui sera lancée dans l'immédiat comme étant un comportement réactif « stimulus-réponse ».

Par exemple, une panne d'électricité peut directement produire un acte qui sauve les données (le chemin « Immédiate » de la phase Action sur la figure I.3). Une perte de signal sur un réseau, peut invoquer une redistribution des ressources. Cela peut être accompli par le chemin « Urgent » dans la figure I.3 [5].

I.7.3 Phase de planification :

La plupart des stimuli sont traités avec réflexion plutôt qu'avec réactivité. Un message entrant du réseau serait normalement traité par la conception d'un plan (dans la phase de Plan, la voie normale). Le plan devrait également ajouter la phase de raisonnement dans le temps. Généralement, les réponses réactives sont préprogrammées ou apprises préalablement, tandis que d'autres réactions de délibération sont prévues [5].

I.7.4 Phase de décision :

La phase de décision choisit un plan parmi les plans candidats. La radio peut alerter l'utilisateur d'un message entrant ou reporter l'interruption à plus tard en fonction des niveaux de QoI (Quality of Information) établis dans cette phase [5].

I.7.5 Phase d'action :

Cette phase lance les processus sélectionnés qui utilisent les capteurs choisis accédant au monde extérieur ou aux états internes de la radio cognitive.

L'accès au monde extérieur consiste principalement à composer des messages qui doivent être transmis en audio dans l'environnement ou exprimés dans différents langages appropriés.

Une action radio cognitive peut également mettre à jour les modèles internes, par exemple, l'ajout de nouveaux modèles aux modèles internes existants. L'acquisition de nouvelles connaissances pourrait être conclue par une action qui crée les structures de données appropriées [5].

1.7.6 Phase d'apprentissage :

La phase d'apprentissage dépend de la perception, des observations, des décisions et des actions. L'apprentissage initial est effectué via la phase d'observation dans laquelle toutes les perceptions sensorielles sont continuellement comparées à l'ensemble des expériences antérieures pour compter les événements au fur et mesure et se souvenir du temps écoulé depuis le dernier événement.

L'apprentissage peut se produire lorsqu'un nouveau modèle est créé en réponse à une action. Par exemple, les états internes précédents et courants peuvent être comparés avec les attentes pour en apprendre encore plus sur l'efficacité d'un mode de communication [5].

I.8 Composantes de la radio cognitive :

Les différentes composantes d'un émetteur/récepteur radio cognitive qui implémentent ces fonctionnalités sont présentées dans la figure I.5 [5].

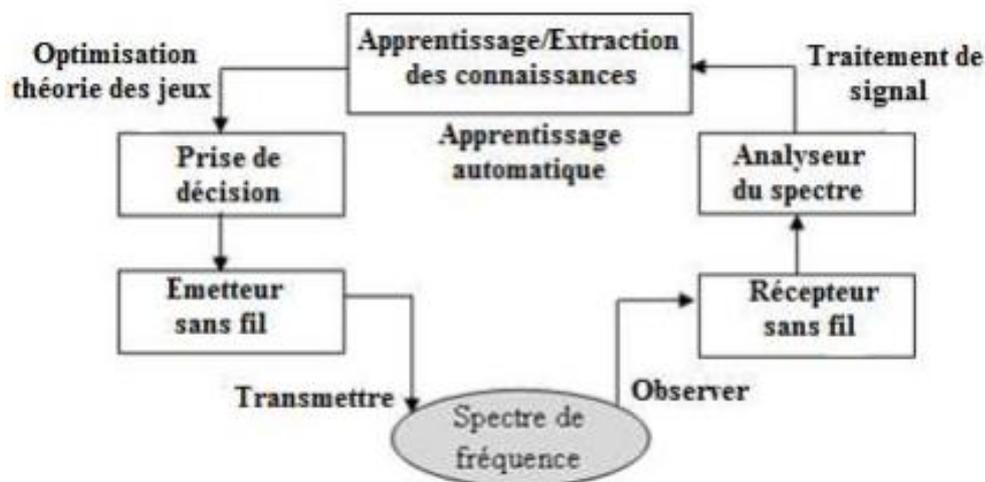


Figure I. 5 : Composantes de la radio cognitive [5]

• Emetteur / Récepteur :

Un émetteur/récepteur SDR sans fil, est le composant important avec les fonctions du signal de transmission et de réception de données. En outre, un récepteur sans fil est utilisé aussi pour observer l'activité sur le spectre de fréquence (spectre de détection). Dans le nœud de la radio cognitive, les paramètres émetteur/récepteur peuvent être modifiés dynamiquement comme indiqué par les protocoles de couche supérieure [5].

• Analyseur de spectre (Spectrum analyzer) :

L'analyseur de spectre utilise les signaux mesurés pour analyser l'utilisation du spectre (par exemple, pour détecter la signature d'un signal en provenance d'un utilisateur primaire et détecter les espaces blancs du spectre pour les utilisateurs secondaires). L'analyseur de spectre doit s'assurer que la transmission d'un PU n'est pas parasitée par un SU qui décide d'accéder au spectre. Dans ce cas-là, plusieurs techniques de traitement du signal peuvent être utilisées afin d'obtenir des informations sur l'utilisation du spectre [5].

• Extraction de connaissances et apprentissage (Knowledge extraction/learning):

L'apprentissage et l'extraction des connaissances utilisent les informations concernant l'utilisation du spectre pour comprendre l'environnement ambiant RF (par exemple le comportement des utilisateurs licenciés ou sous-licence). Une base de connaissances de l'environnement d'accès au spectre est constituée et entretenue, pour qu'elle soit ensuite utilisée afin d'optimiser et adapter les paramètres de transmission dans le but d'atteindre l'objectif désiré sous diverses contraintes. Des algorithmes d'apprentissage peuvent être utilisés pour l'apprentissage et l'extraction des connaissances [5].

● **Prise de décision (Decision making) :**

Une fois que la connaissance sur l'utilisation du spectre soit disponible, la décision sur l'accès au spectre fréquentiel doit être faite. La décision idéale dépend du milieu ambiant, elle dépend du comportement coopératif ou compétitif des SU. Afin d'obtenir une solution optimale, différentes techniques peuvent être appliquées. Par exemple, la théorie d'optimisation peut être utilisée quand le système est modélisé comme une seule entité avec un seul objectif. Par contre, les modèles de la théorie des jeux peuvent être utilisés lorsque le système est composé de plusieurs entités, chacune avec son propre objectif. L'optimisation stochastique peut être utilisée lorsque les états du système sont aléatoires [5].

I.9. Fonctions de la radio cognitive :

La radio cognitive a pour objectif de résoudre la saturation du réseau de communication sans fil par une optimisation au niveau des terminaux. Les principales fonctions de la radio cognitive sont les suivantes [4] :

I.9.1. Détection du spectre (Spectrum sensing) :

C'est la principale fonctionnalité dans une radio cognitive. Elle consiste à détecter les bandes non utilisées du spectre pour ensuite les partager sans qu'il y ait d'interférences avec d'autres utilisateurs. L'un des objectifs de la détection spectrale est d'obtenir le statut (libre/occupé) du spectre, afin que ce dernier puisse être consulté par un utilisateur secondaire (SU) sans interférer sur l'utilisateur primaire (PU).

I.9.2. Gestion du spectre (Spectrum management) :

C'est la partie principale de la radio cognitive. Elle a pour but de déduire une décision sur la stratégie à adopter pour s'insérer dans le réseau à partir de l'analyse des données issues de la détection.

I.9.3. Mobilité du spectre (Spectrum mobility) :

C'est le processus qui permet à l'utilisateur de la radio cognitive de modifier sa fréquence de fonctionnement. Les réseaux RC utilisent le spectre de manière dynamique en permettant à des terminaux radio d'opter pour la meilleure bande de fréquence disponible.

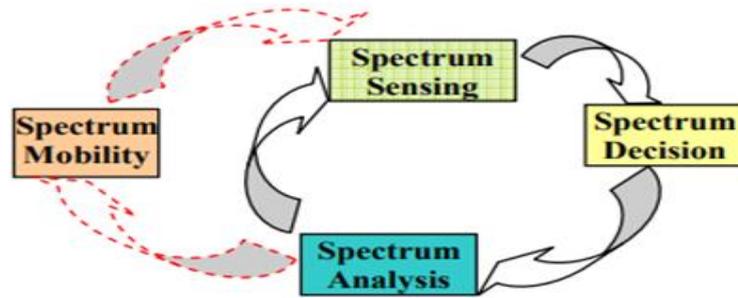


Figure I. 6: Fonctions de la Radio Cognitive [4]

I.10. Domaines d’applications de la radio cognitive :

Le concept de la radio cognitive peut être appliqué à une multitude de types de communication sans fil. Parmi ces domaines d’applications, on peut citer [4] :

I.10.1. Les réseaux sans fil de prochaine génération :

La radio cognitive devrait être une technologie déterminante pour la prochaine génération de réseaux sans fil hétérogènes. La RC fournira des informations à la fois à l’utilisateur et au fournisseur d’équipements. Pour l’utilisateur, un dispositif mobile avec des interfaces d’air multiples (Wi-Fi, WiMAX, cellulaire) peut observer l’état des réseaux d’accès sans fil (qualité de transmission, débit, délai) et prendre une décision sur le choix de l’accès au réseau pour une communication. Pour le fournisseur, les ressources radio de plusieurs réseaux peuvent être mises au point pour l’ensemble des utilisateurs de mobiles et leurs exigences en termes de qualité de service (QoS) [4].

I.10.2. Catégories des réseaux sans fil :

Plusieurs catégories de réseaux sans fil sont définies en fonction du périmètre géographique (appelé zone de couverture), permettant ainsi une connectivité de l’utilisateur [5] :

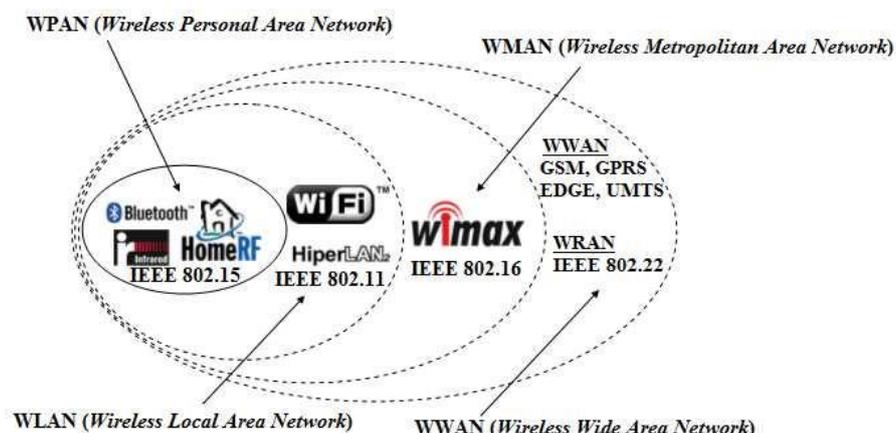


Figure I.7 Catégories des réseaux sans fil [5]

I.10.2.1 WBAN (Wireless Body Area Network):

Également connu sous le nom de Red BAN, les réseaux corporels collectent des données via des capteurs, qu'ils soient implantés dans le corps ou dans un appareil porté par l'utilisateur tel qu'un bracelet, une montre ou un smartphone. Ces capteurs sont à basse fréquence et collectent des données telles que la fréquence cardiaque, la température ou la tension artérielle. Une fois les informations recueillies, elles seront envoyées, soit vers nos appareils mobiles, soit vers d'autres moniteurs externes via un réseau 3G ou 4G, pour qu'elles soient stockées sur l'appareil, afin d'y accéder à tout moment [6].

I.10.2.2 WPAN (Wireless Personal Area Network):

Le WPAN (réseau personnel sans fil) désigne la connexion de plusieurs appareils distants de seulement quelques mètres entre eux comme dans un bureau ou une maison : Bluetooth, Home RF [5].

I.10.2.3 WLAN (Wireless Local Area Network):

Le WLAN (réseau local sans fil) comprend des terminaux connectés entre eux dans un périmètre d'un réseau local installé dans une entreprise, une maison ou encore dans un espace public. Plusieurs WLAN peuvent être synchronisés et configurés de sorte que le fait de traverser plusieurs zones de couverture est pratiquement indétectable pour un utilisateur : IEEE 802.11, HiperLAN [5].

I.10.2.4 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network):

Le WMAN (réseau métropolitain sans fil) utilise le Standard IEEE 802.16, appelé aussi WiMAX (World wide Interoperability for Microwave Access). Il fournit un accès réseau sans fil à des immeubles connectés par liaison radio à une antenne émettrice (appelé AP : Access Point) située dans des stations centrales reliées au réseau filaire [5].

I.10.2.5 WWAN (Wireless Wide Area Network):

Le WWAN (large réseau sans fil) englobe tous les réseaux cellulaires tels que le GSM, GPRS, UMTS, LTE et les réseaux satellitaires. La distance entre les périphériques peut atteindre jusqu'à 3 km mais le coût de la mise en place d'un tel réseau est plus élevé que celui des réseaux cités auparavant [5].

I.10.2.6 WRAN (Wireless Regional Area Network):

La IEEE 802.22 est une norme pour les WRAN qui fonctionnent dans des canaux de télévision inutilisés (espaces blancs) et fournissent un accès aux services sans fil. La norme finale va supporter des canaux de 6,7 et 8 MHz pour une opération mondiale. Le WRAN est basé sur la technique de multiplexage OFDMA [5].

I.10.3 Différents types de réseaux sans fil :

Il existe deux types principaux de réseaux sans fil [5] :

- Les réseaux utilisant les ondes infrarouges.
- Les réseaux utilisant les ondes radio.

I.10.3.1. Réseaux utilisant les ondes infrarouges :

Les ondes infrarouges sont utilisées dans la vie courante (télécommandes de télévisions par exemple) et permettent de créer des petits réseaux, notamment entre des téléphones portables et des ordinateurs.

L'inconvénient majeur des réseaux créés avec les ondes infrarouges, est qu'ils nécessitent que les appareils soient alignés l'un en face de l'autre, séparés d'une distance maximale de quelques dizaines de mètres sans qu'il y ait d'obstacle entre l'émetteur et le récepteur (liaison directionnelle entre les appareils). Seuls les réseaux WPAN peuvent utiliser cette technologie [5].

I.10.3.2 Réseaux utilisant les ondes radio :

I.10.3.2.1 Bluetooth

Le Bluetooth a été lancé par Ericsson en 1994 et est une spécification industrielle pour les zones de réseaux PAN. Il permet de relier deux terminaux à travers une liaison hertzienne. Il permet d'offrir ainsi des débits moyens (1 Mbps théoriquement) sur un rayon limité (10 à 30m en pratique). Le Bluetooth est défini officiellement par la norme l'IEEE 802.15.

Dans un réseau Bluetooth, la bande passante est partagée entre un appareil servant de maître et jusqu'à 7 périphériques esclaves. Théoriquement, Il est possible de faire communiquer jusqu'à 10 groupes d'appareils, soit 80 appareils au total [5].

I.10.3.2.2 Home RF (Home Radio Frequency):

Le Home RF a été conçu spécialement pour un usage domestique, il utilise les mêmes fréquences que celles du Bluetooth. Un réseau Home RF permet de relier des ordinateurs portables ou fixes et d'adresser 127 nœuds sur un seul réseau ainsi que 6 liaisons voix, simultanément [5].

I.10.3.2.3 HiperLAN (High Performance LAN):

L'HiperLAN est une norme exclusivement européenne car elle fut élaborée sous la tutelle de l'institut européen des normes des télécommunications. L'idée, est de créer des environnements flexibles sans fil à haut débit permettant un fonctionnement Ad hoc.

Il dispose d'un code correcteur d'erreurs qui permet d'obtenir une qualité de transport comparable à celle obtenue dans un réseau local [5].

I.10.3.2.4. Norme IEEE 802.11 :

L'IEEE a contribué à l'amélioration de la norme 802.11 en augmentant le débit de donnée compris entre 5 et 11 Mbps tout en conservant la même architecture et technologie. Plusieurs versions de l'IEEE 802.11 existent, mais en règle générale, plus une version est récente, plus les débits proposés sont élevés. Les principales extensions sont les suivantes :

a) Norme 802.11a

Appelée aussi la WiFi5, cette norme a été développée en 1999, elle fonctionne dans la bande de fréquence 5 GHz et est incompatible avec celle de 2,4 GHz.

Cette norme utilise la modulation OFDM, ce qui lui permet de limiter les interférences et d'avoir des vitesses de transmission de données allant jusqu'à 54 Mbps [5].

b) Norme 802.11af

La norme IEEE802.11af surnommée White-Fi ou Super Wi-Fi utilise les fréquences libérées par les canaux libres de la télévision (espaces blancs).

Il s'agit de la gamme de fréquences comprise entre 790 MHz et 862 MHz. La FCC a publié les fréquences comprises entre 470 MHz et 710 MHz en tant que gamme de fréquences supplémentaires.

Les normes 802.11af et 802.22 utilisent d'une manière très efficace, les fréquences disponibles avec la radio cognitive, tout en évitant les interférences avec d'autres fréquences de transmission de télévision ou de radio

La couche physique de 802.11af est basée sur le multiplexage OFDM déjà spécifié sous la norme 802.11ac. L'avantage de cette gamme de fréquences par rapport à celle de 2,5 GHz, est la très faible atténuation de la fréquence porteuse à travers les parois ou tout autre matériau solide. Les canaux de fréquence ont une largeur de 6 à 8 MHz et peuvent être rassemblés en groupes de quatre. La technique MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) est utilisée pour augmenter le débit de données.

Les débits de données varient en fonction du type de modulation et du schéma de modulation et de codage (MCS). Ils vont de 1,8 Mbit/s avec une modulation BPSK et une largeur de canal de 6 MHz à 35,6 Mbit/s avec une modulation d'amplitude en quadrature (256QAM) [7].

c) Norme 802.11b (Wi-Fi)

La norme Wi-Fi (Wireless Fidelity) a été approuvée en 1999 par l'IEEE et fût la première norme des réseaux WLAN utilisée par un grand nombre d'utilisateurs. Elle permet l'interopérabilité entre les différents matériels existants en offrant des débits de 11 Mbps avec une portée de 300m dans un environnement sans obstacle. Elle opère dans la bande de fréquence à 2,4 GHz séparée en plusieurs canaux [5].

d) Norme 802.11g

Elle a été développée en 2003 et s'étend de la norme 802.11b avec un débit plus élevé qui peut atteindre jusqu'à 54 Mbps théorique (30 Mbps réels). Elle fonctionne aussi à 2,4 GHz permettant ainsi de mélanger des points d'accès 802.11b. Le point d'accès central adapte sa vitesse en fonction du périphérique connecté, ce qui va permettre à des clients 802.11b de se connecter. Cela permettra aux équipements 802.11b d'être utilisables avec les points d'accès 802.11g et inversement.

La norme 802.11g utilise l'authentification statique WEP (Wired Equivalent Privacy) mais accepte aussi d'autres types d'authentification WPA (Wireless Protected Access) avec cryptage dynamique (méthode de chiffrement TKIP et AES) [5].

e) Norme 802.11i

Adoptée en juin 2004, cette norme décrit des mécanismes de sécurité de transmission. Elle propose un chiffrement des communications pour les transmissions qui utilise les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g. La 802.11i agit en s'interférant avec les normes 802.11b et 802.11g. Les débits théoriques sont donc les mêmes, à savoir 11 Mbps pour la 802.11b et 54 Mbps pour la 802.11g [5].

f) Norme 802.11e

Cette norme qui est disponible depuis 2005, vise à offrir des possibilités en matière de qualité de service au niveau de la couche liaison de données ainsi que des fonctionnalités de sécurité et d'authentification. Ainsi, elle a pour but de définir les besoins des différents paquets en termes de bande passante et de délai de transmission, de sorte d'avoir notamment une meilleure transmission de la voix et de la vidéo [5].

g) Norme 802.11n

Normalisée depuis 2009, cette norme utilise à la fois les bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz. Sa vitesse théorique maximale varie de 150 à 300 Mbps. Cette vitesse est celle du transport de données et ne tient pas compte des codes de contrôle et de cryptage inclus dans le message. En réalité, le débit effectif est compris entre 100 et 200 Mbps.

La norme 802.11n utilise la technique MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) qui permet d'envoyer et de recevoir les données en utilisant plusieurs antennes simultanément. Grâce à la modification du positionnement des antennes du point d'accès comme de la carte réseau, la distance maximale augmente (mais reste toujours sous les 100m). Cette solution permet dans certains cas de contourner les murs considérés comme obstacle à la transmission du signal [5].

I.10.3.2.5 WiMAX :

La technologie WiMAX (World wide Interoperability for Microwave Access) est une connexion sans fil à haut débit sur une longue distance. Elle autorise un débit théorique de 70 Mbps sur une distance maximale de 50 km mais offre en pratique 10 Mbps sur une distance de 2 km.

Le réseau WiMAX est basé sur la norme IEEE 802.16. Dans le langage courant, il désigne un ensemble de standards et techniques du monde des réseaux WMAN [5].

Ce réseau est principalement basé sur une topologie en étoile même si la topologie maillée soit possible. Différentes versions du WiMAX existent [5] :

- La version **802.16a** fonctionne sur une distance de 20 km maximum avec un débit de 12 Mbps. La bande de fréquence utilisée est située entre 2 et 11 GHz. Cette version est considérée comme obsolète.
- La norme **802.16d** ou le WiMAX fixe atteint des distances de 50 km. Actuellement, cette norme est commercialisée pour les connexions internet.
- La version **802.16e** adapte le WiMAX pour la téléphonie mobile avec un taux de transfert de données de 30 Mbps sur une distance maximale de 3 km. La plage de fréquence sur laquelle il opère se situe entre 2 et 6 GHz.

Le WiMAX est une technologie possédant un caractère à la fois ouvert, très complet et extrêmement rapide dans son processus de normalisation. Aussi, il a été le premier à avoir adopté le bon choix en termes de technologie, notamment en matière de modulation, de sécurité et surtout de QoS (Quality of Service). Le WiMAX utilise le multiplexage OFDM.

La figure ci-dessous montre une comparaison entre la technologie WiMAX et ses proches concurrents en termes de couverture géographique et de débits offerts [5].

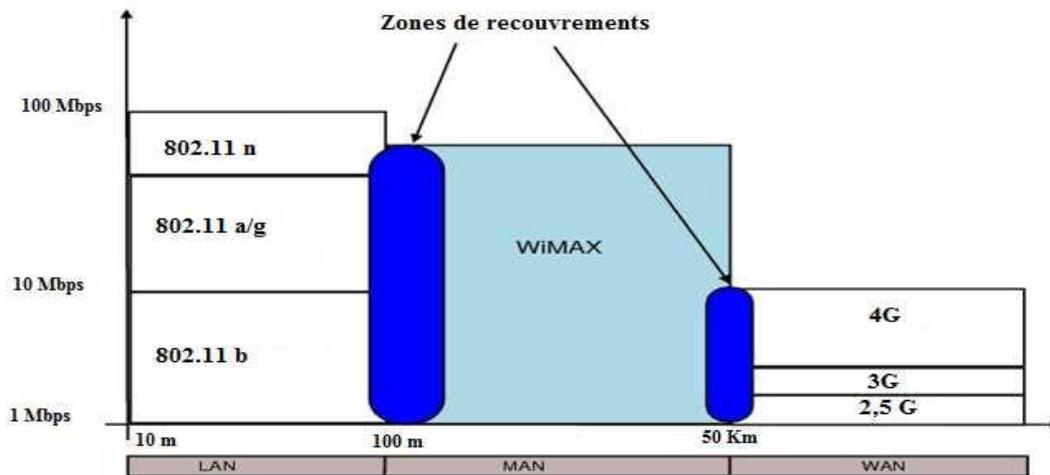


Figure 1. 8: Le WiMAX et ses concurrents [5]

I.10.4. Norme IEEE 802.22 :

La norme IEEE 802.22 est une norme de la radio cognitive qui a pour but de doter les régions rurales moins peuplées d'un accès à large bande en utilisant les canaux libres de la télévision (espaces blancs).

Les bandes de radiodiffusion télévisuelle dans la gamme des VHF et celle des UHF se révèlent idéales pour la couverture de vastes régions rurales à faible densité de population car les niveaux de bruit industriel et des réflexions ionosphériques demeurent relativement bas, aussi les antennes présentent des dimensions raisonnables et enfin, les caractéristiques de propagation sans visibilité directe sont très bonnes.

L'appel massif aux technologies de radio cognitive comme la détection RF, la géolocalisation, la sélection dynamique de fréquence, vise à assurer d'une part, la coexistence avec les titulaires de stations de radiodiffusion sur une base de non-brouillage et d'autre part, la coexistence interne avec d'autres systèmes WRAN conformes à la norme 802.22, pour maximiser l'utilisation du spectre [5].

I.10.5. La coexistence de différentes technologies sans fil :

Les nouvelles technologies sans fil (IEEE 802.22) sont en cours d'élaboration dans le but de réutiliser des fréquences radio allouées à d'autres services sans fil (service TV). La RC est une solution qui permet la coexistence de ces différentes technologies et services sans fil. Ainsi, à titre d'exemple, la technologie IEEE 802.22 basée sur les utilisateurs WRAN, peut exploiter

efficacement la bande TV quand le téléviseur n'est pas utilisé à proximité ou bien quand il n'y a pas de diffusion de la part d'une station de télévision [4].

I.10.6. Services de cyber santé (e-Health Services) :

La puissance d'émission des appareils sans fil doit être soigneusement contrôlée car les équipements médicaux et les capteurs bio-signal sont sensibles aux interférences électromagnétiques. En outre, différents dispositifs biomédicaux (équipements chirurgicaux et appareils de diagnostic et de suivi) utilisent la transmission Radio Fréquence. Le choix du spectre pour ces dispositifs, doit être fait avec soin pour éviter toute interférence avec l'autre. Pour cela, les concepts de la RC peuvent être appliqués [8].

I.10.7. Réseaux militaires :

Avec la RC, les paramètres de la communication sans fil peuvent être adaptés de façon dynamique en fonction du temps, de l'emplacement et de la mission des soldats. Par exemple, si certaines fréquences sont brouillées ou bruyantes, les dispositifs radio cognitifs (émetteurs/récepteur) peuvent effectuer des recherches pour accéder à d'autres bandes de fréquence disponibles pour la communication [4], [8].

I.11. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé les concepts de la radio logicielle, de la radio cognitive ainsi que la relation entre eux. En tenant compte des standards radio existants ou émergents, on peut constater qu'il peut y avoir une coexistence entre les différentes interfaces radio (réseau cellulaire, Wi-Fi, WiMAX, ...etc), qui offrent une variété de services dans un même environnement.

Afin de pouvoir optimiser au maximum la bande passante globale disponible, une gestion efficace du spectre s'impose. Cela permet d'offrir à la fois aux utilisateurs un débit supérieur et une meilleure qualité de service des communications.

Le deuxième chapitre va porter essentiellement sur les antennes et ses différentes caractéristiques ainsi que sur les antennes reconfigurables intelligentes indispensables au développement des réseaux radio cognitive.

CHAPITRE II

Les Antennes Reconfigurables

Sommaire

II.1 Introduction	23
II.2 Les caractéristiques des antennes	23
II.2.1 Impédance, fréquence de fonctionnement et bande passante	23
II.2.2 Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (TOS)	25
II.2.3 Caractéristiques de rayonnement	25
II.2.4 Polarisation	27
II.3 Types des antennes	28
II.3.1 Les antennes filaires	28
II.3.2 Les antennes directives	29
II.3.2.1 Antenne cornet	29
II.3.2.2 Antenne à transition progressive (Vivaldi)	29
II.3.3 Les antennes à fente	30
II.3.4 Le dipôle demi-onde	31
II.3.5 Les antennes paraboliques	31
II.3.6 Antennes omnidirectionnelles	32
II.3.6.1 Antenne biconique	32
II.3.6.2 Antenne Discône	33
II.3.7 Antenne log-périodique	33
II.3.8 Antenne Patch (micro-ruban)	34
II.3.8.1 Description d'une antenne imprimée	34
II.3.8.2 Structure d'une antenne imprimée	34
II.3.8.3 Les paramètres géométriques d'une antenne imprimée	35
a) Largeur du patch	35
b) Longueur du patch	36
c) Choix du substrat	36
II.3.8.4 Techniques d'alimentation	37
a) Alimentations par contact	37
• Alimentation par une ligne micro-ruban	37
• Alimentation coaxiale directe	37

b) Alimentations par proximité	38
• Alimentation par couplage électromagnétique	38
• Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse	38
II.3.9 Techniques d'adaptation des antennes patch	39
II.3.9.1 Adaptation par ligne quart d'onde	39
II.3.9.2 Adaptation par STUB	39
II.3.9.3 Adaptation avec encoche	40
II.3.10 Avantages et inconvénients des antennes imprimées	40
II.3.10.1 Avantages	40
II.3.10.2 Inconvénients	40
II.3.11 Applications des antennes patch	41
II.4 Les antennes reconfigurables	41
II.4.1 Définition	41
II.4.2 La nécessité de la reconfiguration	42
II.4.3 Technologie Ultra Large Bande	42
II.4.4 Les techniques de reconfiguration	43
II.4.4.1 Diode PIN	44
II.4.4.3 Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)	45
II.4.4.4 Les matériaux agiles	46
II.4.4.5 Commutateur optique	46
II.4.5 Classification de reconfiguration	46
II.4.5.1 La reconfiguration en fréquence	46
➤ Principe de la reconfiguration en fréquence	47
II.4.5.2 La reconfiguration de rayonnement	48
II.4.5.3 La reconfiguration en polarisation	49
II.4.6 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable	50
II.4.7 Conclusion	51

II.1 Introduction :

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner et capter les ondes électromagnétiques dans l'espace. L'antenne émettrice transforme le courant modulé en ondes électromagnétiques capables de se déplacer dans l'atmosphère, tandis que l'antenne réceptrice convertit les ondes électromagnétiques reçues en courant électrique. Plusieurs types d'antennes diffèrent par leur fonctionnement, leur géométrie et leur technologie, parmi lesquelles, il y a :

Les antennes filaires (le dipôle, le monopôle, l'antenne Yagi), les antennes à fentes, les antennes Patches (antennes à structures planaires), les antennes à ouverture (le cornet) et les antennes à réflecteurs (les paraboles).

Avec le développement technologique actuel et l'apparition de nouvelles applications sans fil, les ressources fréquentielles disponibles sont limitées et les puissances sont réglementées pour des questions de sécurité. Des solutions innovantes doivent être mise en place pour augmenter les performances de transmission en termes de débit et d'efficacité. Parmi ces solutions qui existent ; les antennes reconfigurables, qui font l'objet d'importantes recherches et deviennent indispensables dans les communications sans fil. Les antennes reconfigurables peuvent utiliser plus efficacement le spectre de radiofréquence. Ces antennes doivent être en mesure de s'adapter à leur environnement en modifiant leur fréquence de fonctionnement, et/ou leur polarisation et/ou leur diagramme de rayonnement, offrant ainsi la possibilité de réaliser une partie des fonctionnalités, généralement réservées à la partie radio ou aux traitements du signal numérique.

Dans ce chapitre, on va décrire les caractéristiques générales des antennes et définir quelques notions de base sur les antennes reconfigurables. Ensuite, on classifiera les nombreux types d'antennes reconfigurables qui existent et enfin, on soulignera l'importance de disposer de telles antennes.

II.2 Les caractéristiques des antennes :

Une antenne se définit par les caractéristiques principales suivantes :

Impédance d'entrée, fréquence de fonctionnement, bande passante, caractéristiques de rayonnement (directivité, gain), diagramme de rayonnement et polarisation [9].

II.2.1 Impédance, fréquence de fonctionnement et bande passante :

Généralement, une antenne se comporte comme un circuit résonant dont la fréquence de résonance centrale dépend des valeurs de l'inductance L et de la capacité C liées à ses structures, à

ses dimensions et aux éléments ajoutés. Dans un système, l'antenne est connectée aux autres éléments à travers une ligne de transmission, généralement d'impédance égale à 50 ou à 75 Ohms. La réponse fréquentielle d'une antenne est caractérisée par l'évolution en fréquence de son impédance d'entrée [9].

L'impédance d'entrée complexe de l'antenne s'écrit sous la forme suivante [9], [13] :

$$\mathbf{Z}_{in}(\omega) = \mathbf{R}(\omega) + \mathbf{jX}(\omega) \quad (\text{II.1})$$

Avec : ω : la pulsation ($\omega = 2\pi f$), X: la réactance et f: la fréquence.

Le coefficient de réflexion Γ , défini par le rapport entre l'amplitude du signal réfléchi par l'antenne et l'amplitude du signal d'entrée, dépend de l'impédance caractéristique de la ligne Z_0 et aussi de l'impédance d'entrée de l'antenne $Z_{in}(\omega)$ [9].

Ce paramètre est défini aussi par la relation suivante [9] : $\Gamma = \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0}$ (II.2)

Les pertes par réflexion RL (en dB), s'en déduisent [9] : $\mathbf{RL} = -20\log|\Gamma|$ (II.3)

Et le taux d'ondes stationnaires est défini par [9] : $\mathbf{TOS} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$ (II.4)

L'impédance d'entrée est généralement tracée sur un diagramme de Smith qui permet d'avoir simultanément les informations sur l'amplitude, la phase et sur la nature inductive ou capacitive de l'antenne. À la résonance, l'impédance d'entrée de l'antenne est purement réelle et le tracé du diagramme de Smith vient croiser l'axe horizontal [9].

La bande passante d'une antenne est définie comme étant la plage de fréquences dans laquelle l'antenne est adaptée. Elle peut alors être déterminée en considérant la bande pour laquelle le coefficient de réflexion de l'antenne est inférieur à -10 dB, correspondant ainsi à un TOS inférieur à 2 comme illustré sur la Figure II.1.

Les caractéristiques en amplitude et en phase selon la fréquence du coefficient de réflexion et du TOS, sont mesurées en utilisant un analyseur vectoriel de réseau (VNA, Vector Network Analyzer) [9].

D'origine, les antennes fonctionnent dans une bande de fréquence étroite mais avec les évolutions récentes des systèmes radio, de plus en plus d'antennes présentent de larges à ultra larges bandes de fréquences [9]. On y trouve aussi certaines antennes qui peuvent fonctionner dans plusieurs bandes de fréquences distinctes, elles sont dites alors antennes multi-bandes. Pour les

antennes à faible bande passante, la bande passante est souvent donnée en pourcentage de la fréquence centrale et pour les antennes larges bandes, le ratio entre des bornes supérieures et inférieures de la bande est généralement fourni [9], [16].

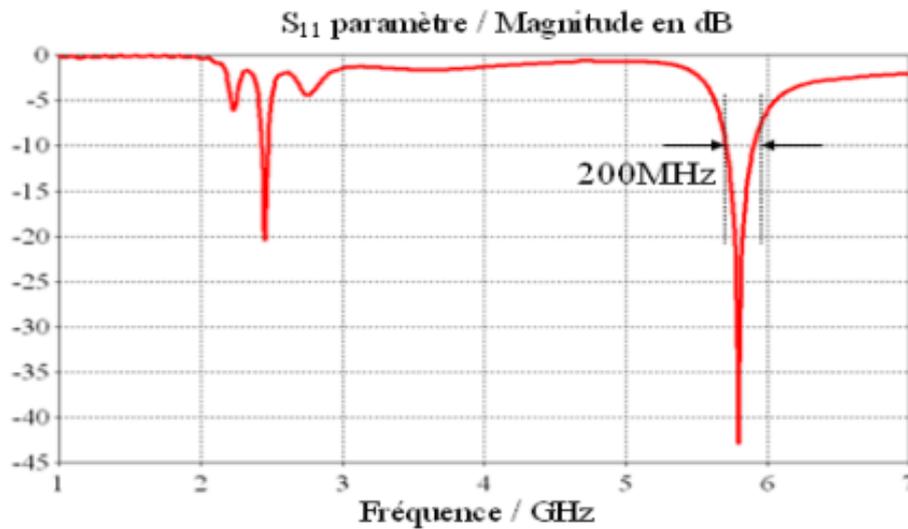


Figure II.1 Exemple de coefficient de réflexion et de la bande passante associée [9]

II.2.2 Coefficient de réflexion et taux d'onde stationnaire (TOS) :

Le coefficient de réflexion d'une antenne est défini comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies. Pour une antenne d'impédance Z reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_0 (souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion est défini comme suit [9], [12] :

$$S_{11} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (\text{II.5})$$

Ce coefficient, indique la qualité d'adaptation de l'antenne et est souvent exprimé en dB.

Par définition le ROS est le rapport entre le maximum et le minimum de tension relevés sur la ligne au niveau d'un ventre de tension [9], [16] :

$$\text{TOS} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (\text{II.6})$$

II.2.3 Caractéristiques de rayonnement :

Les diagrammes de rayonnement représentent graphiquement les propriétés de rayonnement de l'antenne en champ lointain et quantifient la capacité d'une antenne à transmettre/recevoir le signal dans une direction particulière. Les diagrammes de rayonnement indiquent l'intensité de

rayonnement (égale à la puissance rayonnée par unité d'angle solide), normalisée (en dB) en fonction de la direction. A partir de ces diagrammes de rayonnement, on définit l'ouverture numérique a -3dB; c'est la plage angulaire pour laquelle la puissance rayonnée est supérieure à la moitié de la puissance rayonnée maximale [9].

On dit qu'une antenne est directive, lorsqu'elle focalise l'énergie qu'elle rayonne dans une direction particulière de l'espace contrairement à une antenne isotrope qui rayonne dans toutes les directions. L'énergie rayonnée par une antenne directive est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions étant privilégiées ; l'antenne présente alors des lobes de rayonnement. Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser ces lobes dans les trois dimensions de l'espace (Figure II.2), suivant les plans horizontal et vertical incluant le lobe le plus important (lobe principal) [9].

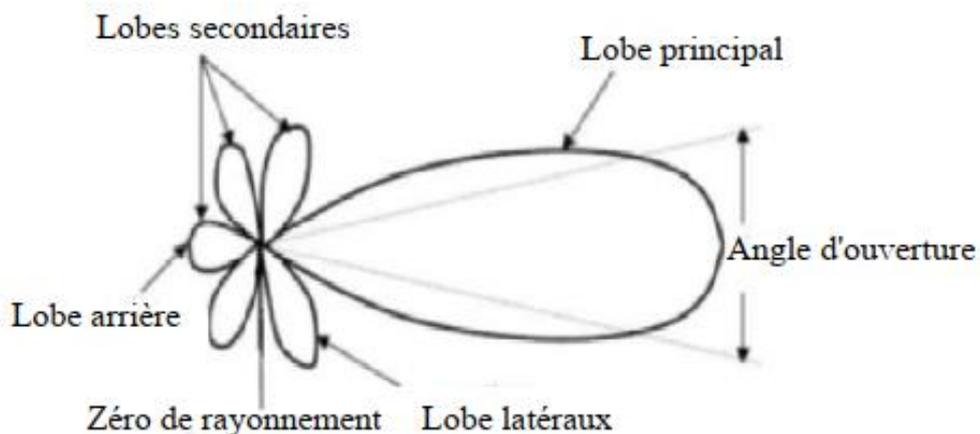


Figure II.2 Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive [36]

La directivité (exprimée en dBi) d'une antenne $D(\theta, \varphi)$, représente le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans une direction donnée et la densité de puissance rayonnée par une source isotrope. La directivité donne des informations sur les propriétés directionnelles d'une antenne en négligeant son efficacité η [9]. L'efficacité, traduit le rendement de l'antenne et dépend de la résistance de rayonnement et celle des pertes [12] :

$$\eta = \frac{P}{P_a} \quad (\text{II.7})$$

'P' et 'Pa' représentent respectivement la puissance rayonnée et d'alimentation.

Dans les antennes, les pertes peuvent être de plusieurs natures : pertes ohmiques des conducteurs, pertes capacitives, pertes diélectriques, excitation d'ondes de surface/modes de substrat, rayonnement non désiré des lignes d'accès ou fuite de courant dans les lignes de contrôle/polarisation [9].

Le gain de l'antenne $G(\theta, \varphi)$ est un paramètre proche de la directivité mais qui prend en considération l'efficacité de rayonnement η de l'antenne. Le gain est défini comme le ratio de l'intensité de rayonnement dans une direction donnée si la puissance acceptée dans l'antenne rayonnait de manière isotrope [9]. Dans cette définition, les pertes liées à la désadaptation et à la polarisation ont été négligées. Le gain est relié à l'efficacité en rayonnement et à la directivité de l'antenne par la relation suivante [9], [14] :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \cdot D(\theta, \varphi) \tag{II.8}$$

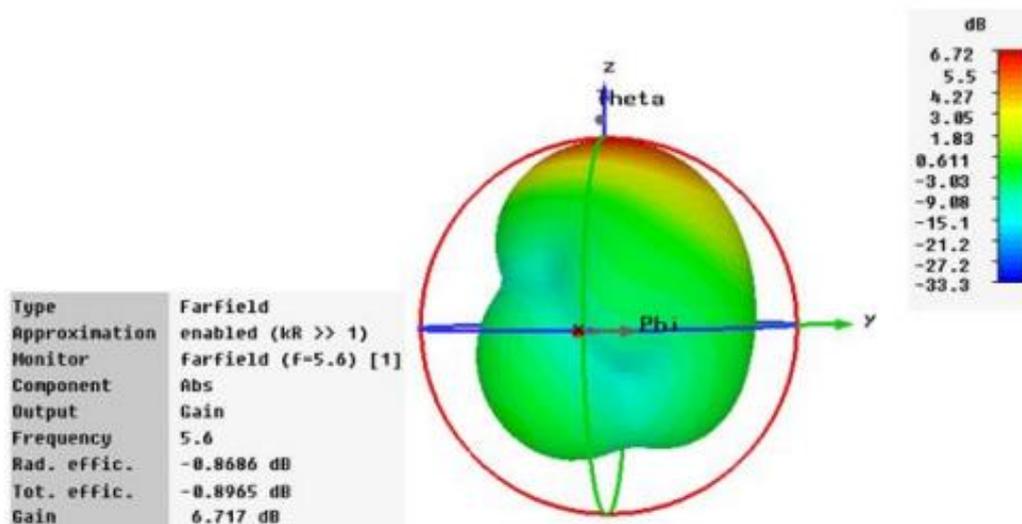


Figure II.3 Exemple d'un diagramme de rayonnement d'une antenne en 3D [9]

Une antenne directive est considérée comme une antenne à gain (qui s'exprime en dBi : décibel par rapport à l'antenne isotrope). Les mesures du gain de l'antenne sont effectuées dans une chambre d'anéchoïque [9].

II.2.4 Polarisation :

La polarisation d'une antenne correspond à celle du champ électrique \vec{E} de l'onde électromagnétique qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit par le biais de son lobe principal. Si le vecteur champ électrique de l'onde rayonnée par l'antenne est toujours dans la même direction, alors la polarisation est de type linéaire. Une polarisation linéaire peut être soit horizontale, soit verticale. À l'inverse, la polarisation est dite elliptique : le champ électrique décrivant une ellipse [9], [14].

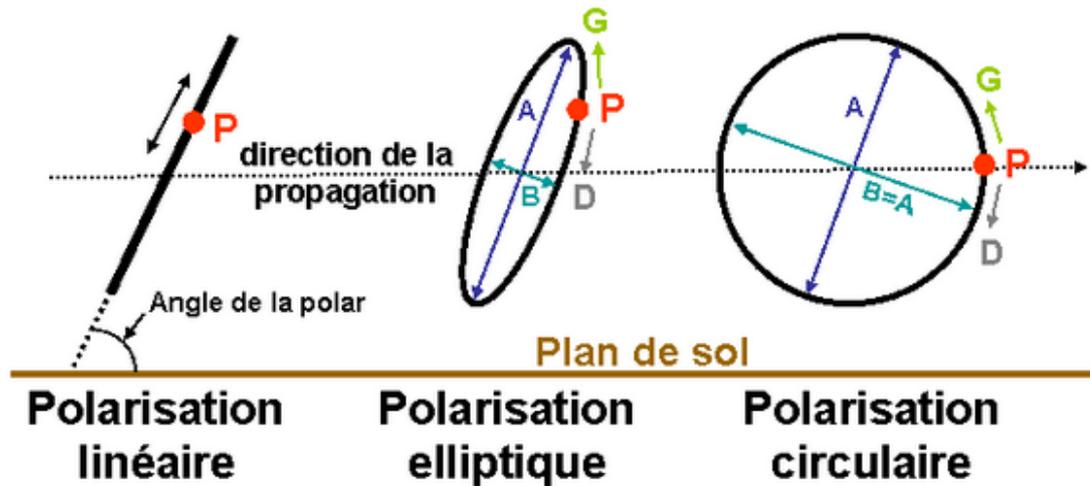


Figure II.4 Les types de polarisation [15]

II.3 Types des antennes :

Il existe plusieurs types d'antennes qui diffèrent selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. Elles sont classées comme suit [10] :

II.3.1 Les antennes filaires :

Le dipôle est une antenne filaire constitué de deux brins conducteurs écartés en directions opposées. La catégorie des antennes filaires comporte l'ensemble des antennes formées d'une structure de câble conducteur de diamètre faible où l'on considérera des densités linéiques de courant.

Actuellement, les antennes filaires directives existantes sont le plus souvent réalisées à partir d'un groupement de conducteurs rectilignes, circulaires ou hélicoïdaux. Elles regroupent l'ensemble des antennes formées de câble conducteur de faible diamètre. Les antennes de base sont : les dipôles, les monopôles et les boucles (comme exemple, on a l'antenne de type Yagi, antenne en V ou en losange, rideau d'antennes, cadre, antenne en hélice . . . etc) [10], [17].



Figure II.5 Antenne Filaire et antenne Yagi [10]

II.3.2 Les antennes directives :

II.3.2.1 Antenne cornet :

Le guide d'onde rectangulaire est un dispositif très utilisé pour la propagation d'ondes guidées, il est très utilisé en hyperfréquence pour son excellente qualité de transmission. Une antenne cornet est une antenne qui peut avoir une forme cylindrique, conique ou pyramidale employée pour des liaisons directes ou comme antenne source pour éclairer un réflecteur parabolique [10], [18].

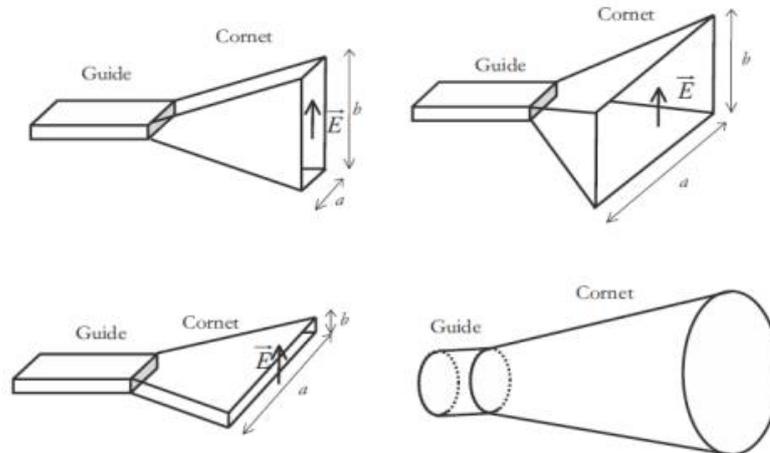


Figure II.6 Différents types d'antennes Cornet [18]

II.3.2.2 Antenne à transition progressive (Vivaldi) :

Les antennes à fente à transition progressive (TSA : Tapered Slot Antenna), constituent une autre catégorie importante d'antennes ULB directives. Ce sont des antennes à deux dimensions qui présentent une transition à partir d'une ligne ou d'un guide d'onde imprimé. Le profil de ces ouvertures peut prendre différentes formes [10], [19]:

- (a) : Antenne Vivaldi à fente conique (Tapered slot Vivaldi antenna).
- (b) : Antenne Vivaldi antipode (Antipodal Vivaldi Antenna).
- (c) : Antenne Vivaldi antipodale équilibrée (Balanced Antipodal Vivaldi Antenna).

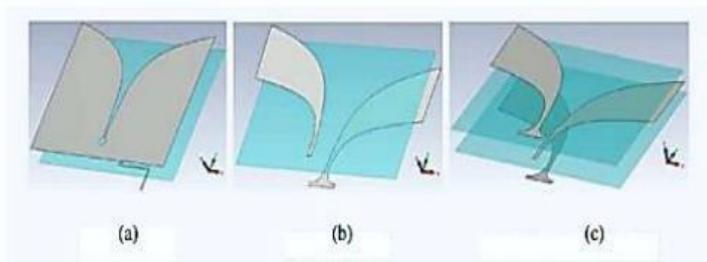


Figure II.6 Différentes structures de l'antenne Vivaldi [10]

Les antennes TSA sont adaptées sur une très large bande passante de 125% à 170% avec une directivité qui augmente avec la fréquence. Les gains atteints par les antennes TSA peuvent aller jusqu'à 10 dBi selon le type de profil [10], [20].

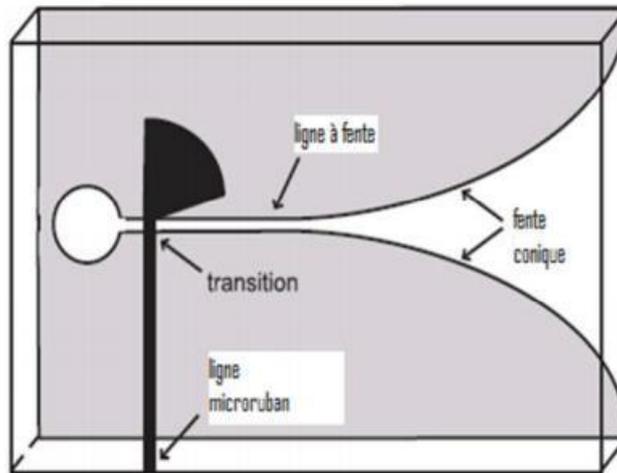


Figure II.7 Antenne Vivaldi [10]

II.3.3 Les antennes à fente :

Les antennes résonantes (fentes rayonnantes) possèdent généralement une ouverture rectangulaire ou circulaire. Cette ouverture est pratiquée dans un plan conducteur et alimentée par une ligne micro ruban. Les fentes rayonnantes se caractérisent par leur développement vertical ou horizontal en forme de cornière, avec des fentes de dimensions et d'emplacements particuliers qui dépendent de la fréquence.

Ce type de dispositif est utilisé lorsque le rayonnement doit être localisé. Aujourd'hui, les antennes à fentes sont largement utilisées dans de nombreuses applications. On peut placer un réseau de fentes rayonnantes dans des endroits où la transmission des ondes est mauvaise [10].

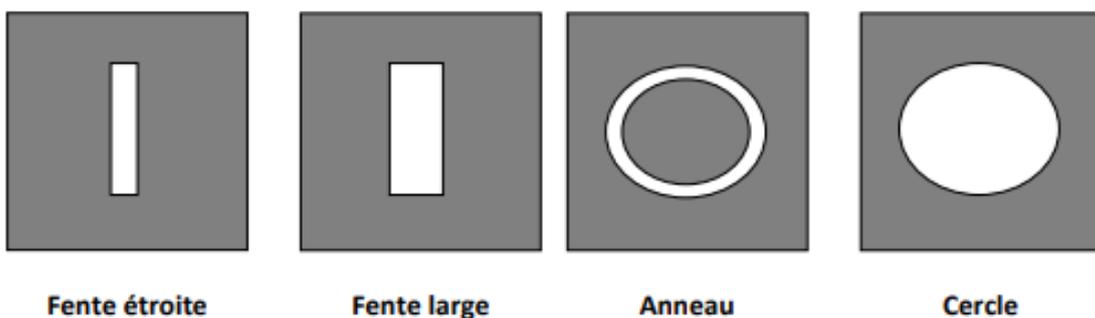


Figure II.8 Antenne à fentes [10]

II.3.4 Le dipôle demi-onde

L'antenne doublet ou appelée aussi dipôle, est constituée d'un conducteur filiforme de longueur l , coupé en son milieu afin qu'il soit alimenté par un générateur. Théoriquement, la longueur l peut être comprise entre une fraction de longueur d'onde λ à quelques λ . Toutefois, pour une longueur mécanique d'une demi longueur d'onde ($\lambda/2$), cette antenne présente des caractéristiques particulières : son impédance est de l'ordre de 73 Ohm et varie un peu en fonction du diamètre du conducteur [10].

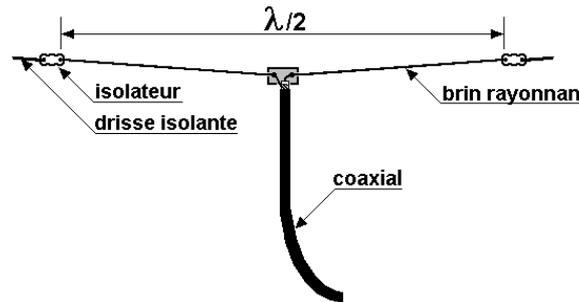


Figure II.9 Dipôle demi-onde [10]

II.3.5 Les antennes paraboliques :

Les paraboles sont des antennes à projecteurs d'ondes qu'on peut assimiler à des ouvertures rayonnantes de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde [10], [21].

La parabole est constituée d'un cornet dont les propriétés doivent être les suivantes [10] :

- Il doit collecter les micro-ondes concentrées au foyer du réflecteur.
- Il doit détecter un minimum de bruit et de signaux parasites.
- Il ne doit pas ajouter un bruit propre au signal reçu.



Figure II.11 Antenne parabolique [10]

II.3.6 Antennes omnidirectionnelles

Les antennes omnidirectionnelles sont les plus utilisées, elles rayonnent de l'énergie de manière égale en 360 degrés dans le plan horizontal. Dans le plan vertical, la puissance transmise par ce type d'antennes peut être concentrée dans deux sens opposés [10], [22].



Figure II.10 Antenne omnidirectionnelle [10]

Un exemple d'un diagramme de rayonnement de ce type d'antenne :

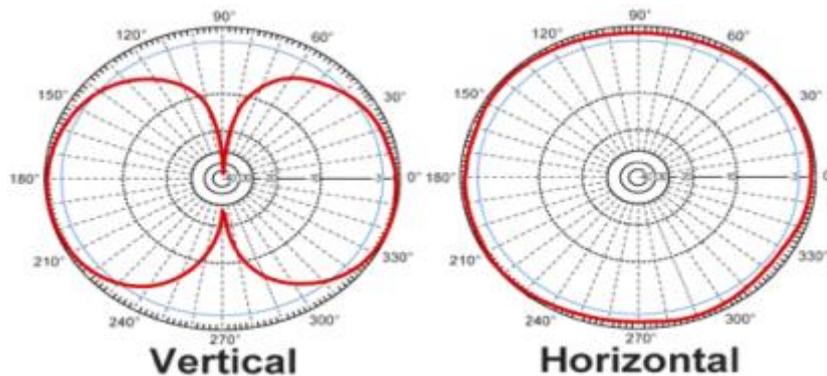


Figure II.11 Les coordonnées cartésiennes d'une antenne omnidirectionnelle verticale et horizontale [22]

Il existe deux catégories d'antennes large bandes omnidirectionnelles : les antennes biconiques et les antennes monopoles / dipôles large bandes [10].

II.3.6.1 Antenne biconique

Une antenne biconique est un conducteur qui peut envoyer et recevoir des signaux de deux réseaux d'éléments en forme de cône qui s'étendent l'un en face de l'autre. Cette antenne de longueur finie possède un gain maximum de 4 dBi, une bande passante de plus 100%, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel perpendiculaire à l'axe des cônes et un nul électrique

le long de l'axe des cônes [10], [23]. La polarisation est linéaire. Le concept de l'antenne biconique est basé sur le fait qu'un dipôle construit à l'aide d'un fil épais, offre une bande passante plus grande que celle d'un dipôle construit avec un fil. L'antenne biconique peut être considérée comme si la ligne de transmission biconique de l'antenne était évasée à l'infini [10]. L'antenne biconique infinie agit comme un guide d'onde pour une onde sphérique. Ces antennes dipôles à large bande fonctionnent dans des plages de 30 à 300 mégahertz (MHz), bien que des plages de 20 MHz à 3 gigahertz (GHz) soient possibles [10], [19].



Figure II.12 Antenne biconique [10]

II.3.6. 2 Antenne Discône :

L'antenne discône est considérée comme étant une antenne biconique dont un des cônes est remplacé par un plan de masse de dimensions infinies par rapport à la longueur d'onde la plus petite [10], [24].



Figure II.13 Antenne discône [10]

II.3.7 Antenne log-périodique :

Les antennes log-périodiques se basent sur le concept d'antennes dimensionnées pour toutes les fréquences, mais offrent aux structures un caractère périodique plutôt que linéaire [23]. Le premier concept de la conception consiste à ce que la géométrie de l'antenne peut être définie en utilisant des angles plutôt que la longueur. Le deuxième principe est l'impédance d'entrée de l'antenne indépendante de la fréquence. Il s'agit donc également d'une antenne indépendante de la fréquence. Troisièmement, les propriétés électriques de l'antenne se répètent périodiquement avec le

logarithme de la fréquence. Cette répétition périodique des propriétés électriques peut être obtenue à partir de la structure logarithmique de l'antenne [10], [25].

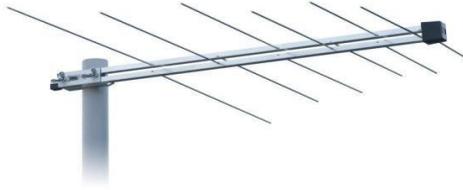


Figure II.14 Antenne log-périodique [10]

II.3.8 Antenne Patch (micro-ruban):

En 1953, le concept d'antenne imprimée fut imaginé pour la première fois, par Georges Deschamps. Dans les années 1970, la réalisation des premiers prototypes apparaît notamment grâce à l'amélioration des techniques de photo lithogravure du cuivre et de l'or sur substrat diélectrique, ainsi que des progrès dans la modélisation [26].

Le terme « Patch » (« pavé » ou « pastille », en français), désigne l'antenne élémentaire. Le plus souvent on utilise le terme « antenne imprimée » ou « antenne micro-ruban », car les premières antennes imprimées rectangulaires étaient constituées d'une partie de ligne micro-ruban rayonnante [10], [27].

II.3.8.1 Description d'une antenne imprimée :

L'antenne imprimée est constituée d'une mince couche métallique d'épaisseur t de forme géométrique appropriée (rectangle, cercle, triangle ou autres formes plus complexes), qui représente l'élément rayonnant. Cette couche est déposée sur la face supérieure d'un substrat diélectrique (FR4, Roger4350, ...). Ce substrat est quant à lui déposé sur un plan de masse [10], [28].

II.3.8.2 Structure d'une antenne imprimée :

L'antenne est composée d'un élément rayonnant qui possède une forme géométrique quelconque (rectangle, cercle, carré, ...), spécifiée selon les besoins. L'élément rayonnant est séparé d'un plan réflecteur conducteur par une ou plusieurs couches de substrat diélectrique qui peuvent avoir des permittivités relatives (ϵ_r) égales ou différentes.

En général, les substrats diélectriques ont une faible permittivité ($\epsilon_r \leq 3$), afin de faciliter et favoriser le rayonnement tout en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse [10], [16].

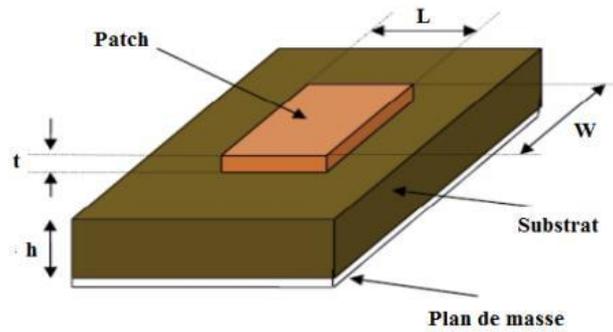


Figure II.15 Présentation d'une antenne imprimée [10]

L : Longueur du patch.

t : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch.

h : épaisseur du substrat.

Les gravures des parties métalliques peuvent prendre des formes assez variées en fonction des objectifs fixés pour la répartition du rayonnement dans l'espace. Ceci offre une grande souplesse de conception [10], [29].

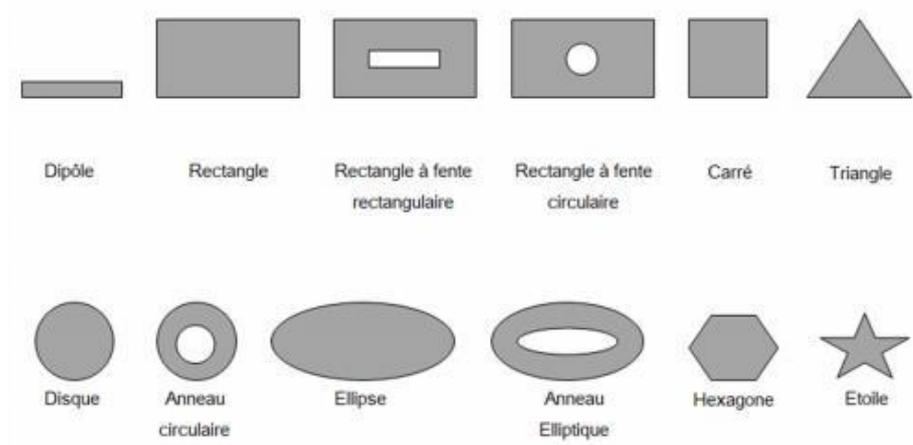


Figure II.16 Différentes formes d'antennes micro-ruban [10]

II.3.8.3 Les paramètres géométriques d'une antenne imprimée :

a) Largeur du Patch :

La largeur du Patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance ainsi que sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Par contre, son rôle est majeur pour l'impédance d'entrée de l'antenne et la bande passante à ses résonances [10], [30] :

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{II.9})$$

ϵ_r : La permittivité relative.

f : La fréquence fondamentale de l'antenne.

c : La vitesse de la lumière (3.10^8 m/s).

b) Longueur du Patch

La longueur du Patch détermine les fréquences de résonance de l'antenne. Il est à noter qu'il faut retrancher la longueur L qui correspond aux extensions des champs [10], [30] :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{r eff}}} \quad (\text{II.10})$$

Avec : $\epsilon_{r eff}$ qui représente la permittivité effective donnée par :

$$\epsilon_{r eff} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{\left(1 + 12 \cdot \left(\frac{h}{W}\right)\right)}} \quad (\text{II.11})$$

La longueur effective du Patch est égale à :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \frac{(\epsilon_{r eff} + 0.3) \left(\left(\frac{W}{h}\right) + 0.264\right)}{(\epsilon_{r eff} - 0.258) \left(\left(\frac{W}{h}\right) + 0.8\right)} \quad (\text{II.13})$$

La longueur du Patch est égale alors à :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (\text{II.14})$$

c) Choix du substrat :

Les substrats utilisés dans la conception des antennes imprimées sont nombreux et doivent être compatibles avec le matériau du Patch [30].

Dans le cas où le matériau du patch de l'antenne utilisé est ordinaire comme le cuivre par exemple, la permittivité relative du substrat varie de 1 à 12 [31].

La permittivité relative des substrats exploités dans la conception des antennes Patches est faible ($\epsilon_r \leq 3$). La constante diélectrique du substrat s'étale de 2.2 à 12 et les matériaux les plus usuels sont des composites à base de :

Téflon ($2 \leq \epsilon_r \leq 3$ et $\tan \delta \approx 10^{-3}$), polypropylène ($\epsilon_r = 2.18$ et $\tan \delta = 3.10^{-4}$) et des mousses synthétiques contenant énormément de minuscules poches d'air ($\epsilon_r = 1.03$ et $\tan \delta \approx 10^{-3}$) [10], [33].

II.3.8.4 Techniques d'alimentation

L'alimentation des antennes Patches est l'une des parties les plus importantes dans le processus de conception de l'antenne, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but [10], [32].

a) Alimentations par contact

• Alimentation par une ligne micro-ruban

Cette méthode d'alimentation est caractérisée par une ligne micro-ruban (généralement de 50Ω), connectée directement au bord du Patch rayonnant. La longueur de la bande conductrice est plus petite par rapport à l'élément rayonnant. L'avantage de ce genre d'alimentation, est qu'elle peut être gravée sur le même substrat, afin de fournir une structure plane. C'est une technique moins coûteuse et plus simple à réaliser [10], [34].

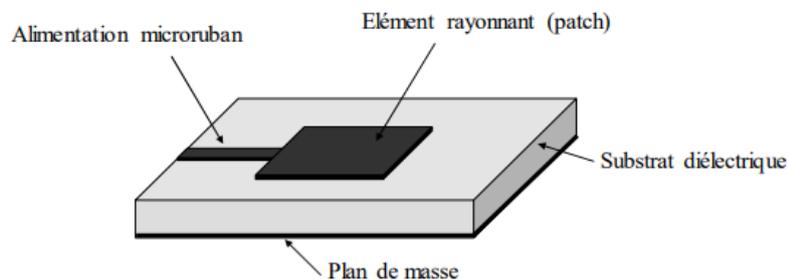


Figure II.17 Antenne imprimée alimentée par ligne micro-ruban [10]

• Alimentation coaxiale directe

L'alimentation des Patches peut être aussi effectuée par connexion directe en utilisant une ligne coaxiale. Cette ligne arrive par derrière le substrat et joint la plaque en traversant le plan de masse et le diélectrique. Le conducteur central de la ligne coaxiale est connecté en un point situé sur l'axe de symétrie du Patch, plus ou moins près du bord, afin de réaliser l'adaptation, alors que le conducteur extérieur est soudé au plan de masse [10], [29].

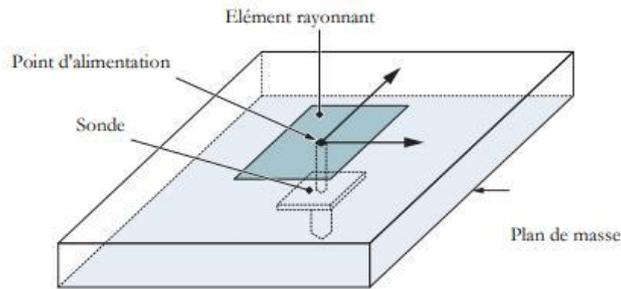


Figure II.18 Alimentation coaxiale directe [10]

b) Alimentations par proximité

• Alimentation par couplage électromagnétique

Ce type d'alimentation est réalisé par couplage électromagnétique d'une ligne micro-ruban avec l'élément rayonnant. Les principaux avantages de ce type d'alimentation sont l'élimination de rayonnement parasite et l'élargissement de la bande passante, tandis que son inconvénient réside dans la difficulté de la mise en œuvre [10], [32].

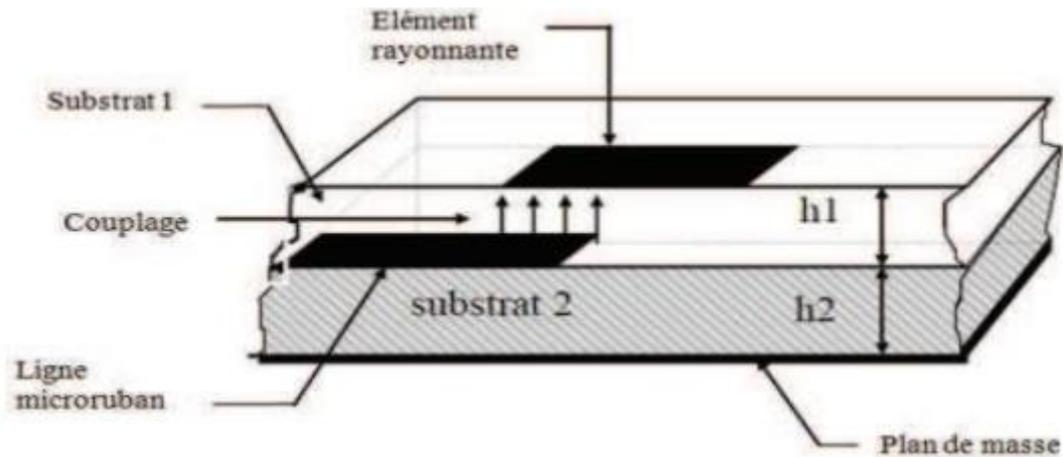


Figure II.19 Alimentation par couplage électromagnétique [10]

• Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse

L'antenne patch et la ligne d'alimentation micro-ruban sont placés de part et d'autre du plan de masse. La fente de couplage dans le plan de masse permet la circulation de l'énergie entre la ligne d'alimentation et le patch. Cette méthode exige un positionnement précis de la fente [10], [32].

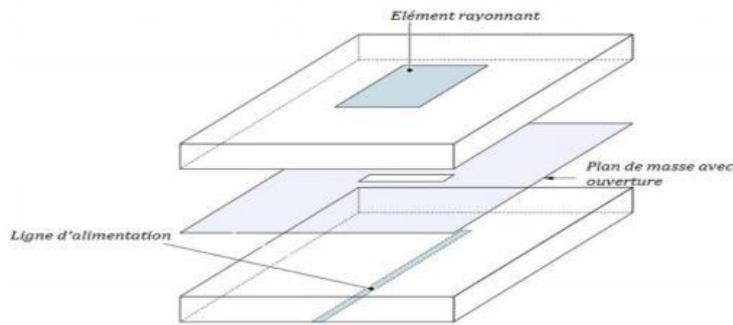


Figure II. 20: Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse [10]

II.3.9 Techniques d'adaptation des antennes Patches

II.3.9.1 Adaptation par ligne quart d'onde

Une ligne « quart d'onde » permet de réaliser une adaptation d'impédance en insérant un élément d'adaptation en série entre deux éléments d'impédances différentes mais purement réelles [10], [35].

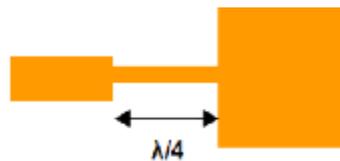


Figure II.21 Adaptation par ligne quart d'onde [10]

II.3.9.2 Adaptation par STUB

Un stub ramène une certaine admittance pure en parallèle sur la charge, qui dépend de son impédance caractéristique et de sa longueur. Cette admittance va donc s'ajouter à celle de la charge. Une fois l'admittance correctement calculée, elle permettra ainsi d'annuler la partie imaginaire apportée par la charge [10], [35].

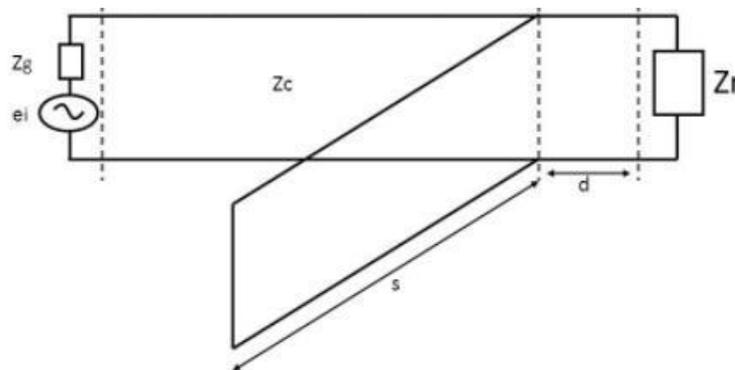


Figure II. 22: Adaptation par STUB [10]

II.3.9.3 Adaptation avec encoche

L'utilisation des encoches va modifier la géométrie du Patch, ce qui permettra d'avoir une antenne adaptée [10], [35].

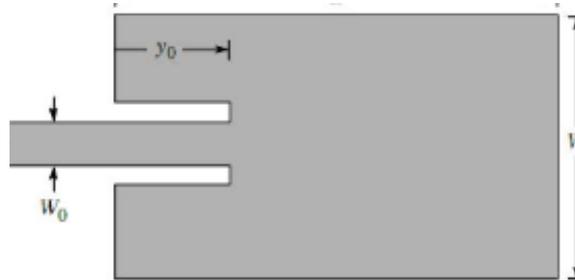


Figure II.23 Adaptation avec encoche [10]

II.3.10 Avantages et inconvénients des antennes imprimées :

II.3.10.1 Avantages :

Les applications des antennes imprimées couvrent un large spectre de fréquences : de 100 MHz à 100 GHz. Parmi les nombreux avantages de ces antennes, on y trouve [10], [16]:

- Un poids assez faible et un encombrement réduit.
- Une fabrication à faible coût.
- Des polarisations circulaire et linéaire pour les télécommunications.
- Les réseaux d'alimentation et d'adaptation sont fabriqués simultanément avec l'antenne.

II.3.10.2 Inconvénients :

Les inconvénients sont présentés comme suit [10], [32] :

- Une bande passante très étroite.
- Un faible gain, dû aux pertes.
- Un faible rendement (concentration des champs sur les parois métalliques).
- Création d'un effet de couplage parasite entre les éléments.
- Les puissances supportées sont limitées.
- Un rayonnement parasite de l'alimentation.

II.3.11 Applications des antennes Patch

En pratique, les avantages des antennes Patch sont plus nombreux que leurs inconvénients. Il existe plusieurs systèmes d'application qui exigent une bonne directivité. Parmi ces applications, on y trouve [10], [33] :

- Télémessure par missile.
- Les équipements portatifs.
- Télécommunications par satellites.
- La commande et le contrôle.
- Récepteurs satellite de navigation.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Antennes d'émission utilisées en médecine.

II.4 Les antennes reconfigurables :

II.4.1 Définition :

Une antenne reconfigurable peut être définie comme étant un dispositif capable de modifier ses caractéristiques de fonctionnement (fréquence opérationnelle, bande passante, polarisation, diagramme de rayonnement) d'une manière dynamique après sa fabrication.

La modification dans l'un de ses paramètres électriques, optiques, physiques (modification mécanique) ou l'intégration de matériaux qui se commandent (ferrites, cristaux liquides) permet de modifier les caractéristiques de l'antenne, même durant le fonctionnement de l'antenne en temps réel. Ces changements permettent à l'antenne de s'adapter au changement de l'environnement et aux contraintes liées aux systèmes de communications.

Les antennes reconfigurables représentent un sujet de recherche actif à cause de la demande croissante de ces types d'antennes, surtout dans les télécommunications sans fil (réseaux mobiles). Elles sont très flexibles, cela permet d'utiliser les ressources fréquentielles de manière optimale.

Les antennes Patches reconfigurables sont très attractives et représentent le meilleur choix pour les applications sans fil en raison de leurs nombreux avantages tels que la simplicité, la légèreté, la compatibilité et la facilité de fabrication et d'intégration.

Les antennes imprimées sont utilisées dans les téléphones cellulaires, les tablettes et les ordinateurs portables, etc [11].

II.4.2 La nécessité de la reconfiguration :

L'antenne est considérée comme étant l'élément principal dans la communication, son rôle est de capter ou de recevoir les ondes électromagnétiques puis de les transformer en ondes électriques ou inversement.

Les antennes imprimées sont très utilisées dans le domaine des télécommunications mobiles (téléphones cellulaires, tablettes, ordinateurs portables, ...etc). Ces antennes sont conçues et dédiées pour un fonctionnement sur une seule gamme de fréquence, ce qui empêche la diversité des services (Wi-Fi, WLAN, GSM, ...etc). L'utilisation de plusieurs antennes pour un seul dispositif n'est pas faisable. La solution est d'utiliser des antennes capables de changer la bande d'utilisation suivant le besoin de l'utilisateur : on parle alors, de notion de reconfiguration.

Les antennes reconfigurables offrent plus de liberté que les antennes Patchs simples (leurs paramètres et caractéristiques sont fixes et inchangeables), car ces antennes reconfigurables ont la possibilité de régler la fréquence de fonctionnement, de changer la bande d'exploitation elle-même, de filtrer les signaux parasites et d'orienter le lobe principal vers la direction privilégiée, ce qui augmente la capacité du réseau (mobile) grâce à la diversité spatiale fournie par ces types d'antennes [11].

II.4.3 Technologie Ultra Large Bande :

La technologie ULB (Ultra Large Bande) représente une nouvelle technologie de communication sans fil qui permettrait d'avoir des débits jamais atteints, dépassant le Gbit/s. Aussi, elle offre la perspective de nouveaux services comme l'intégration de fonctions de localisation et de transmission [9], [37]. La technologie ULB doit son nom aux caractéristiques spectrales des signaux qu'elle utilise, en l'occurrence les signaux à spectre de bande ultra large, caractérisés par une largeur de bande fractionnée supérieure à 20% ou occupant une bande de fréquences d'au moins 500 MHz [9], [38].

En 2002, la FCC a autorisé aux Etats-Unis, trois types de systèmes (imagerie radar, radar de véhicules et systèmes de communication) faisant appel à cette technologie, à la commercialisation et à l'exploitation sans licence. Pour les systèmes de communication, en particulier les applications WxAN, la FCC a réservé 7500 MHz dans la bande fréquentielle [3,1-10,6 GHz] (standard IEEE 802.15.3a). Pour répondre aux problèmes de coexistence avec les autres technologies sans fil présentes dans cette bande fréquentielle, la FCC a imposé des masques d'émission. En particulier, la densité spectrale de puissance des signaux émis doit être très faible ($-41,3$ dBm/MHz), ce qui la positionne dans le niveau de bruit électromagnétique non intentionnel [9], [39]. La conception d'antennes est l'un des principaux défis à résoudre. En effet, les antennes ULB font face aux mêmes

contraintes que les antennes à bande étroite, telles que le coût, la taille, l'intégration, ...etc, auxquelles se rajoutent d'autres contraintes liées à la largeur de bande nécessaire [9].

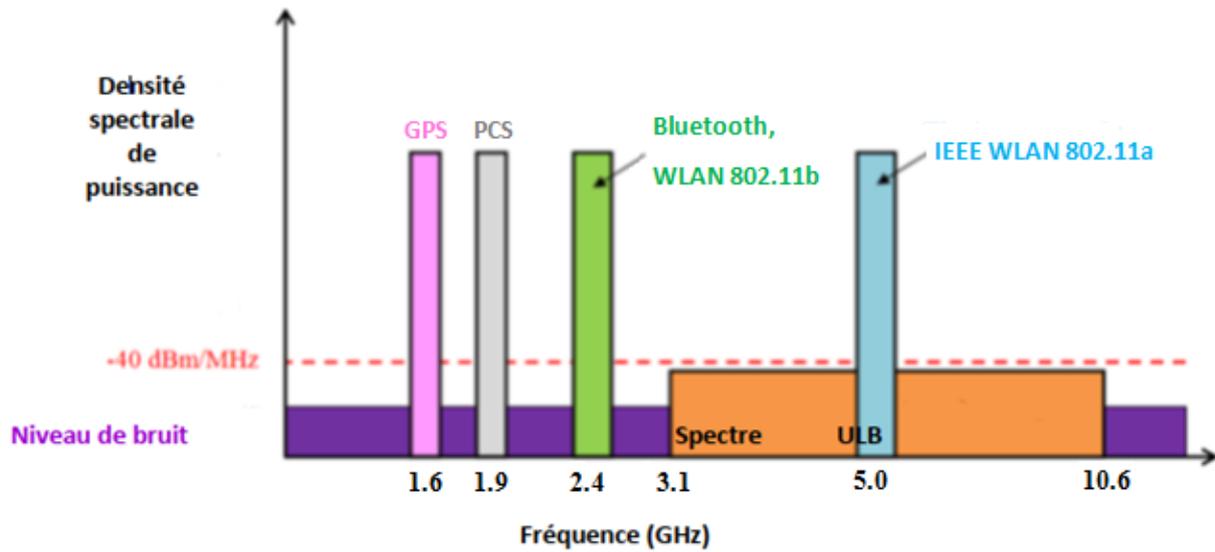


Figure II.24 La densité spectrale des différentes normes de communication [11]

II.4.4 Les techniques de reconfiguration :

Une antenne est considérée comme antenne reconfigurable lorsqu'au moins une de ses caractéristiques est modifiable après sa fabrication (fréquence, polarisation et diagramme de rayonnement). Diverses techniques de reconfiguration de l'antenne, existent. Dans ces techniques, on doit varier les caractéristiques de l'antenne en utilisant des composants actifs tels que, les diodes PIN, les RF-MEMS et les diodes Varactor pour les types électriques. Dans le domaine optique, on utilise des éléments de commutation optique tels que les photoconducteurs. Aussi, la reconfiguration peut être réalisée par une modification mécanique dans la structure de l'antenne, qu'on appelle la reconfiguration physique. Une autre technique de reconfiguration consiste à utiliser des matériaux intelligents ou agiles comme les ferrites et les cristaux liquides [11].

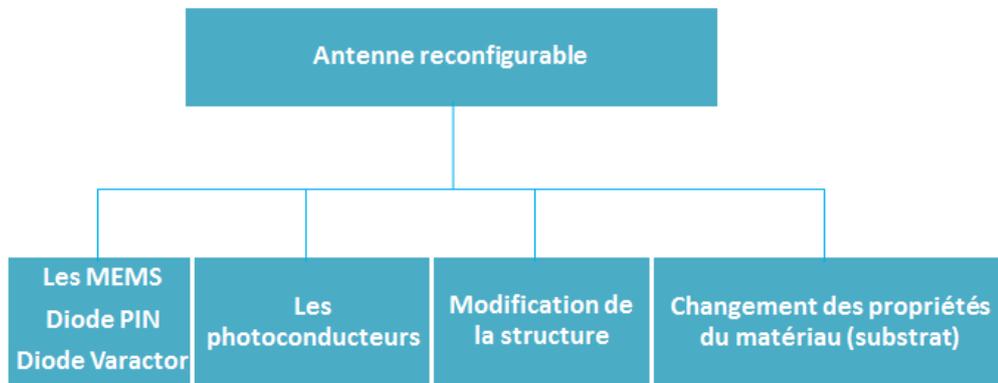


Figure II.25 Les différentes techniques de reconfiguration [11]

II.4.4.1 Diode PIN :

La diode PIN (Positive Intrinsic Negative) est un composant semi-conducteur utilisée comme un interrupteur rapide pour les signaux hautes fréquences. Cet interrupteur commute entre deux états [36], [40] :

État OFF : la diode est polarisée en inverse (diode bloquée), elle offre une forte impédance en parallèle avec une faible conductance et se comporte comme un circuit ouvert.

État ON : la diode est polarisée en direct (diode passante), elle présente une faible impédance et se comporte comme un circuit fermé.

Il est à noter que les diodes PIN sont fiables, peu chères et ne nécessitent qu'une faible tension de polarisation, mais exigent tout de même des courants assez importants à l'état ON, ce qui les rend gourmandes en puissance [40].

Pour un circuit planaire, lorsque la diode est placée sur le chemin de propagation de l'onde hyperfréquence, il est possible de laisser passer ce signal (polarisation directe) ou bien de le réfléchir (polarisation inverse). Ainsi, on obtient de cette manière un interrupteur. Cette technique est largement utilisée pour la réalisation d'antennes reconfigurables (en fréquence, en polarisation, ou en rayonnement) [36].

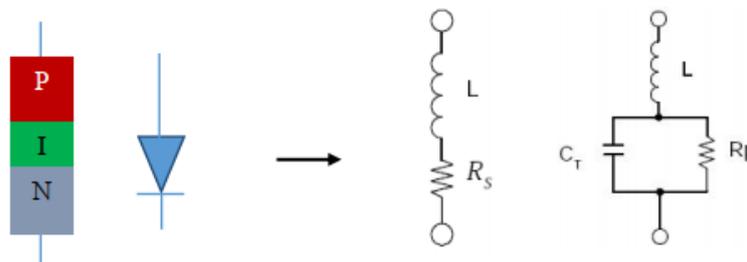


Figure II.26 Le circuit équivalent d'une diode dans les états ON et OFF [36]

II.4.4.2 Diode Varactor :

La diode Varactor (Variable Capacitor), plus communément appelée diode Varicap, est une diode qui se comporte comme un condensateur qu'on peut contrôler sa capacité en appliquant une tension inverse à ses bornes (Figure II.27). Elle offre une variation continue en fonction de la tension de polarisation, contrairement aux diodes PIN qui offrent une variation discrète des caractéristiques de l'antenne [36].

Les diodes Varactor présentent plusieurs avantages, comme la grande agilité continue, la facilité d'intégration ainsi qu'une faible consommation de puissance. Cependant, les pertes d'insertion sont parfois énormes et la complexité du réseau de polarisation augmente en fonction du

nombre de diodes Varactor utilisées. Il est à souligner que ces diodes sont souvent utilisées pour l'obtention de la reconfiguration en fréquence. La combinaison des diodes PIN et Varactor est souvent utilisée pour avoir un recouvrement fréquentiel important [36], [41].

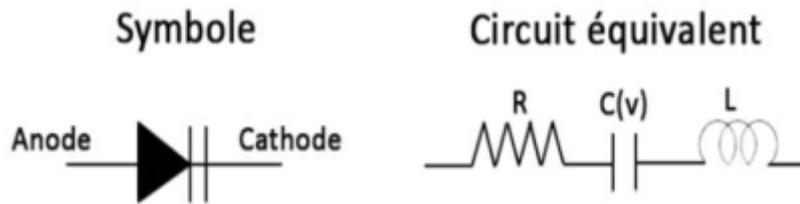


Figure II.27 Symbole et circuit équivalent d'une diode Varactor [36]

II.4.4.3 Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems):

Un MEMS est un composant microsystème qui permet d'obtenir un court-circuit ou un circuit ouvert dans une ligne de transmission RF à travers une déformation mécanique de microstructures (souvent des micro-membranes) [36].

Les MEMS sont conçus pour fonctionner dans une bande fréquentielle allant de 0,1 à 500 GHz. Ils peuvent servir pour diverses fonctions, selon leur conception. Ils peuvent essentiellement remplacer dans les structures antennaires des capacités ou des interrupteurs au même titre que les diodes Varicap ou PIN. Leur principe de fonctionnement repose sur un mouvement mécanique de l'ensemble du microsystème, régi par les lois de l'électrostatique, de la magnétostatique et de la thermodynamique [36], [42].

Un MEMS offre plusieurs avantages comme sa faible consommation de courant, une faible perte d'insertion, une bonne isolation entre ses deux états de polarisation ainsi qu'un temps de réponse ultra rapide. De même, un MEMS présente quelques inconvénients majeurs qui résident dans l'importante tension nécessaire à son activation (parfois jusqu'à 60 Volts), son coût de fabrication élevé et la non-garantie de sa fiabilité [36], [40].

Toutefois, les performances des MEMS ne cessent de s'améliorer. En effet, il existe actuellement des interrupteurs MEMS avec des tensions d'activation de 6 Volts [40], [43].

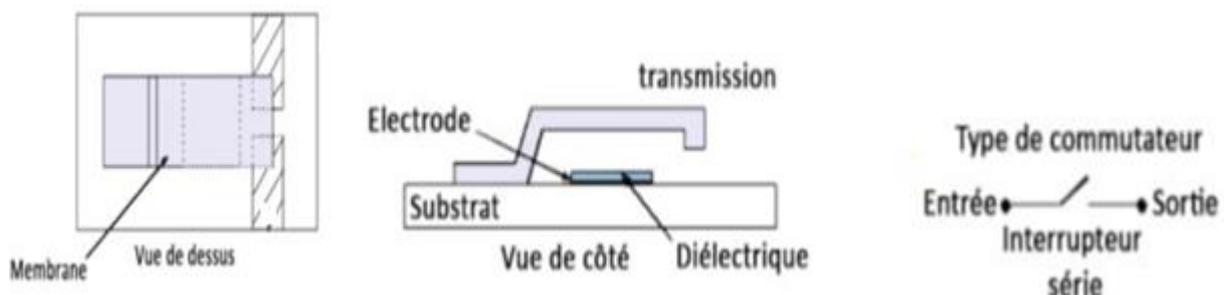


Figure II.28 Commutateur MEMS [36]

II.4.4.4 Les matériaux agiles :

Afin d'avoir la reconfiguration, une autre technique plus innovante consiste à utiliser des matériaux agiles dont les propriétés électromagnétiques (permittivité et/ou perméabilité) peuvent être accordées. Plusieurs études ont été menées récemment pour utiliser les matériaux agiles dans l'obtention de la reconfiguration, notamment les méta-matériaux, les cristaux liquides, les ferromagnétiques, et les ferroélectriques.

Les avantages majeurs de ces matériaux sont le faible encombrement et le peu de consommation d'énergie nécessaire à la commande. Quant aux inconvénients, ils sont nombreux :

La complexité de fabrication, les réseaux d'alimentation qui sont complexes, et le temps de réponse qui est élevé [36], [41].

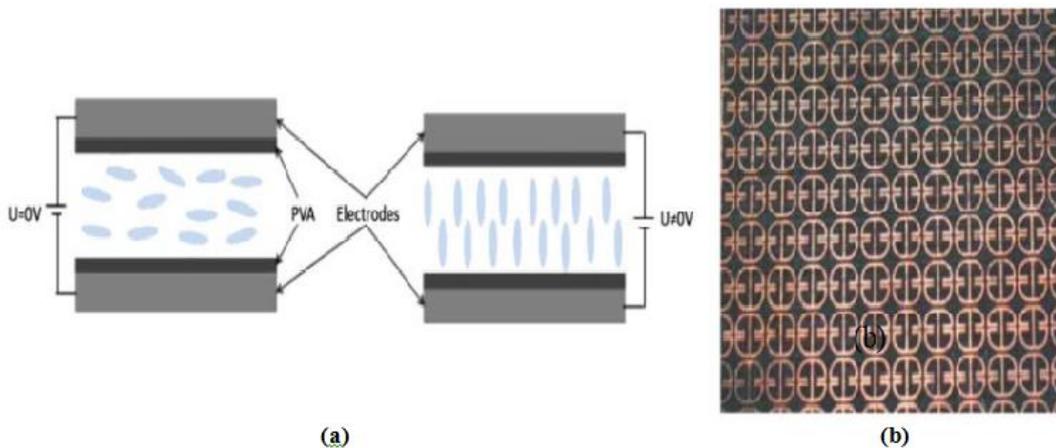


Figure II.29 (a) : Cristal liquide (PVA : Poly Vinyl Alcohol) et (b) : méta-matériau [36]

II.4.4.5 Commutateur optique :

Le commutateur optique photoconducteur sert à éviter le recours aux circuits de polarisation utilisés par d'autres techniques qui peuvent apporter de la complexité et interférer sur le rayonnement de l'antenne. En outre, il présente un faible temps de réponse qui est assez meilleur que les autres techniques citées ci-dessus, mais son coût de fabrication reste très élevé [36], [44].

II.4.5 Classification de reconfiguration :

Quelles que soit les techniques de reconfiguration utilisées, elles sont classifiées selon leurs fonctionnalités sur les caractéristiques de l'antenne (fréquentielle, spatiale (de rayonnement) ou en polarisation) [11].

II.4.5.1 La reconfiguration en fréquence :

Les antennes reconfigurables en fréquence ont la capacité de couvrir plusieurs bandes de fréquences afin de réduire significativement le nombre d'antennes nécessaires pour la

communication multimodes. La reconfiguration en fréquence permet de modifier la ou les fréquences de fonctionnement de l'antenne. Ces antennes sont aussi appelées antennes accordables en fréquence et sont classées en deux catégories : continue et discrète (par commutation) [11], [40].

Les antennes accordables continues permettent d'assurer le passage entre les bandes fréquentielles et la variation d'une ou plusieurs fréquences de résonance de façon continue à l'aide de composants de type diodes Varicap [11], [40].

Cependant, les antennes accordables discrètes ou par commutation permettent de commuter entre plusieurs bandes de fréquences à l'aide d'interrupteurs (diodes PIN par exemple). Afin de mieux comprendre la reconfiguration en fréquence, on prend l'exemple de l'application Wi-Fi (2,4GHz : Norme 802.11g). Ce service comporte plusieurs canaux de fréquences ISM. Une antenne reconfigurable en fréquence pour l'application Wi-Fi, doit être conçue pour couvrir tous les canaux précédents par commutation. La bande passante instantanée doit être assez grande pour couvrir chaque canal grâce à l'agilité fréquentielle qui permet de se déplacer d'un canal à un autre [40].

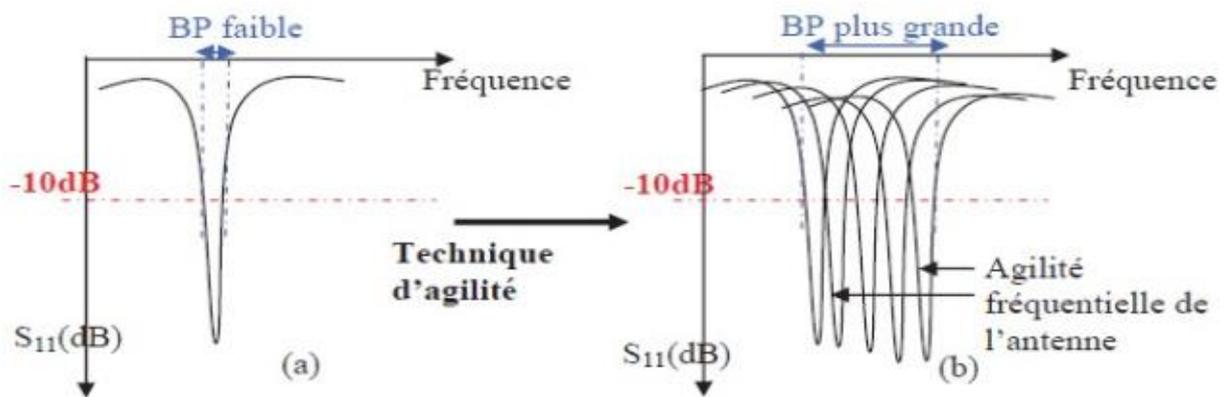


Figure II.30 Illustration de l'agilité fréquentielle [40]

➤ **Principe de la reconfiguration en fréquence :**

Une antenne reconfigurable (ou agile) en fréquence est obtenue grâce à l'intégration d'éléments actifs accordables qui permettent de modifier la longueur électrique effective de l'antenne. Ces éléments actifs intégrés peuvent être des condensateurs variables dont la valeur de la capacité change en fonction d'un champ électrique externe (diode Varactor ou condensateurs à base de matériaux dont les propriétés électriques peuvent être modifiées). Les antennes qui intègrent de tels éléments présentent une fréquence de fonctionnement pouvant balayer une bande de fréquence de manière continue.

Une autre technique de reconfiguration en fréquence basée sur des commutateurs (les diodes PIN, les FET (transistors à effet de champ), les photodiodes, les MEMS ou des commutateurs à base de matériaux à transition isolant-métal). Cette technique permet la variation de la fréquence de

résonance de l'antenne de manière discrète. D'autres antennes reconfigurables en fréquence existent combinant à la fois les catégories continue et discrète [36].

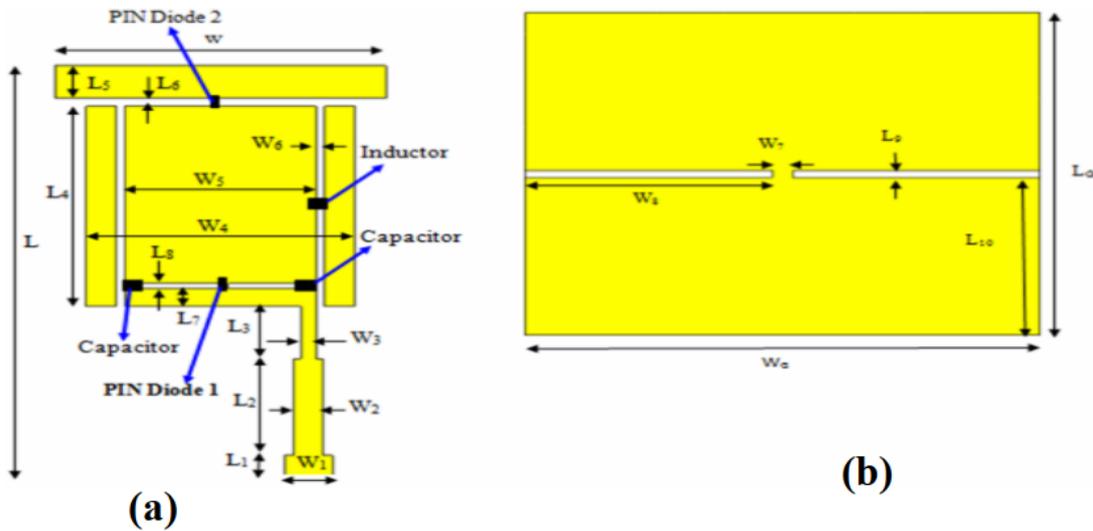


Figure II.31 La reconfiguration de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b) [11]

II.4.5.2 La reconfiguration en rayonnement :

Une antenne reconfigurable en rayonnement est une structure rayonnante dont le diagramme de rayonnement peut être modifié dynamiquement. Ce diagramme peut être changé en termes de forme, de direction ou de gain. La reconfiguration en rayonnement peut être utilisée pour privilégier ou non certaines directions de rayonnement de l'antenne. C'est-à-dire, qu'elle permet d'orienter le lobe principal vers les directions utiles et d'annuler les rayonnements dans les directions des interférences, contribuant ainsi à améliorer la capacité du système [36], [40]. Plusieurs concepts de reconfiguration en rayonnement existent, parmi lesquels, il y a l'utilisation des diodes PIN, des MEMS et des photoconducteurs [40].

Généralement, la reconfiguration en rayonnement s'effectue en modifiant la forme, la direction, ou le gain des diagrammes de rayonnement pour atteindre ou éviter certaines directions. Ce type de reconfiguration peut être utilisé aussi pour éviter les sources de bruit ou le brouillage électronique, améliorer la sécurité et économiser de l'énergie en changeant la directivité vers les utilisateurs ciblés. Par conséquent, ce type de reconfiguration permet de renforcer le signal dans une direction souhaitée ou éviter les signaux qui viennent des directions non souhaitées. Par ailleurs, la reconfiguration en rayonnement est très utile pour les applications de radio cognitive pour effectuer le balayage spatial et assurer la communication dans une direction précise. La reconfiguration en rayonnement est basée sur l'utilisation d'un seul élément rayonnant ou d'un réseau d'antennes [36].

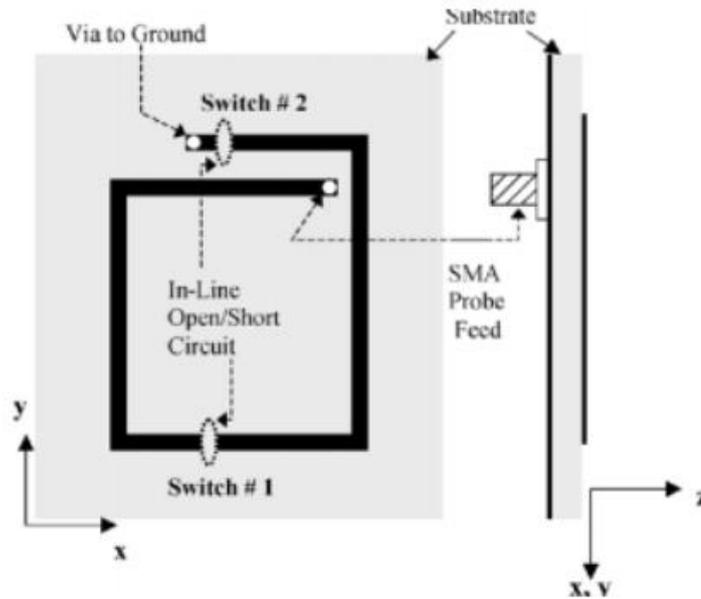


Figure II.32 La reconfiguration de rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée [11]

II.4.5.3 La reconfiguration en polarisation

Afin de réaliser des liaisons sans fil plus fiables et robustes, la reconfiguration en polarisation peut s'avérer très utile. Pour cela, on cherche généralement à changer le sens ou la phase des courants circulants sur l'élément rayonnant, sans les déformer pour ne pas perturber les autres caractéristiques de l'antenne (mêmes fréquences de résonance et même rayonnement). Il s'agit alors, de modifier uniquement l'orientation vectorielle du champ \vec{E} [40].

Toutes les techniques employées pour les autres types de reconfiguration peuvent également s'appliquer ici. En fait, il est possible de modifier la polarisation de l'antenne en ajoutant, par exemple, des fentes pour perturber les lignes de courant [40]. L'antenne Patch avec des fentes commutables, le "Patch Antenna with Switchable Slots" ou "PASS" est un exemple d'antenne reconfigurable [40], [45] (Figure II.33). L'antenne PASS est composée d'une antenne Patch en technologie micro-ruban dans laquelle une ou plusieurs fentes sont découpées. Un commutateur (diode ou MEMS RF) est inséré au milieu de la fente pour contrôler le comportement des courants [40]. Lorsque le commutateur est à l'état OFF, on remarque sur la Figure II.33, que les courants en pointillés blancs sont obligés de contourner la fente. Quand le commutateur est dans l'état ON, le courant va suivre le chemin le plus court ainsi créé. Ce type de reconfiguration est réalisé en ajoutant deux fentes orthogonales dans le Patch. L'actionnement des commutateurs implique une polarisation circulaire droite ou gauche. L'utilisation de l'antenne PASS a également permis de réaliser la reconfiguration par commutation entre deux bandes de fréquence [40], [46].

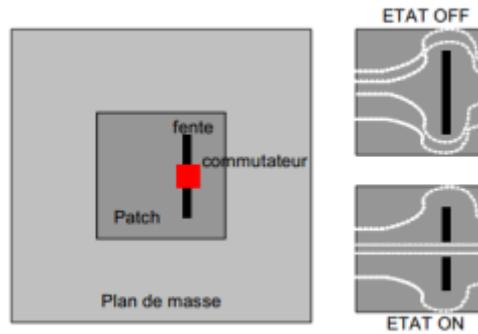


Figure II.33 La reconfiguration de polarisation en utilisant une antenne PASS [40], [47]

II.4.6 Avantages et inconvénients d'une antenne reconfigurable

Une antenne reconfigurable possède des avantages et des inconvénients :

➤ **Les avantages**

Parmi ses avantages [36] :

- Elle offre la flexibilité et répond aux exigences de la plate-forme radio sans fil (des services multiples dans un seul appareil).
- La réallocation et la gestion dynamique du spectre.
- Une bonne séparation entre les différentes normes sans fil et les bandes de fréquence.
- Réduction du nombre d'antennes dans le système permettant ainsi de réduire la taille et le coût de l'appareil.
- La reconfiguration en fréquence est utile dans de nombreuses applications sans fil.
- La reconfiguration en polarisation permet de réduire des problèmes tels que l'affaiblissement du signal dû à la propagation par trajets multiples, la sensibilité de l'émetteur-récepteur des signaux transmis vers l'antenne et la sécurité, ...etc.
- La reconfiguration en rayonnement permet d'avoir une diversité spatiale.

➤ **Les inconvénients**

Parmi ses inconvénients [36] :

- Leur coût est plus important que les antennes classiques (introduction des composants actifs).
- Une consommation énergétique élevée (composants actifs à polariser en continu).
- Difficultés de conception et de simulation dues à l'intégration des composants actifs dans l'antenne (nécessité d'utiliser des packages, circuit de polarisation).
- Réduction de l'efficacité.

II.4.7 Conclusion

Ces dernières années, les antennes reconfigurables suscitent un grand engouement car elles apportent davantage de nouvelles fonctionnalités et solutions. Dans ce chapitre, on a d'abord présenté des généralités sur les antennes imprimées, leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs techniques d'alimentation les plus utilisées. Ensuite, on a abordé les différents types de reconfiguration qui existent, notamment en fréquence, en polarisation et en rayonnement. Enfin, ce chapitre est clôturé par un bref aperçu des domaines d'application et quelques avantages et inconvénients des antennes reconfigurables et leurs nécessités dans le domaine des télécommunications multistandards.

Dans le chapitre suivant, nous allons simuler des antennes reconfigurables en utilisant une technique de modélisation par commutation et une méthode de reconfiguration en fréquence en utilisant des diodes PIN.

CHAPITRE III

Conception et Simulation des Antennes Reconfigurables pour l'Imagerie Médicale

Sommaire

III.1 Introduction	53
III.2 Modélisation par commutation	54
III.2.1 Conception d'une antenne patch rectangulaire reconfigurable en fréquence	54
III.2.2 Outil de simulation	55
III.2.3 Géométrie de l'antenne simulée	55
III.2.4 Antenne patch à fente reconfigurable en fréquence	57
III.2.5 Résultats de la simulation	57
III.3 Reconfiguration par insertion des diodes PIN	61
III.3.1 Résultats de la simulation	63
III.4 Conclusion	74

III.1 Introduction

Depuis un certain nombre d'années, les antennes reconfigurables sont un sujet de recherche très actif. De plus, la reconfiguration des antennes devient de plus en plus intéressante dans le domaine médical, car les antennes doivent offrir des fonctionnalités supplémentaires et avoir des propriétés de plus en plus flexibles, tout en occupant des volumes physiques identiques ou plus petits qu'auparavant. Avoir des antennes différentes pour chaque protocole sans fil, par exemple, n'est plus une solution suffisante, il est judicieux donc de partager l'espace fréquentiel limité disponible.

Les antennes reconfigurables peuvent offrir une grande flexibilité pour utiliser cet espace de manière optimale.

La difficulté est que les antennes reconfigurables prennent souvent des formes non canoniques. Le comportement des antennes est difficile à prévoir et les outils de modélisation doivent jouer un rôle important dans la recherche de solutions pour la conception de ces antennes.

Il existe deux principaux défis pour un outil de simulation :

1) Le premier est spécifique : comment modéliser les mécanismes de reconfiguration eux-mêmes ?

Différentes méthodes de reconfiguration de l'antenne sont utilisées, mais les principales consistent à modifier la forme de l'antenne mécaniquement, à changer les propriétés des matériaux de l'antenne, ou à utiliser des commutateurs (Switches) pour activer ou désactiver différentes parties de l'antenne ou pour modifier les trajets de courant sur l'antenne.

2) Le deuxième défi est un peu plus général et concerne la manière de modéliser efficacement une antenne unique avec de multiples modes de fonctionnement, qui peuvent tous affecter le fonctionnement des autres.

Il est très important de pouvoir simuler les antennes avec précision avant la réalisation. Une géométrie unique doit être optimisée pour fonctionner correctement pour toutes les différentes configurations, ce qui nécessite un environnement de simulation robuste.

Un certain nombre d'outils de simulation peuvent répondre à cette exigence, mais notre simulation porte sur une solution dans CST Studio Suite qui combine CST Micro-Wave Studio (CST MWS) et CST Design Studio (CST DS). Cet outil de simulation électromagnétique permet de faire la conception et la simulation de plusieurs types d'antennes.

Dans ce chapitre, nous allons concevoir avec l'outil CST, une antenne Patch rectangulaire avec une fente sur toute la largeur du Patch, reconfigurable en fréquence, en utilisant une technique

de modélisation et une autre de reconfiguration ; la première, avec des commutateurs métalliques et la seconde, avec des diodes PIN.

Cette antenne a été conçue pour avoir un comportement radio cognitif grâce à la reconfiguration en fréquence et fonctionner dans un spectre fréquentiel compris entre 1 et 10 GHz au profit des applications médicales.

III.2 Modélisation par commutation

Les commutateurs métalliques constituent l'un des mécanismes, les plus couramment utilisés pour réaliser la reconfiguration d'une antenne. Les commutateurs peuvent être utilisés pour déconnecter les parties d'une structure d'antenne, les unes des autres ou pour créer différents chemins pour le passage du courant sur une antenne. Les différents types de commutateurs présentent des avantages différents en termes d'affaiblissement, d'insertion, d'isolation, de vitesse de commutation, de bande passante, de tension d'actionnement et de courant de polarisation [49].

Une autre catégorie importante de commutateurs est celle du silicium pompé optiquement [50].

Les commutateurs peuvent être modélisés à différents niveaux de complexité, en fonction de la précision requise et des ressources informatiques disponibles. À un niveau basique, une languette métallique peut être simplement modélisée par un interrupteur ; la commutation entre les états ON et OFF est alors une simple question de simulation du modèle, avec et sans languette métallique [48].

Mais, pour tout niveau de complexité supplémentaire, la simulation des interrupteurs de tous types nécessite une simulation hybride circuit-électromagnétique. Le niveau de complexité requis dans la modélisation du commutateur, peut faire une réelle différence dans les résultats obtenus et donc dans la façon dont les performances simulées correspondront à une conception de plus en plus proche du réel [48].

III.2.1 Conception d'une antenne patch rectangulaire reconfigurable en fréquence

L'antenne simulée est une antenne imprimée rectangulaire à fente, reconfigurable en fréquence.

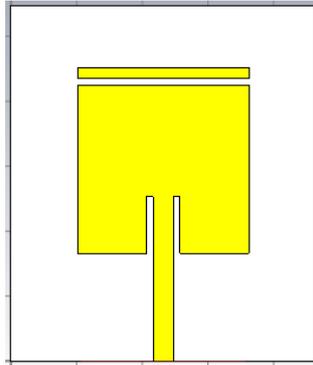


Figure III. 1: Antenne Patch rectangulaire à fente

III.2.2 Outil de simulation

La conception de l'antenne a été faite en utilisant le logiciel de simulation électromagnétique CST Studio Suite v.2019. L'antenne a été optimisée pour qu'elle rayonne dans la bande 1-10 GHz.

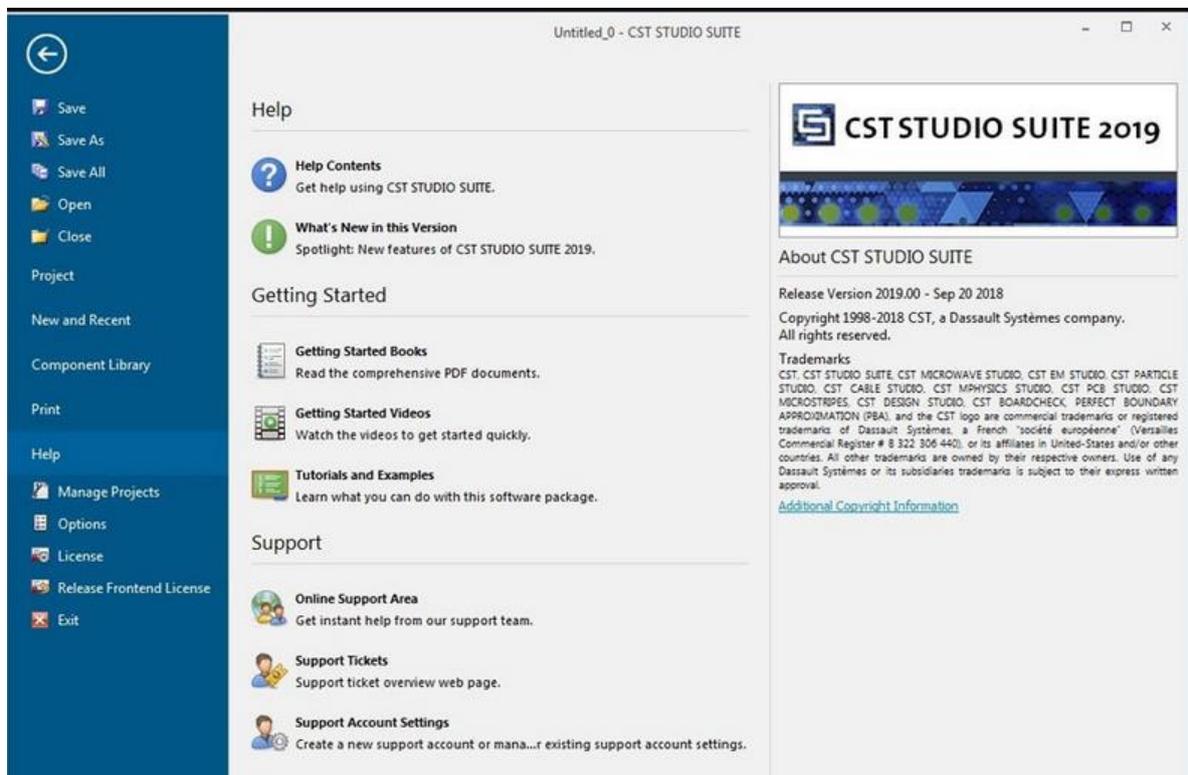


Figure III. 2: Outil de simulation CST Studio Suite 2019

III.2.3 Géométrie de l'antenne simulée

L'antenne Patch rectangulaire à fente fonctionnant à une fréquence de 2.5 GHz, est constituée d'un Patch de dimension (longueur : $L_p = 28.56$ mm et largeur : $W_p = 36.85$ mm), imprimé sur la couche supérieure d'un substrat en FR4 de permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$, d'épaisseur : $h = 1.6$ mm, de longueur $L_s = 54.75$ mm et de largeur : $W_s = 46.45$ mm. Une ligne d'alimentation

de longueur $L_f = 16.59$ mm et de largeur $W_f = 3.11$ mm est utilisée pour alimenter l'antenne comme présenté dans la Figure III.3.

À une longueur de 20.69 mm du Patch, une fente de 1 mm de longueur a été créée sur toute la largeur du patch afin d'y insérer dedans une ou plusieurs languettes métalliques de dimensions 1 x 0.5 mm².

Notons que les dimensions et la position d'une fente influencent énormément sur la fréquence de résonance d'une structure rayonnante qu'on veut atteindre. Un plan de masse de dimension 54.75 x 46.45 mm² est imprimé sur la face arrière du substrat.

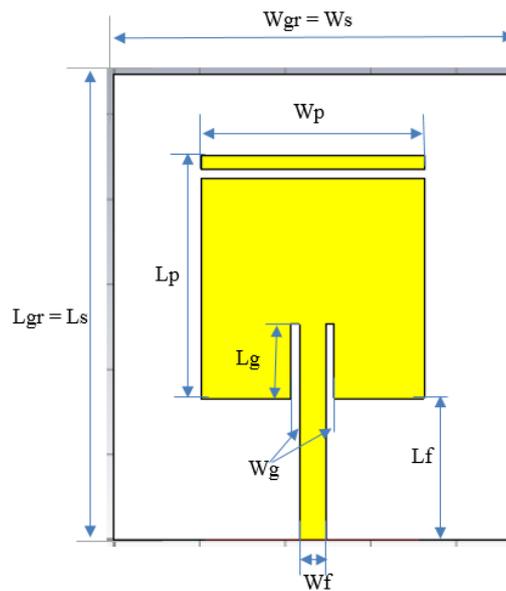


Figure III. 3: Dimension d'une antenne Patch rectangulaire à fente

La figure III.4 présente la forme de l'antenne simulée à la fréquence 2.5 GHz.

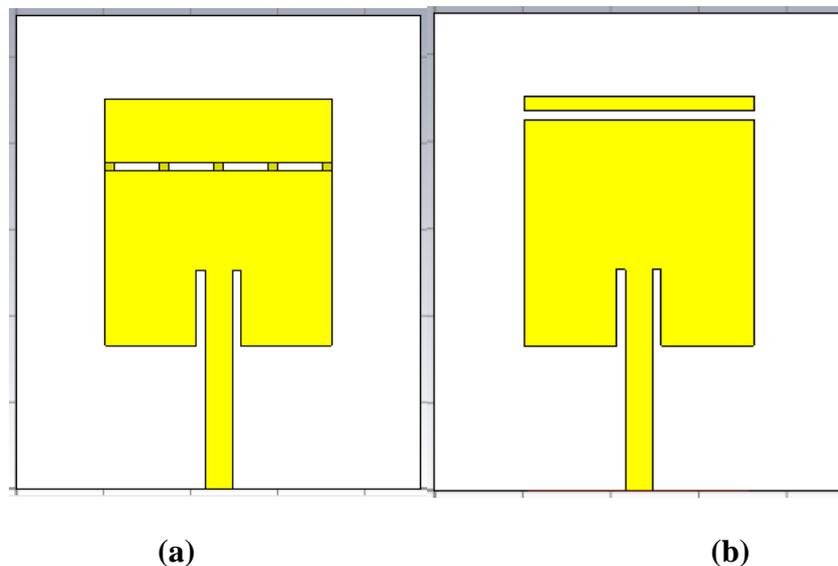


Figure III. 4: Forme de l'antenne simulée en (a) : avec languettes métalliques et en (b) : sans languettes

III.2.4 Antenne patch à fente reconfigurable en fréquence

Afin que l'antenne soit reconfigurable en fréquence, nous avons varié le nombre de plaques métalliques sur toute la longueur de la fente, jusqu'à obtention d'un nombre suffisant permettant d'avoir la modélisation adéquate pour une bonne reconfiguration. Selon l'état des slots (état ON lorsqu'une languette métallique y est insérée et état OFF dans le cas du vide), six principaux modes sont obtenus et décrits dans le tableau III.1.

Le premier mode M1 correspond à un état OFF de tous les slots.

Le second mode M2 correspond à un seul slot à l'état ON et quatre slots à l'état OFF.

Le troisième mode M3 correspond à deux slots à l'état ON et les trois restants sont à l'état OFF.

Le quatrième mode M4 correspond à trois slots à l'état ON et le reste est à l'état OFF.

L'avant dernier mode M5 correspond à quatre slots à l'état ON et un seul à l'état OFF.

Le dernier mode M6 correspond à un état ON des cinq slots.

Le tableau III.1 récapitule tous les modes cités ci-dessus.

Tableau III.1 Les modes de fonctionnement de l'antenne reconfigurable

MODES	ÉTATS	
	ON	OFF
M1	/	S1, S2, S3, S4 & S5
M2	S1	S2, S3, S4 & S5
M3	S2 & S3	S1, S4 & S5
M4	S1, S2 & S3	S4 & S5
M5	S2, S3, S4 & S5	S1
M6	S1, S2, S3, S4 & S5	/

III.2.5 Résultats de la simulation

2.75 GHz correspondant aux modes cités ci-dessus, illustrés sur les figure III.6, III.7, III.8, III.9 et III.10.

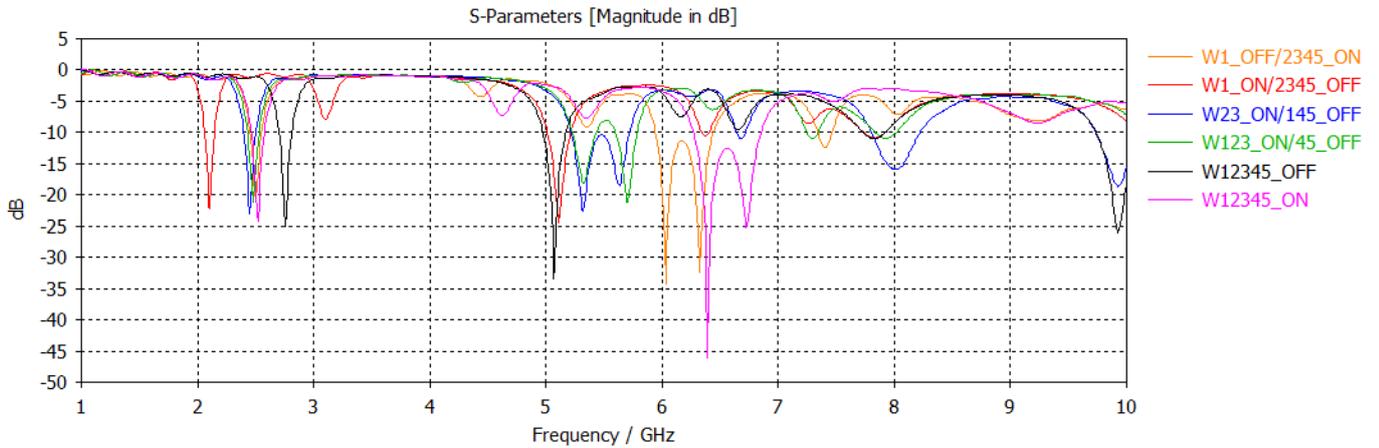


Figure III. 6: Les coefficients de réflexion S_{11} des six modes

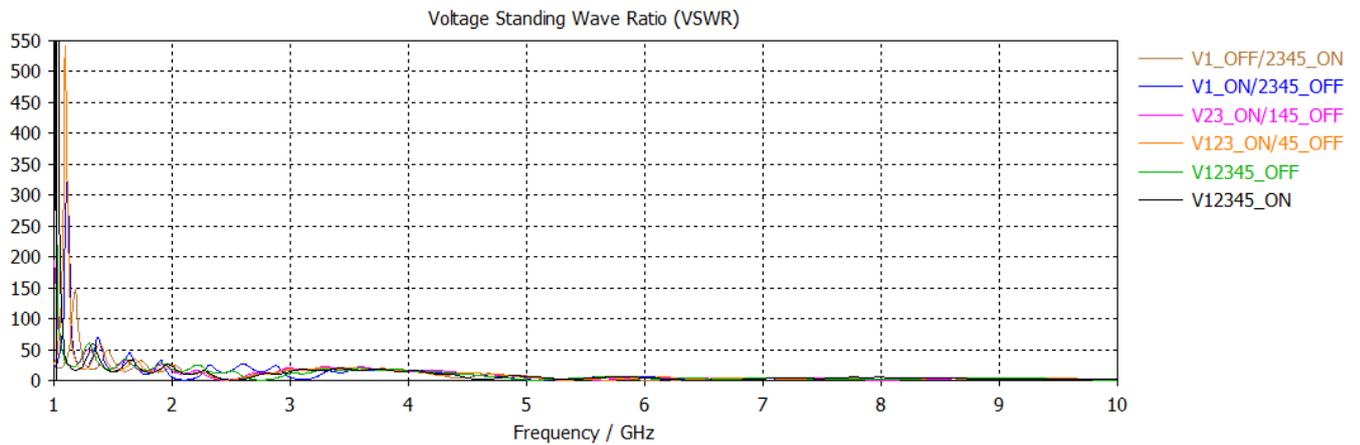


Figure III. 7: Les taux d'ondes stationnaires VSWR des six modes

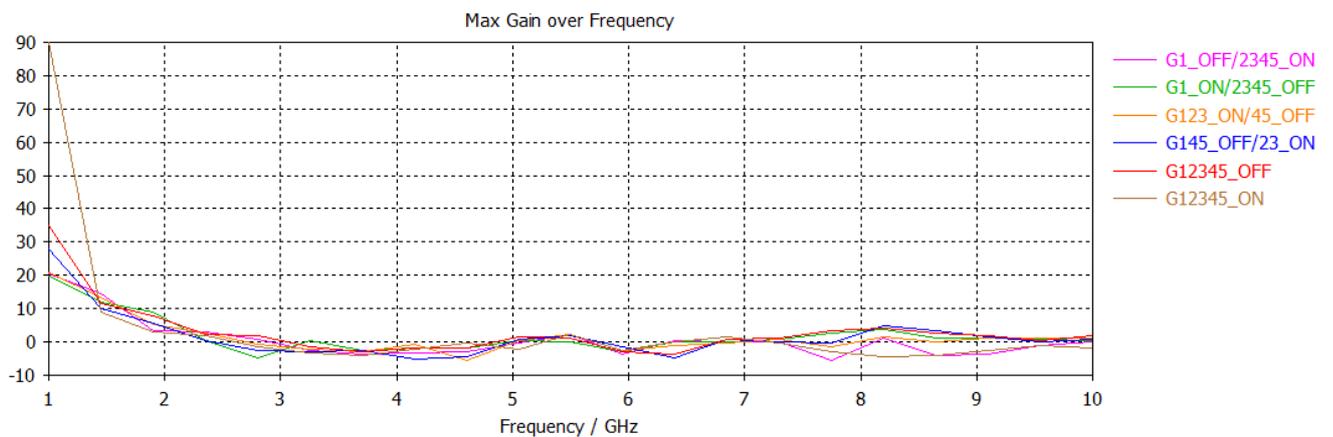


Figure III. 8: Les gains en fonction de la fréquence des six modes

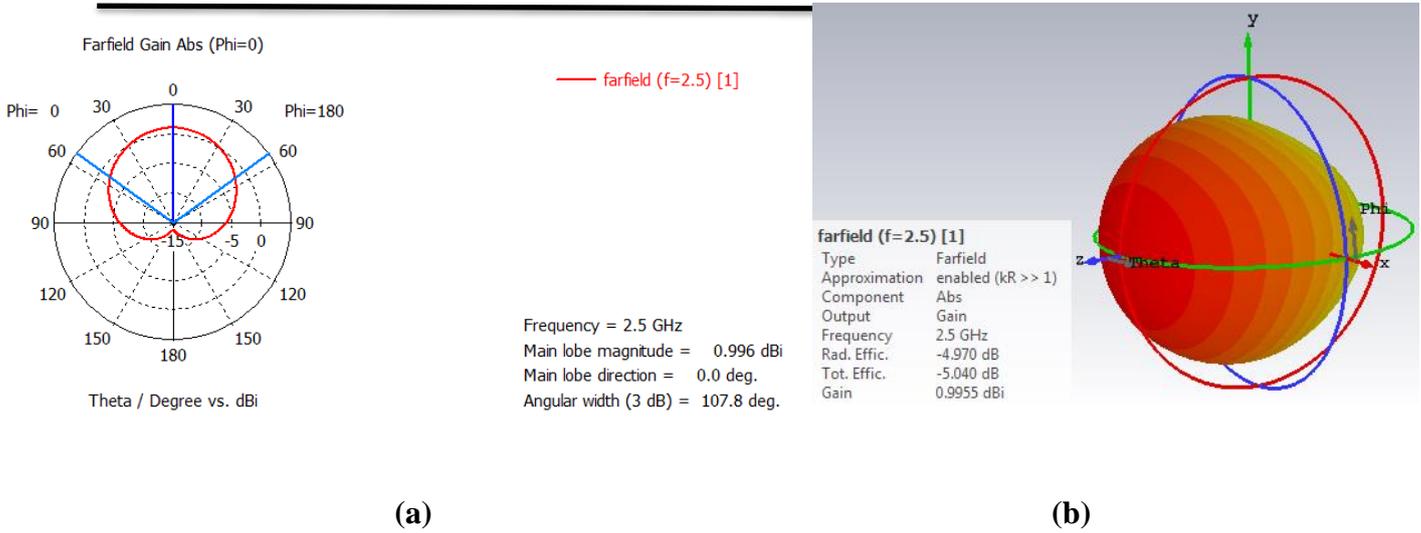


Figure III. 9: Diagramme de rayonnement en (a) : 2D ; (b) : 3D, à $f = 2.5$ GHz

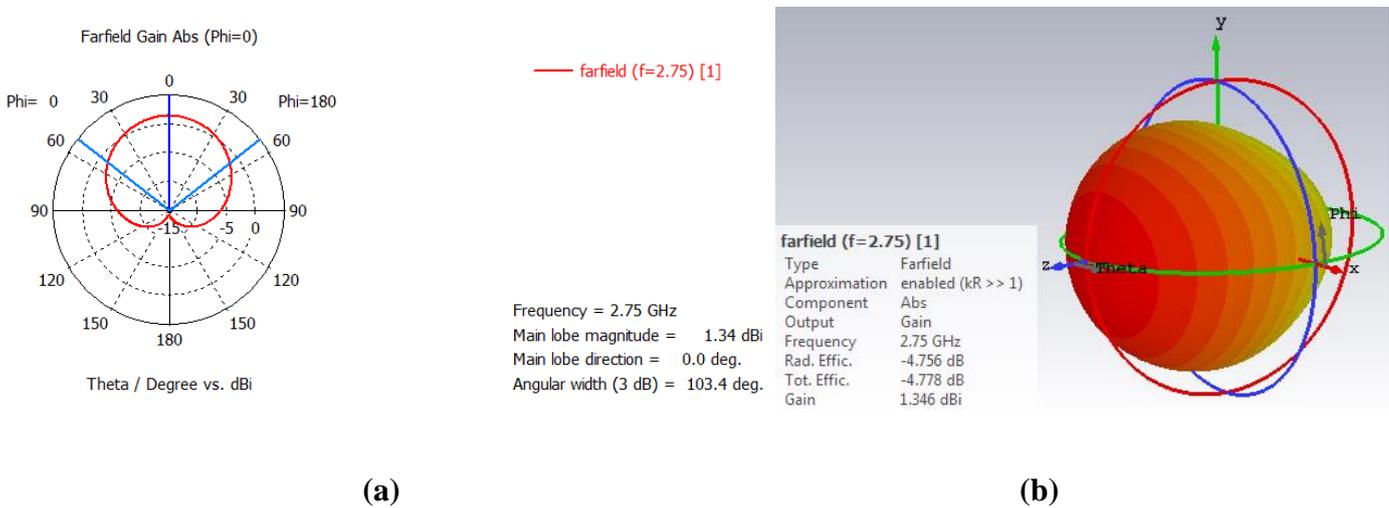


Figure III. 10: Diagramme de rayonnement en (a) : 2D ; (b) : 3D, à $f = 2.75$ GHz

Le tableau III.2 récapitule les fréquences de résonance ainsi que leurs coefficients de réflexion respectifs obtenus par simulation et correspondants aux six modes.

Tableau III.2 : Récapitulatif des fréquences de résonances et coefficients de réflexion respectifs des six modes

Modes	Fréquences de résonance (GHz) et coefficients de réflexion S11 (dB) correspondants				
	F1 / S11	F2 / S11	F3 / S11	F4 / S11	F5 / S11
M1	2.75 / -24.43	5.06 / -28.76	7.83 / -10.99	9.92 / -25.95	/
M2	2.10 / -22.05	5.11 / -23.68	6.37 / -10.56	7.83 / -10.88	/
M3	2.45 / -21.52	5.32 / -21.95	5.63 / -18.32	8.01 / -15.93	9.92 / -18.61
M4	2.47 / -21.05	5.32 / -18.17	5.69 / -20.63	7.29 / -11.06	7.93 / -10.96
M5	2.5 / -20.32	6.03 / -32.48	6.32 / -31.08	7.4 / -12.47	/
M6	2.52 / -22.73	6.39 / -41.73	6.72 / -24.78	/	/

Lorsque le mode M1 est activé, l'antenne se trouve à son état de fonctionnement initial. L'excitation des modes M2 et M5 génère des perturbations de la distribution du courant d'alimentation donnant naissance à de nouvelles fréquences de résonance et des coefficients de réflexion inférieurs à ceux du premier mode.

Les modes M3 et M4 sont caractérisés par l'obtention de cinq fréquences de résonance dont celle à $f=2.45$ GHz fonctionnant dans la bande ISM (application médicale), ainsi qu'une autre fréquence qui opère aux alentours des 5 GHz appartenant aux applications Wi-Fi. On peut dire que ces deux modes là offrent plus de choix en termes de reconfiguration en fréquence.

Le dernier mode M6 opère à la fréquence initiale $f=2.5$ GHz de l'antenne Patch conçue au départ. Ce mode est pauvre en termes de reconfiguration comparé aux autres modes M3 & M4.

En fonction des états des slots (ON ou OFF), l'antenne est capable de rediriger le flux de courant et de commuter entre les différentes fréquences de résonance obtenues. Cela indique que l'antenne conçue est bien une antenne reconfigurable en fréquence.

Après avoir utilisé la technique de modélisation par commutation, considérée comme une étape essentielle dans la reconfiguration en fréquence, la méthode de reconfiguration par les diodes PIN modélisées à la fois comme une simple résistance et capacité équivalente ainsi qu'une inductance. Ces diodes PIN vont remplacer ces languettes pour être insérées à l'intérieur des cellules qui occupent la fente.

III.3 Reconfiguration par insertion des diodes PIN

Pour étudier la reconfiguration en fréquence par la méthode des diodes sur notre antenne, nous avons procédé en trois étapes respectives en plaçant tout d'abord une seule, puis trois et enfin cinq diodes dans les slots qui se trouvent dans la fente comme le montre la figure III.11.

L'étude proposée est une étude comparative portant sur le nombre et les états des diodes PIN à insérer.

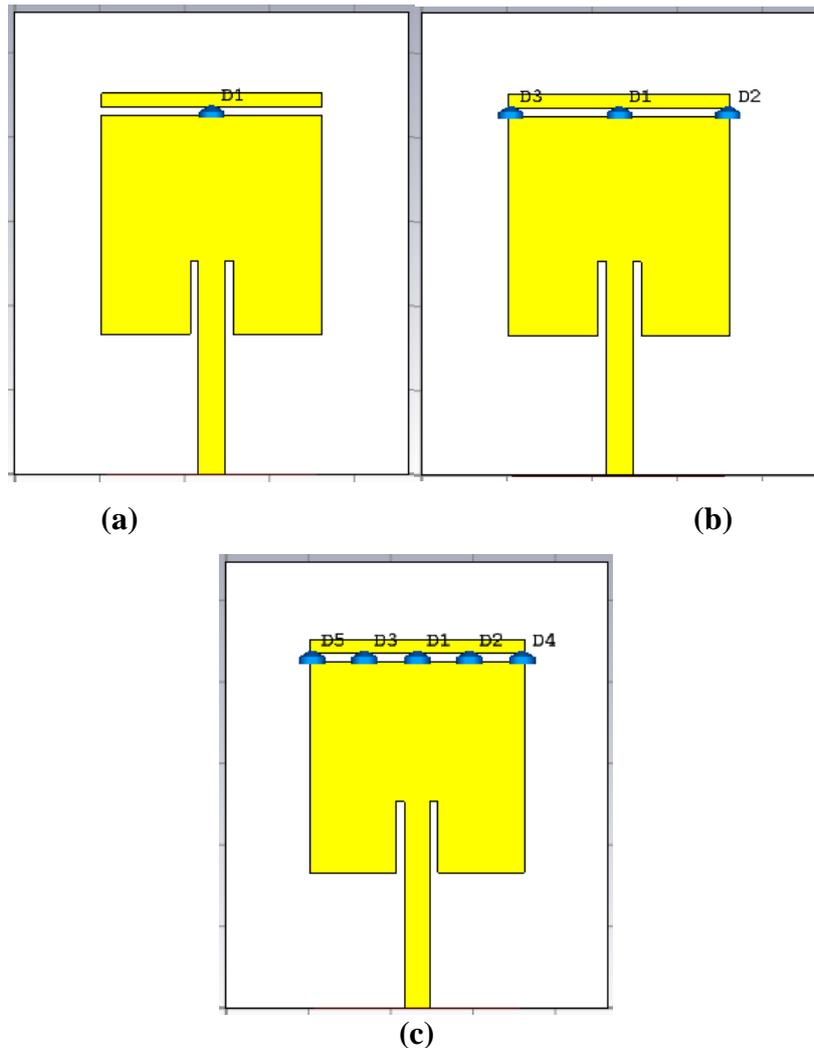


Figure III. 11: Antenne Patch simulée en utilisant les diodes PIN ; en (a) : Une diode, en (b) : Trois diodes, en (c) : Cinq diodes

Selon le nombre des diodes insérées, trois principaux modes sont obtenus et énumérés ci-dessous :

- Le premier mode M1 correspond à l'utilisation d'une seule diode en faisant la comparaison entre ses deux états (ON et OFF).
- Le second mode M2 comprend l'utilisation de trois diodes et la comparaison se fait comme suit :

- a) **Premier cas de comparaison** : Deux diodes ON et une OFF avec deux autres OFF et une ON (2-ON & 1-OFF contre 2-OFF & 1-ON).
- b) **Deuxième cas de comparaison** : Trois diodes ON avec trois autres OFF (3-ON contre 3-OFF).
- Le dernier mode M3 prend en charge l'utilisation de cinq diodes et la comparaison s'effectue comme suit :
 - a) **Première comparaison** : Une diode ON et quatre diodes OFF avec une diode OFF et quatre autres ON (1-ON & 4-OFF contre 1-OFF & 4-ON).
 - b) **Deuxième comparaison** : Deux diodes ON et les trois autres OFF avec deux diodes OFF et les trois autres diodes ON (2-ON & 3-OFF contre 2-OFF & 3-ON).
 - c) **Dernière comparaison** : Cinq diodes ON avec cinq autres OFF (5-ON contre 5-OFF).

III.3.1 Résultats de la simulation

a) Premier mode M1 :

La figure III.12 montre les courbes des coefficients de réflexion S11 du mode M1 à l'état ON et OFF.

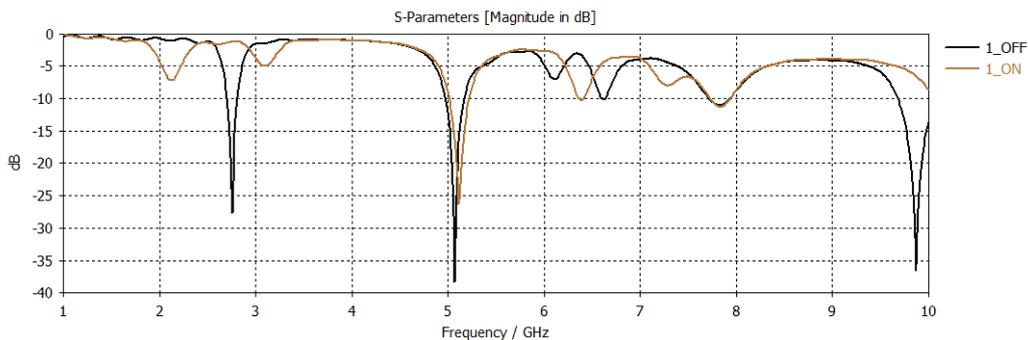
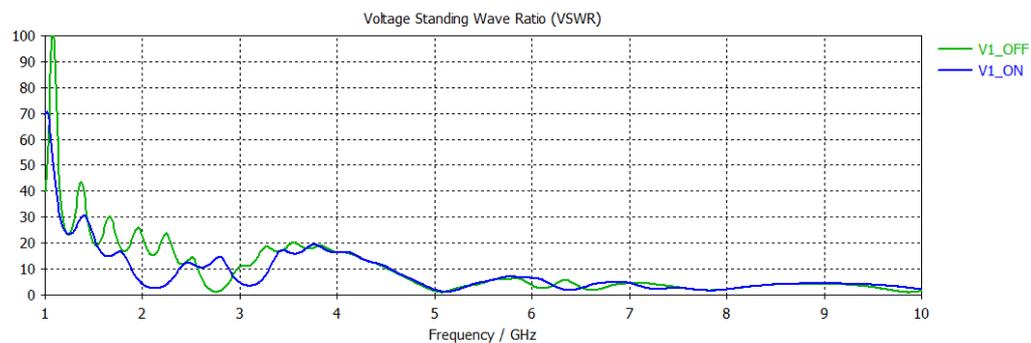


Figure III. 12: Les coefficients de réflexion du mode M1

La figure III.13 contient respectivement en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.75$ GHz du premier mode M1.



(a)

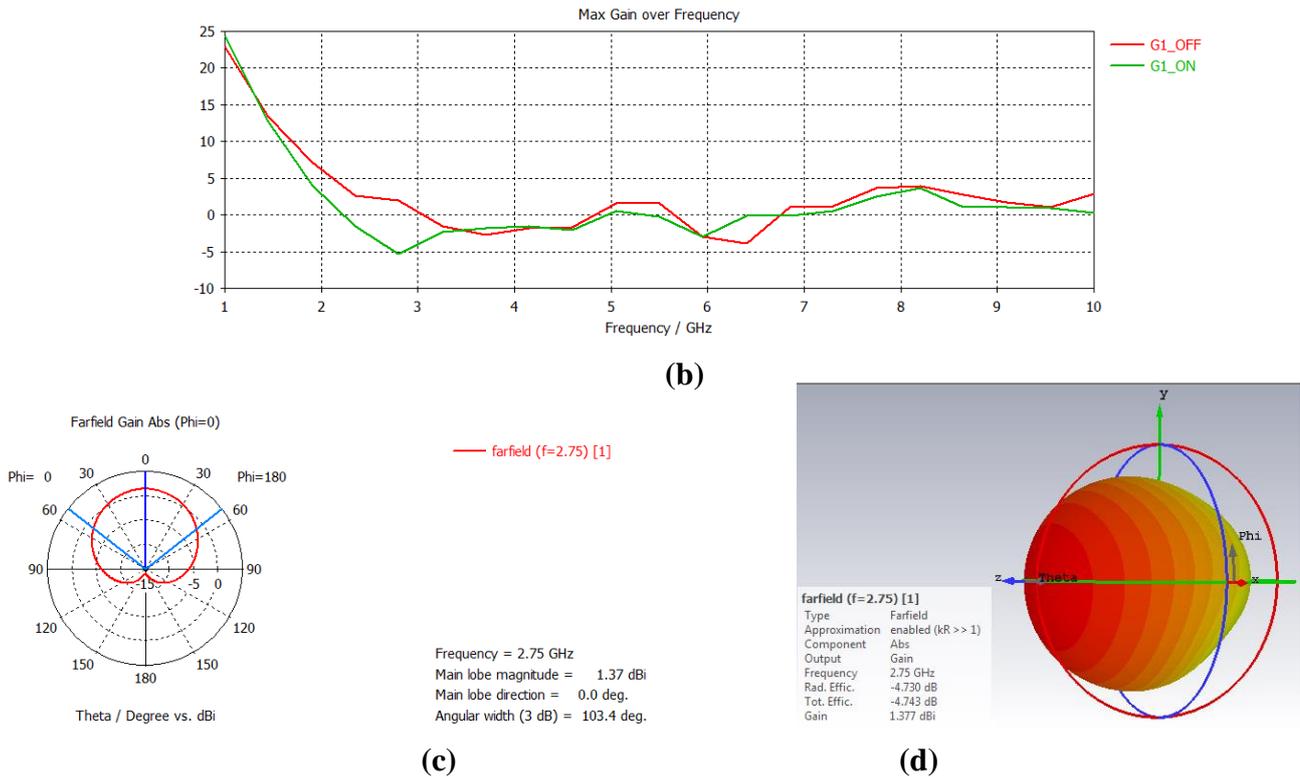


Figure III. 13: en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence ; (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.75$ GHz du premier mode M1.

À l'état OFF du mode M1, on obtient une multi-résonance à trois fréquences ($f_1 = 2.75$ GHz, $f_2 = 5.07$ GHz et $f_3 = 9.86$ GHz) avec une bonne adaptation à la fréquence $f = 5.07$ GHz correspondant à un coefficient de réflexion S11 de -37.25 dB.

La fréquence $f_1 = 2.75$ GHz opère dans le spectre des applications médicales et lui est associée respectivement le coefficient de réflexion S11 = -26.22 dB, le taux d'onde stationnaire VSWR = 1.10, un rayonnement directionnel avec une ouverture numérique de 103.4 degrés ainsi qu'un bon gain de 2.08 dBi.

Notons que les fréquences $f_1 = 2.75$ GHz et $f_2 = 5.07$ GHz fonctionnent respectivement dans les bandes fréquentielles supplémentaire de la 5G, les bandes ISM et les applications Wi-Fi [51].

Second mode M2 :

- **Première comparaison**

La figure III.14 montre les courbes des coefficients de réflexion S11 du mode M2 dans le cas de la première comparaison.

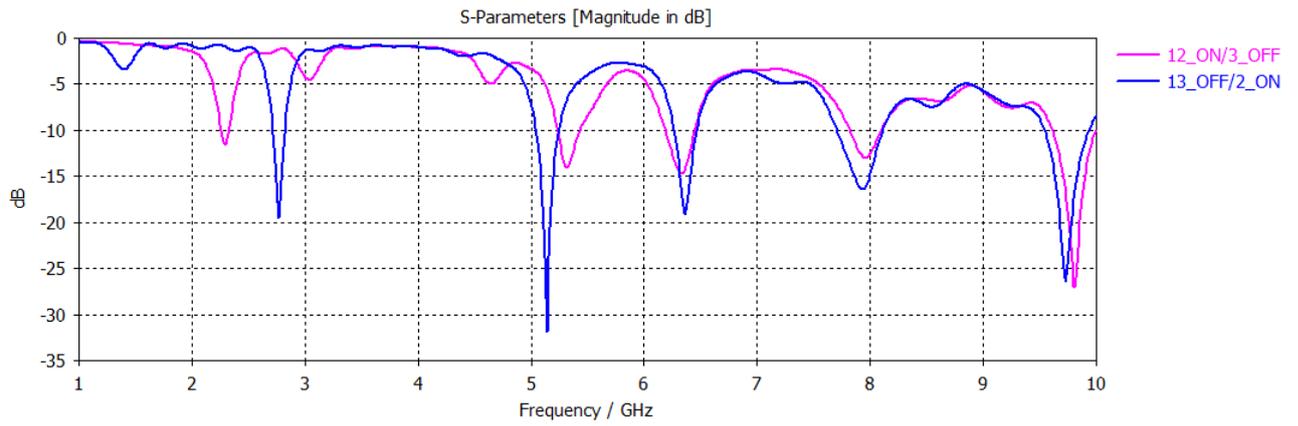
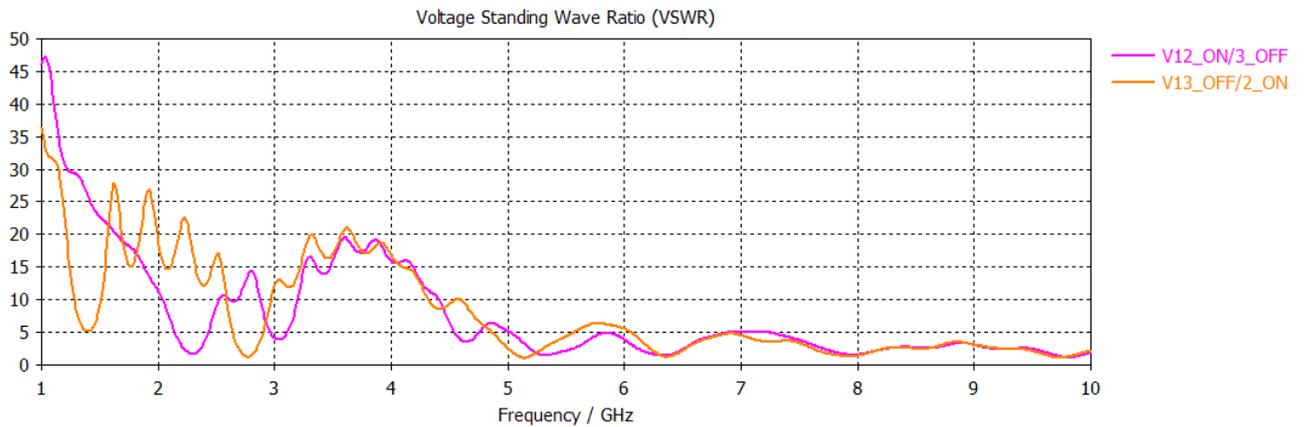
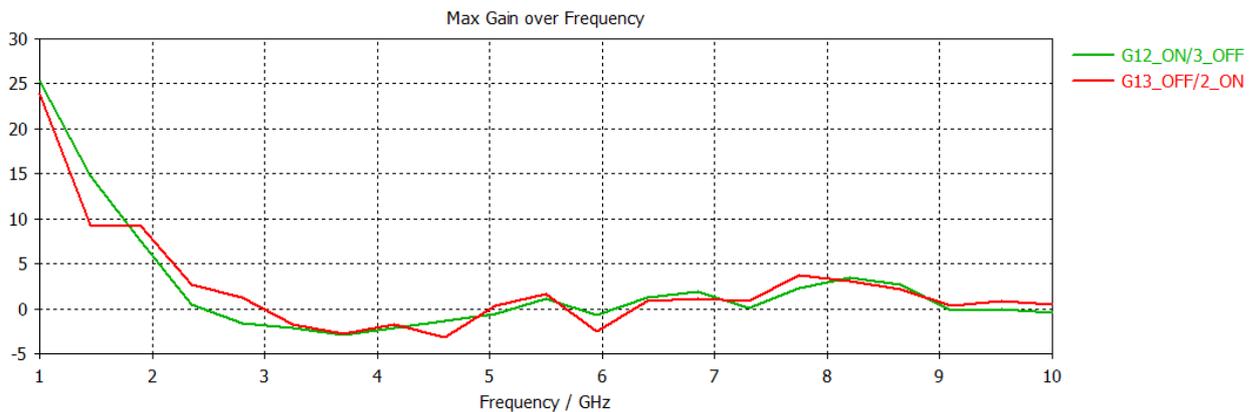


Figure III. 14: Courbes des coefficients de réflexion de la 1ère comparaison du mode M2

La figure III.15 comporte respectivement en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence à $f = 2.76$ GHz, lors de la 1^{ère} comparaison du mode M2.



(a)



(b)

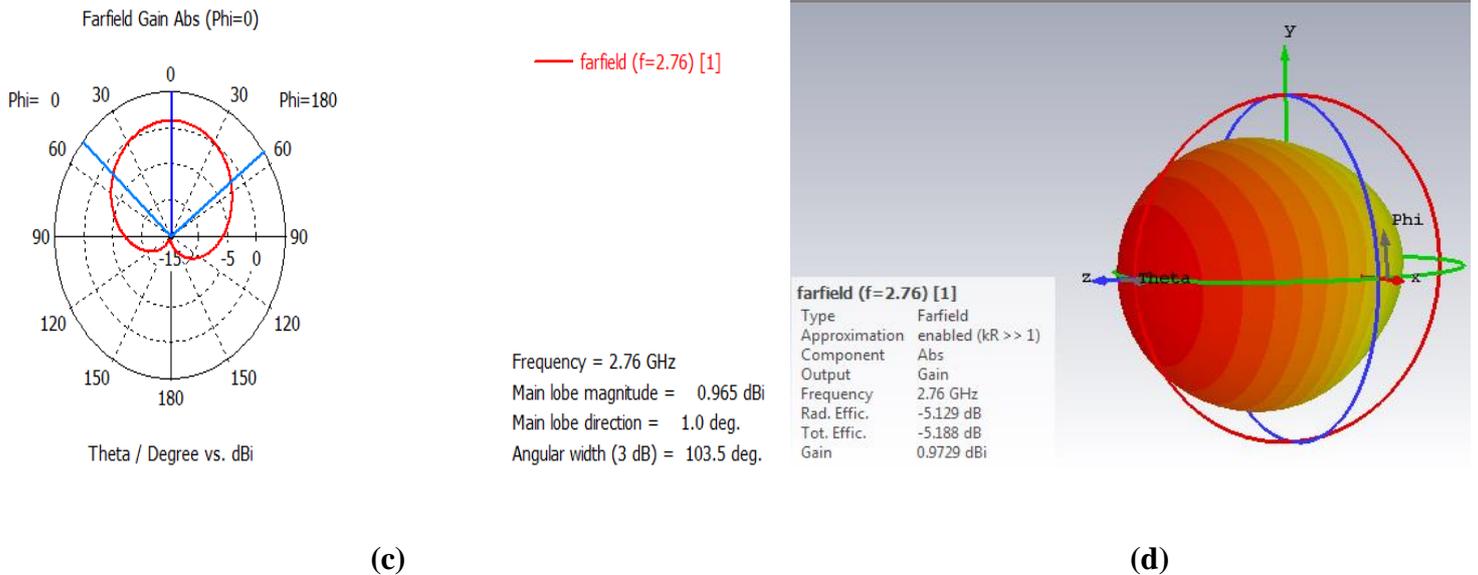


Figure III. 15: en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence ; (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.76$ GHz lors de la 1ère comparaison du mode M2.

D’après la figure III.14, nous constatons une multi-résonance à cinq fréquences opérationnelles lorsque deux diodes sont à l’état OFF et l’autre à l’état ON avec l’obtention d’une reconfiguration aux fréquences $f = 2.76 ; 5.14 ; 6.36 ; 7.93$ et 9.73 GHz qui correspondent à une bonne adaptation pour les coefficients de réflexion S11 respectifs suivants : $-18.84 ; -30.06 ; -19.06 ; -16.43$ et -26.32 dB.

Cette configuration est aussi intéressante du fait de la grande diversité de reconfiguration en fréquence offerte. Le diagramme de rayonnement est directionnel avec une ouverture numérique de 103.5 degrés et un gain de 1.43 dBi à $f = 2.76$ GHz.

Notons que la fréquence $f_1 = 2.76$ GHz fonctionne dans la bande fréquentielle des applications médicales, la fréquence $f = 5.14$ GHz opère dans le standard WLAN (5,14 – 5,825 GHz) et les fréquences $f = 6.36 ; 7.93$ et 9.73 GHz appartiennent au spectre UWB (Ultra Large Bande : 3,1-10,6 GHz) [51].

- **Seconde comparaison**

La figure III.16 montre les courbes des coefficients de réflexion S11 du mode M2 lors de la seconde comparaison.

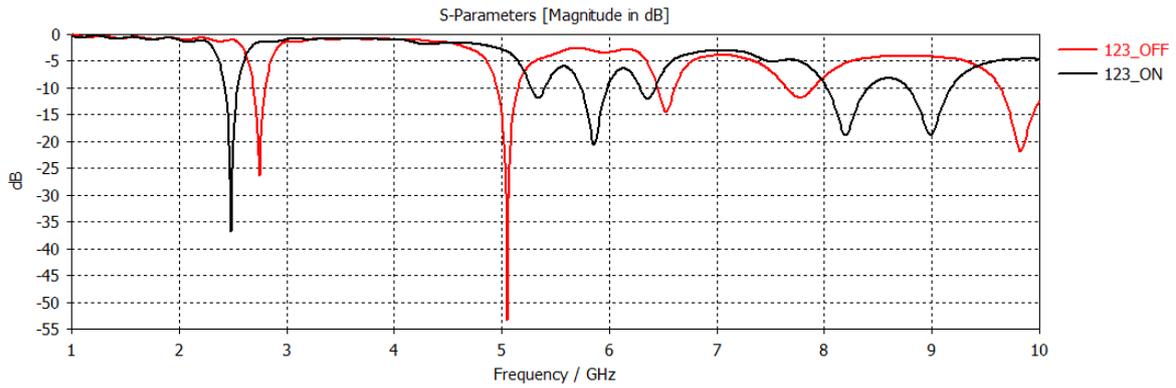
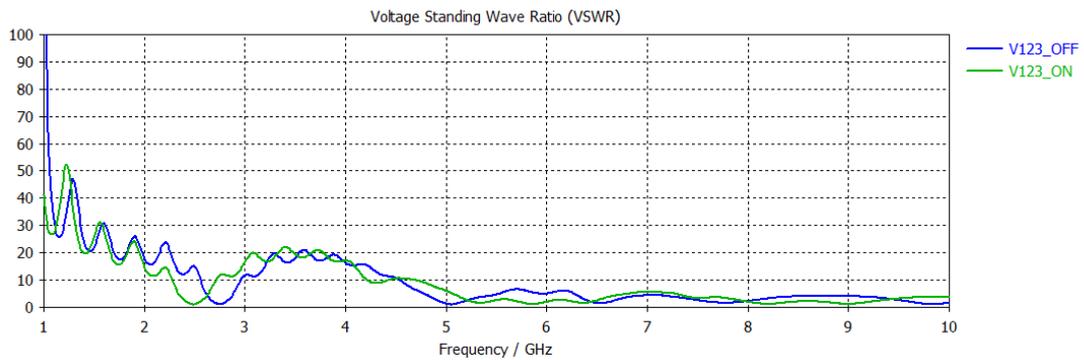
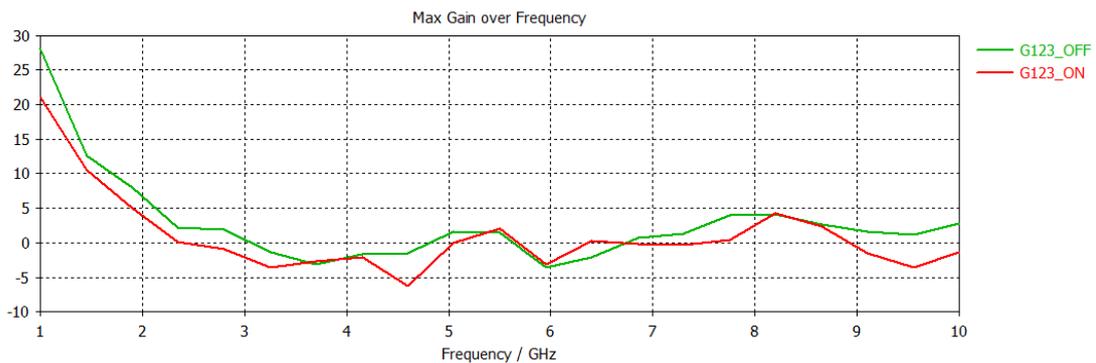


Figure III. 16: Courbes des coefficients de réflexion de la 2^{ème} comparaison du mode M2

La figure III.17 correspond à l'état OFF et ON des trois diodes et contient respectivement en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D aux fréquences $f = 2.485$ et 2.746 GHz, lors de la 2^{ème} comparaison du mode M2.



(a)



(b)

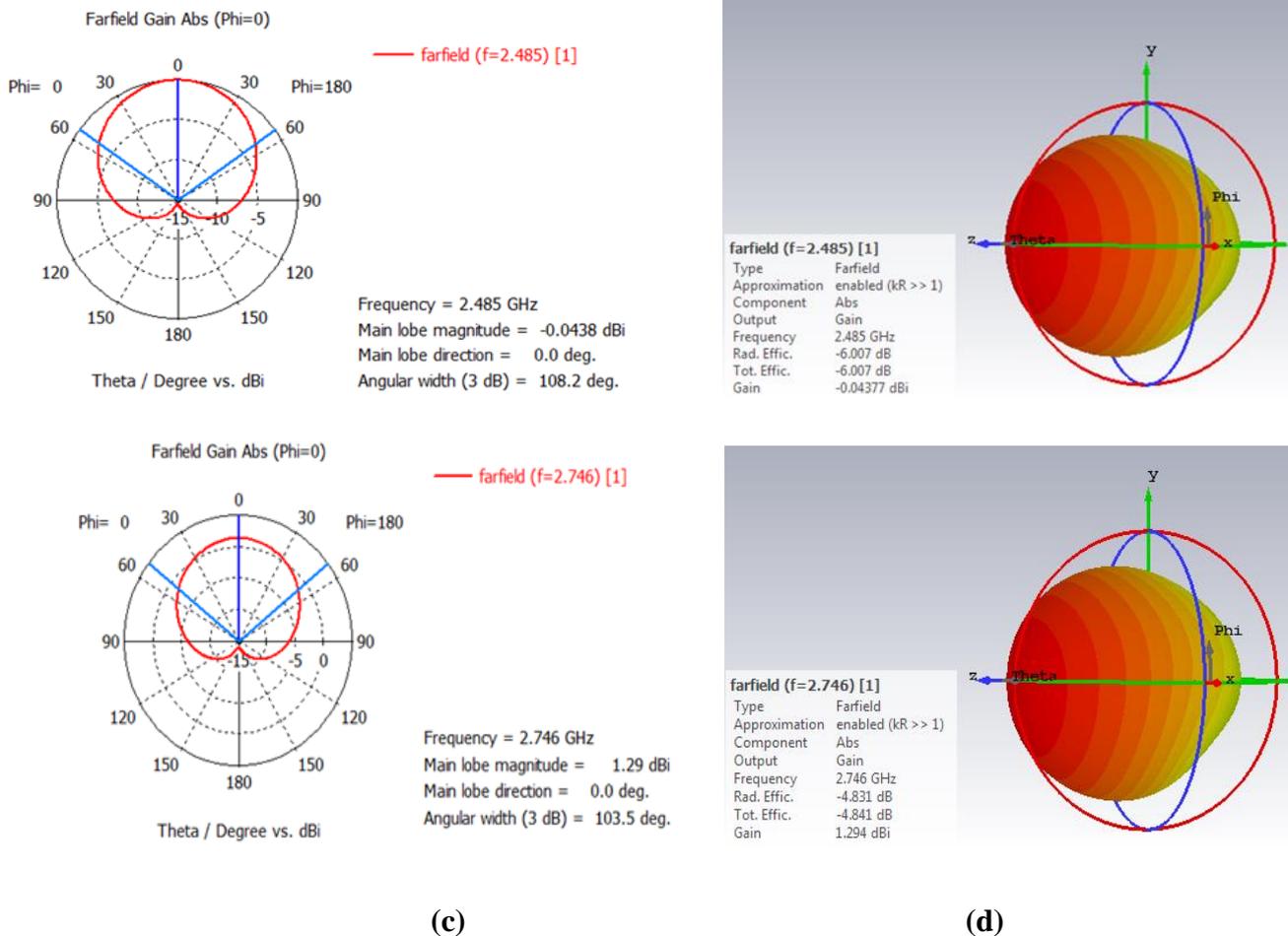


Figure III. 17: en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D aux fréquences $f = 2.485$ et 2.746 GHz, lors de la 2ème comparaison du mode M2.

Dans cette deuxième comparaison du mode M2, les deux courbes du paramètre S11 indiquent que chacun des deux états permet à l'antenne d'être reconfigurable en fréquence en offrant plusieurs choix de fréquences de résonances. Quand les diodes sont à l'état ON, l'antenne Patch opère aux alentours de la fréquence initiale $f = 2.5$ GHz avec un excellent coefficient de réflexion $S_{11} = -36.83$ dB et un gain de 0.14 dBi, tandis que lorsqu'elles sont à l'état OFF, elles modifient légèrement la fréquence de résonance générée par la fente en la décalant à presque $f = 2.75$ GHz avec un gain nettement meilleur, d'une valeur de 2 dBi.

Les deux états possèdent le même diagramme de rayonnement quasi-directionnel ainsi qu'une ouverture numérique presque similaire.

Les fréquences de résonance obtenues dans le cas de la 1^{ère} comparaison du 2^{ème} mode, que ce soit à l'état ON ($f = 2.48 ; 5.33 ; 5.86 ; 6.35 ; 8.2$ et 8.99 GHz) ou à l'état OFF ($f = 2.746 ; 5.05 ; 6.52 ; 7.76$ et 9.82 GHz) fonctionnent presque dans les mêmes bandes de fréquence à savoir les bandes ISM qui sont libres de droits et ne requièrent par conséquent aucune licence, les applications WBAN (2.45 GHz), les applications WLAN (5,15 – 5,825 GHz) et l'UWB (3,1-10,6 GHz) [51].

b) Troisième mode M3 :

• 1^{ère} comparaison

La figure III.18 correspond aux courbes des coefficients de réflexion S11, du mode M3 pour la première comparaison.

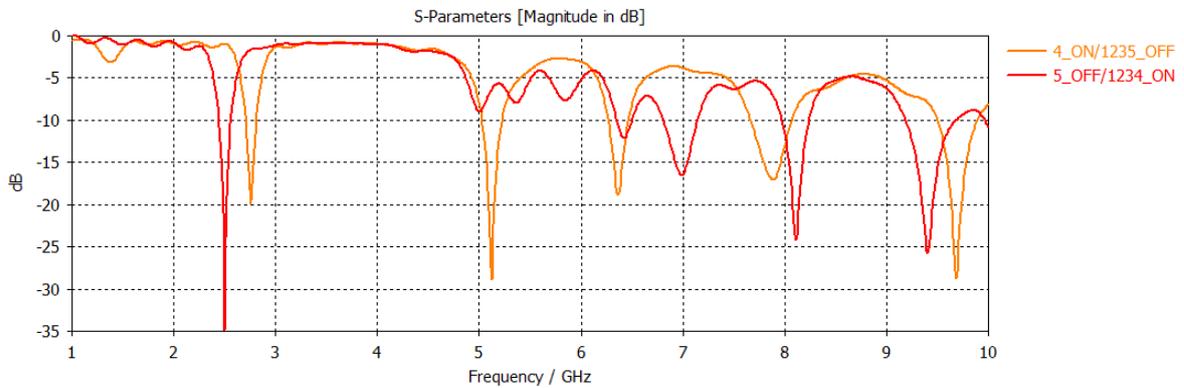
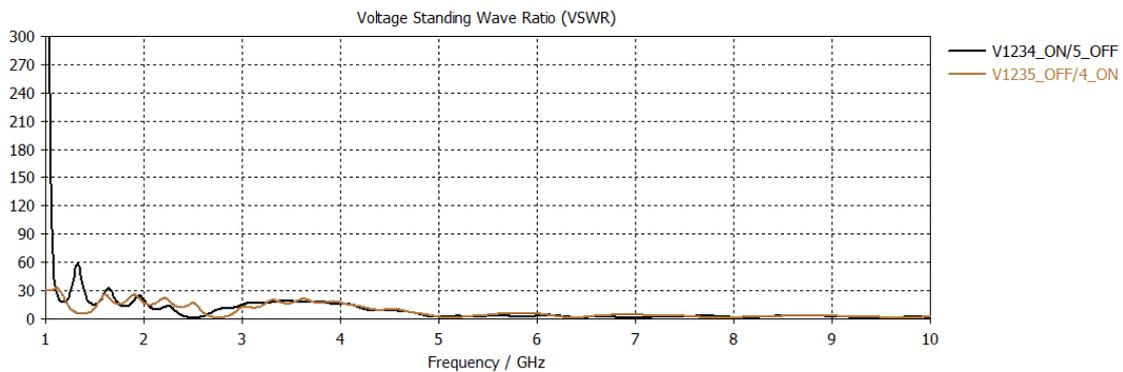
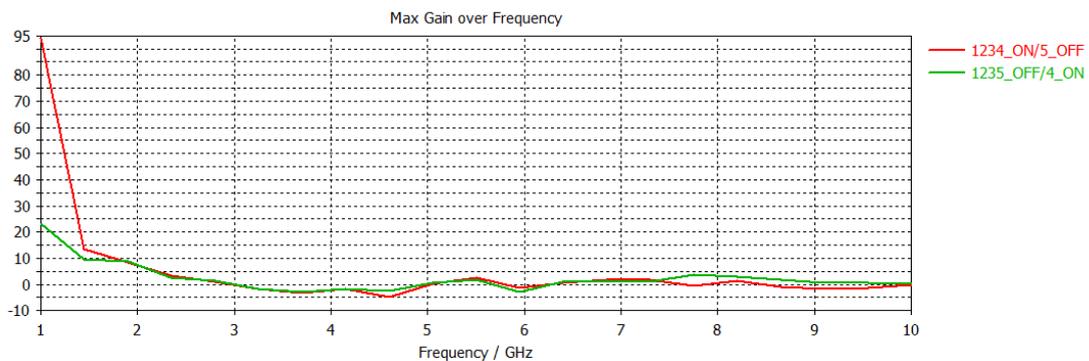


Figure III. 18: Courbes des coefficients de réflexion S11 de la 1^{ère} comparaison du mode M3.

La figure III.19 correspond à l'état 4-OFF & 1-ON et contient respectivement en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.75$ GHz, lors de la 1^{ère} comparaison du mode M3.



(a)



(b)

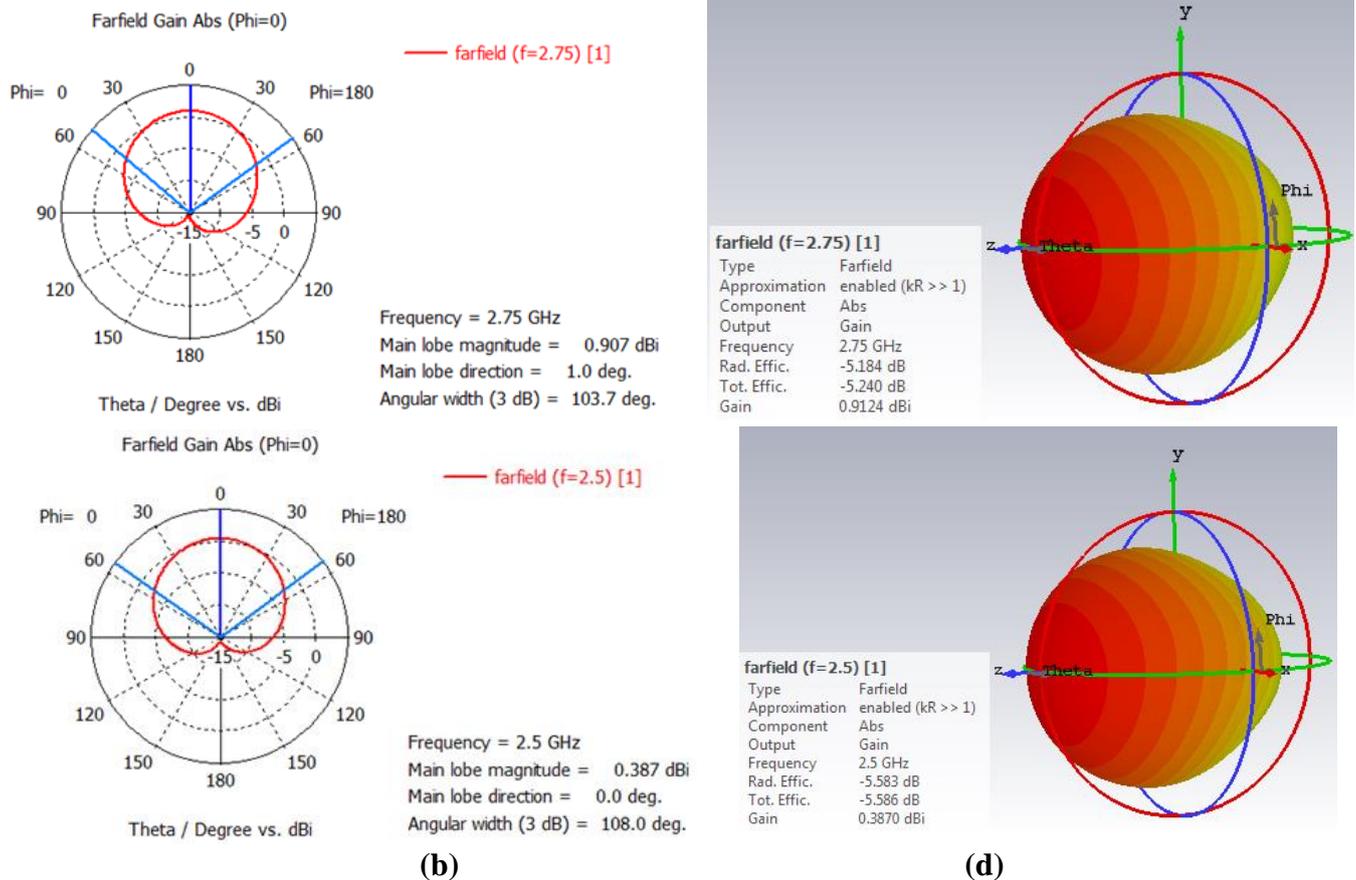


Figure III. 19 : (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.5$ et 2.75 GHz lors de la 1ère comparaison du mode M3.

Dans cette première comparaison du mode M3, on constate que presque les mêmes fréquences de résonances sont présentes dans les deux situations avec un très léger décalage pour la fréquence à 2,5 GHz, translattée en 2.75 GHz. Les paramètres S11 obtenus, correspondants à ces fréquences sont très bons, offrant ainsi une bonne reconfiguration fréquentielle. Ces fréquences de résonance permettent à l'antenne de fonctionner respectivement dans les applications ISM, le WBAN, le WLAN et l'UWB [51].

L'antenne dispose d'un diagramme de rayonnement directionnel avec une ouverture numérique de cinq degrés de différence entre les deux situations comparées, mais avec un gain de 2.48 dBi, qui est plus important lorsque les diodes sont à l'état 4-ON & 1-OFF.

- **2ème comparaison**

La figure III.20 montre les courbes des coefficients de réflexion S11 du mode M3 pour la 2ème comparaison.

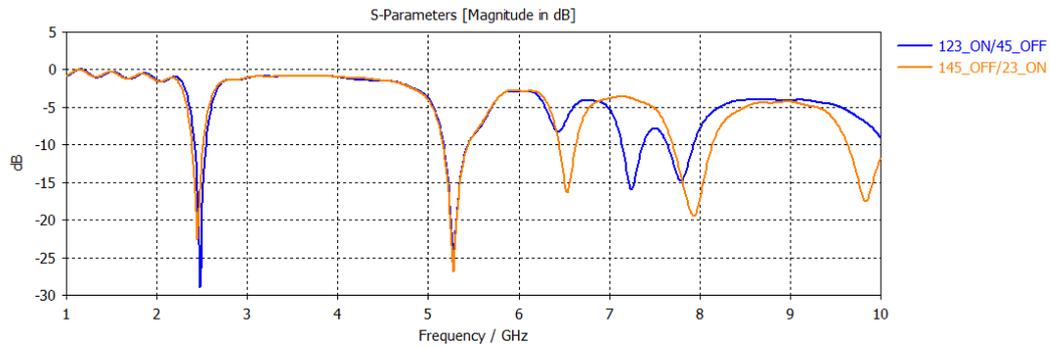
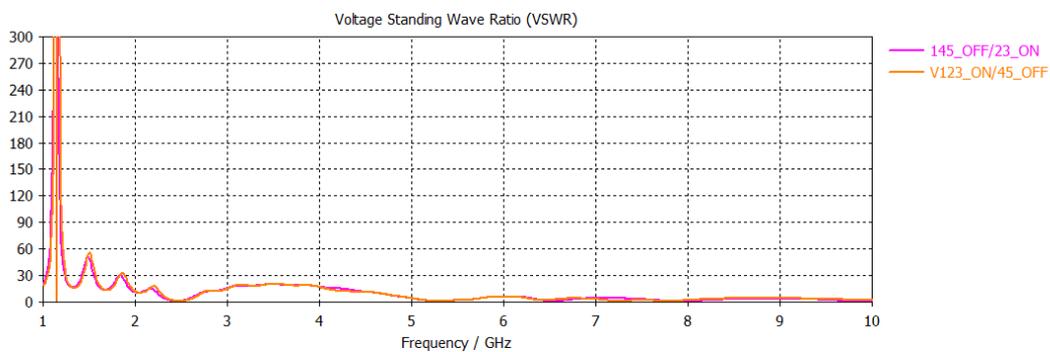
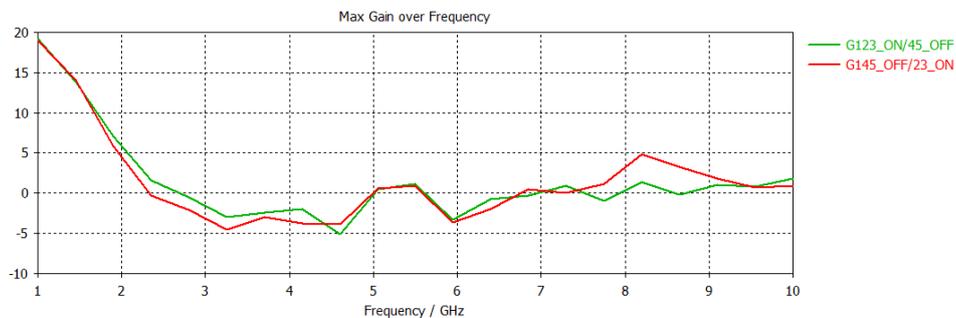


Figure III. 20: Courbes des coefficients de réflexion S_{11} de la 2ème comparaison du mode M3

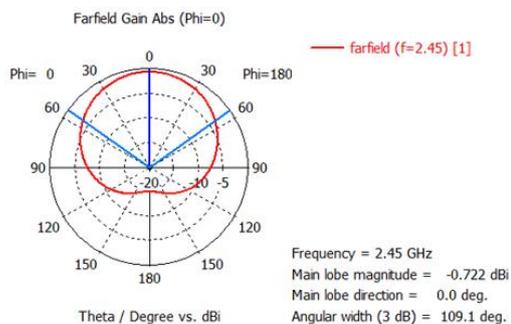
La figure III.21 contient respectivement en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.45$ GHz lors de la 2ème comparaison du mode M3.



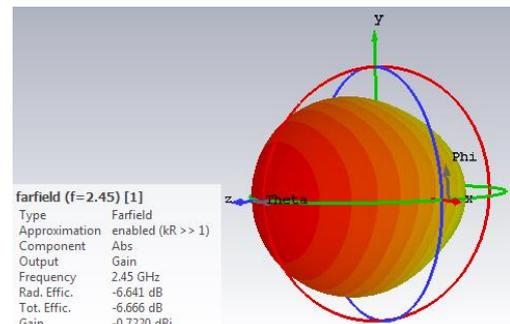
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 21: (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.45$ GHz lors de la 2ème comparaison du mode M3.

La deuxième comparaison du mode M3 montre que les deux états permettent à l'antenne de résonner pratiquement aux mêmes fréquences avec une meilleure reconfiguration fréquentielle lorsqu'on utilise trois diodes à l'état OFF et les deux autres à l'état ON. En effet l'antenne dispose de cinq fréquences de résonance ($f = 2.44 ; 5.27 ; 6.53 ; 7.93$ et 9.82 GHz) fonctionnant respectivement dans les applications ISM, le WBAN, le WLAN et l'UWB [51].

L'antenne possède un diagramme de rayonnement directionnel avec un angle d'ouverture de 109 degrés et un gain de 0.66 dBi.

• 3^{ème} comparaison

La figure III.22 montre les courbes des coefficients de réflexion S11 du mode M3 pour la 3^{ème} comparaison.

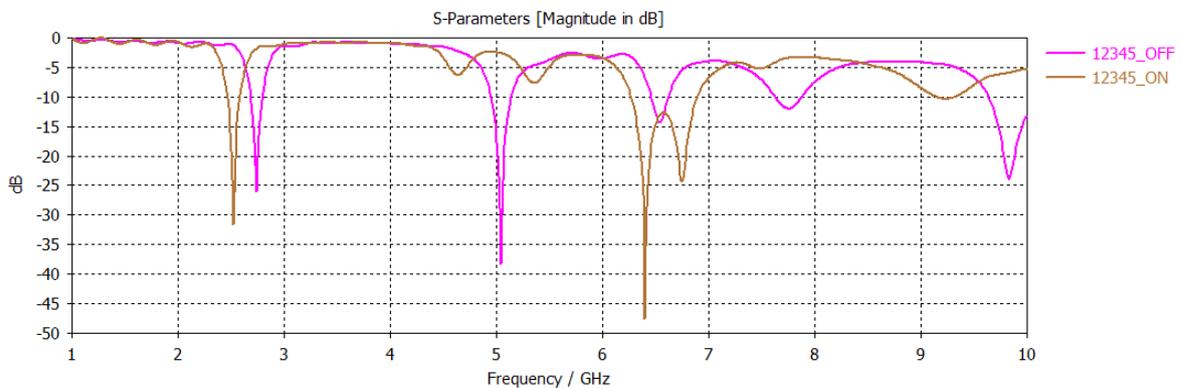
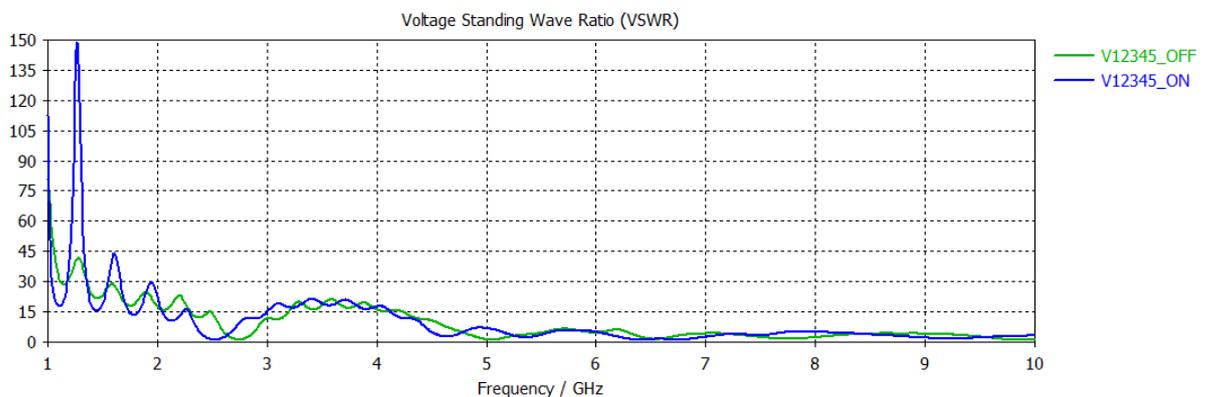
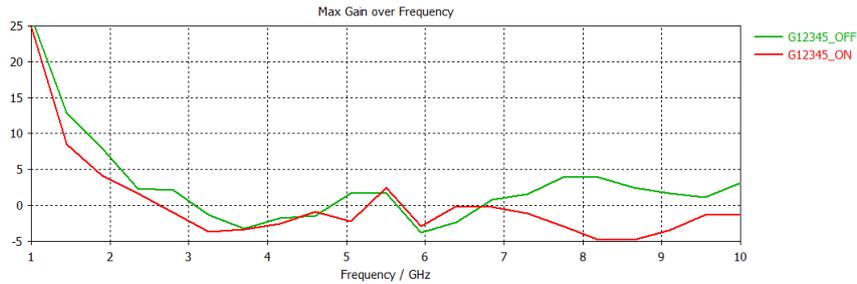


Figure III. 22: Courbes des coefficients de réflexion S11 de la 3^{ème} comparaison du mode M3.

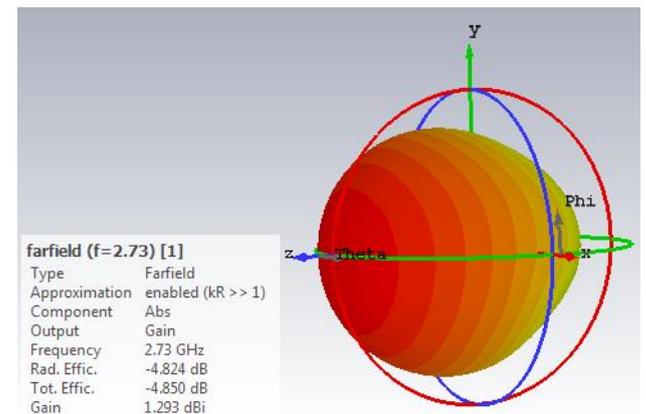
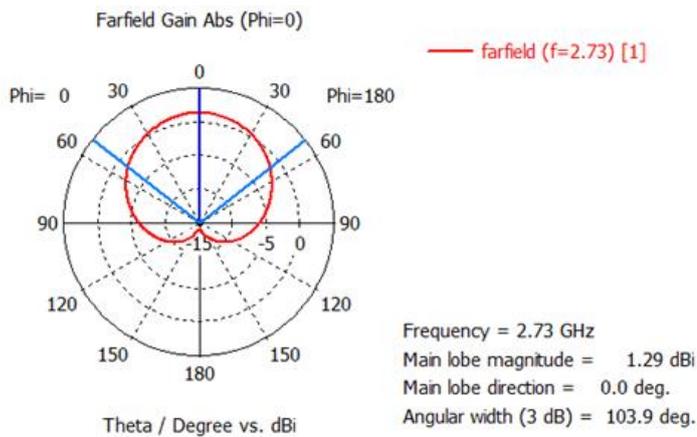
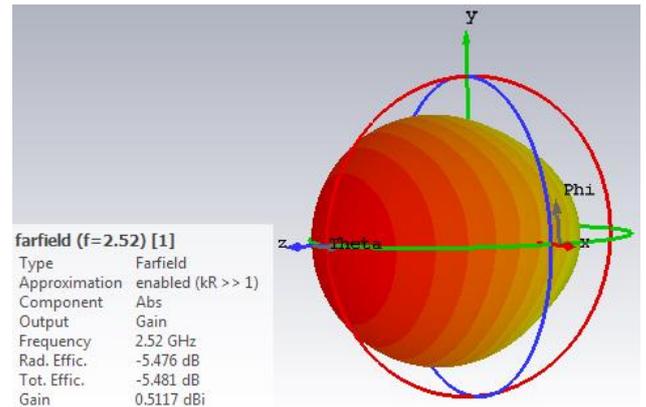
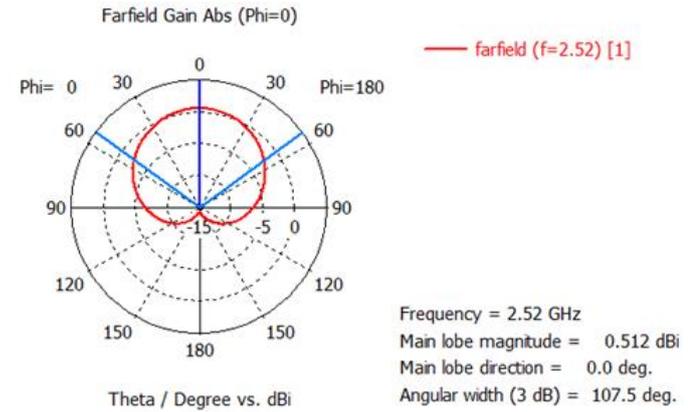
La figure III. 23 contient respectivement en (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence, (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.52$ et 2.73 GHz, lors de la 3^{ème} comparaison du mode M3.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figure III. 23: (a) : le VSWR ; (b) : le gain en fonction de la fréquence ; (c) : le diagramme de rayonnement en 2D ; (d) : le diagramme de rayonnement en 3D à $f = 2.52$ et 2.73 GHz, lors de la 3ème comparaison du mode M3.

Pour cette dernière comparaison du mode M3, on obtient davantage de fréquences résonnantes lorsque les cinq diodes sont éteintes avec cinq fréquences : $f = 2.73$ GHz (bandes ISM), $f = 5.04$ GHz (application Wi-Fi), $f = 6.53$; $f = 7.75$ et $f = 9.82$ GHz (bandes ultra larges) [51]. Ceci peut s'expliquer par le fait que la présence des composants électriques (R.L.C) des cinq diodes allumées, peut interférer sur l'antenne.

III.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a décrit une technique de modélisation et une méthode de reconfiguration en fréquence, à savoir la modélisation par commutation et la reconfiguration par diodes PIN. Nous avons mis l'accent sur l'influence d'une ou plusieurs diodes PIN dans la structure rayonnante de l'antenne. Nous avons pu constater que lors de l'utilisation de cinq diodes à la fois à des états différents (3-ON/2-OFF et 3-OFF/2-ON), offrait de très bons résultats de reconfiguration en fréquence, car la technique de modélisation par commutation a permis de confirmer cela, en montrant que les modes M3 et M4 offraient les meilleurs résultats.

Notons que l'utilisation de trois diodes (2-OFF/1-ON) a donné les meilleurs résultats.

On peut dire que l'état des diodes utilisées et leur nombre peut avoir une certaine influence sur la répartition du courant d'alimentation et donc sur la résonance de l'antenne. La technique de modélisation de l'antenne par commutation permet aussi de prédire l'emplacement et le nombre de diodes à utiliser pour avoir une bonne adaptation, une multi-résonance et une reconfiguration de l'antenne conçue pour des applications médicales dans les réseaux radio cognitive comme le WBAN à 2,45 GHz.

Conclusion Générale

Parmi tous les types d'antennes qui existent, les antennes imprimées sont particulièrement intéressantes et adaptées par rapport au potentiel de reconfiguration. Leurs aspects permettent de mieux modéliser et optimiser ces antennes pour une éventuelle reconfiguration en fréquence.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la conception d'antennes reconfigurables en fréquence dans les réseaux radio cognitifs destinés aux applications médicales. Afin de respecter le cahier des charges fourni pour la conception de l'antenne et les objectifs de la multi-résonance des systèmes radio cognitifs basés sur la SDR, l'utilisation de la méthode de reconfiguration à distance comme les circuits RLC dans les diodes PIN permet de s'adapter à n'importe qu'elle bande de fréquence à tout instant et en temps réel et d'obtenir l'aspect de la reconfiguration à distance pour des applications médicales dans les réseaux WBAN, destinées aux patients cardiaques, par exemple, qui doivent être diagnostiqués à tout moment.

Le premier chapitre portait sur les notions de radio logicielle, radio cognitive, la relation entre eux ainsi que les différents domaines d'application de la radio cognitive.

Le second chapitre abordait essentiellement le thème des antennes et ses différents types et caractéristiques. Ensuite, on s'est attelé sur les antennes reconfigurables intelligentes, agiles et indispensables au développement des réseaux radio cognitives.

Enfin, dans le dernier chapitre, on a simulé avec l'outil de simulation CST Studio Suite 2019, pour la conception d'une antenne ayant un comportement radio cognitif, c'est-à-dire qu'elle se reconfigure à différentes fréquences de fonctionnement de la bande ISM et WBAN à l'ultra-large-bande.

En effet, pour obtenir plusieurs bandes de fréquence, différentes solutions sont possibles comme faire varier la forme de l'élément rayonnant, ajouter des fentes ou des éléments parasites pour créer une fréquence résonante supplémentaire.

Afin d'atteindre la reconfiguration en fréquence, nous avons d'abord ajouté des composants actifs modélisés par de simples morceaux métalliques comme technique de modélisation, ensuite nous avons utilisé des diodes PIN insérées dans des slots unitaires comme méthode de reconfiguration en fréquence. L'antenne reconfigurable peut ainsi commuter entre plusieurs bandes de fréquences à partir des états des diodes PIN (ON / OFF).

D'autres perspectives sont à étudier dans le futur comme par exemple, la modélisation d'une structure rayonnante qui possède plusieurs types de reconfiguration à la fois, comme celle du rayonnement ou de la polarisation et qui s'applique aux réseaux de radio cognitive comme les WBAN.

Bibliographie

- [1] **MOY, C.** « *Evolution de la conception radio: de la radio logicielle à la radio intelligente* ». 2008. Thèse de doctorat. Université Rennes 1.
- [2] **J. Mitola, and G. Maguire,** « *Cognitive radio: Making software radios more personal* ». August 1999. IEEE Personal Communications, pp. 13-18.
- [3] **BENMAMMAR, Badr.** « *Présentation de la radio cognitive* ». 2012. Manuscrit de recherche. Laboratoire des Télécommunications de Tlemcen.
- [4] **SEMLALI, H.** « *Développement de nouvelles structures et d'algorithmes appliquant l'échantillonnage aléatoire pour des systèmes de types radio logicielle et radio cognitive* ». 2015. Thèse de doctorat. Université De Nantes.
- [5] **AMRAOUI, A. et BAGHLI, W.** « *Synthèse de profils applicatifs dans le cadre des réseaux radio cognitive* ». 2011. Mémoire de fin d'études. Université de Tlemcen.
- [6] **KHELLAFI, M. et ABDELGUERFI, M.** « *Sécurisation des données d'un réseau radio cognitif pour des utilisateurs secondaires à multicritères* ». 2021. Mémoire de fin d'études. Université de Tlemcen.
- [7] <https://www.itwissen.info/en/IEEE-802-DOT-11af.html#gsc.tab=0> (consulté le 25/05/2022).
- [8] **KDROUCI, K.** « *Négociation de l'accès au spectre dans les réseaux de radio cognitive* ». 2013. Mémoire de fin d'études. Université de Tlemcen.
- [9] **NGUYEN, Trong Duc.** « *Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive* ». 2012. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- [10] **KDROUCI, A.** « *Conception d'une antenne patch inspirée des méta-matériaux pour les applications RFID* ». 2021. Mémoire de fin d'études. Université de Tlemcen.
- [11] **CHAIMA, A.** « *Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN* ». 2018. Mémoire de fin d'études. Université de M'sila.
- [12] **BALANIS, Constantine A.** « *Antenna theory: analysis and design* ». 2015. Citation (John Wiley & Son's, INC). Université de l'état de l'Arizona.
- [13] **AMEZIANE, D.** « *Etude et optimisation d'antennes fractales plaquées* ». 2009. Magister en Télécommunications. Université de Tlemcen.

- [14] **BOUDGHENE STAMBOULI, H.** et **BOUNEBBAB, S.** « *Étude et Conception d'Antennes à Résonateurs Diélectriques* ». 2017. Mémoire de fin d'étude. Université de Tlemcen.
- [15] <https://blog.f6krk.org/janvier-2012-polarisation-des-ondes-et-des-antennes-1/> (consulté le 04/06/2022).
- [16] **AZZAZ RAHMANI, S.** « *Analyse des antennes imprimées en anneaux concentriques : Etude et simulation des antennes imprimées fonctionnant en multi bandes* ». 2012. Mémoire de fin d'étude. Université Tlemcen.
- [17] **MERITET, A.** « *Optimisation des antennes Filaires* ». 1980. Institut National de recherche en Informatique et en Automatique. Domaine de Voluveau Rocquencourt Bp.105, 78150 Le Chesnay. France.
- [18] **BENOMAR, A.** « *Etude des antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunication* ». 2013. Thèse de Doctorat. Université européenne de Bretagne.
- [19] **BABOUR, L.** « *Etude et conception d'antennes ultra large bande miniaturisées en impulsionnel* ». 2009. Thèse de doctorat. Institut Polytechnique de Grenoble.
- [20] **NEVERLY, J.** « *Design of Vivaldi antenna* ». 2007. Thèse de doctorat. Université de Prague. République Tchèque.
- [21] **MURAT, J.R.** « *Eléments de construction* ». 1980. Livre. Edition de l'E.P.M.
- [22] **CHOUICHA, M.** et **HAISSOUNE, L.** « *Etude de l'influence des différents matériaux sur les performances d'une antenne multicouche fort gain* ». 2019. Mémoire de fin d'étude. Université de Guelma.
- [23] **MARTIN, B.** « *Etude et conception d'un étage de mise en forme d'impulsions ultralarge bande de forte puissance* ». 2008. Thèse de doctorat. Université de Limoges.
- [24] **AGRAWALL, N.** et **KUMAR, G.** « *New wideband monopole antennas* ». 1997. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Vol.1, pp. 248-251.
- [25] **FARTINO, N.** « *Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour les systèmes ULB impulsionnels* ». 2006. Thèse de doctorat. Université de Sophia Antipolis-Nice.
- [26] **CARVER, K.** et **MINK, J.** « *Microstrip Antenna Technology* ». 1981. IEEE Trans. Antennas Propagation. Vol. AP-29, No. 1, pp. 2–24.
- [27] **ABLA, B.** « *Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire* ». 2010. Mémoire de Magistère en Micro-ondes. Université de Constantine.
- [28] **PICON, O.** et **COLL,** « *Les antennes, théorie, conception et application* ». 2009. Préface de Maurice Bellanger. Paris.
- [29] **AISSAOUI, D.** « *Analyse à l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées par ligne adaptées* ». 2007. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.

- [30] **HAMMERSTAD, E.** « *Equations for microstrip circuit design* ». 1975. Proceeding of the fifth European microwave conference, pp. 268-272.
- [31] **COURREGES, S.** « *Les matériaux ferroélectriques et supraconducteurs appliqués à la conception de dispositifs micro-ondes* ». 2007. Thèse de doctorat, Université de Limoges.
- [32] **BOUFRIOUA, A.** « *Contribution à l'étude des antennes à patch résistif et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant* ». 2006. Thèse de doctorat. Université de Constantine.
- [33] **GUENNACH, M.** « *Conception d'une antenne "PIFA" Multi bandes pour applications sans fil* ». Université de Fès.
- [34] **AISSAOUI, D.** « *Etude et conception d'antennes fractales pour des applications ultra-large-bande* ». 2019. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen.
- [35] **BENAMRANE, F.** « *Conception d'une antenne patch microstrip* ». 2011. Master en télécommunications hyperfréquence. Université de Fès. MAROC.
- [36] **NOUIRI, M.** et **TERKI, Z.** « *Conception d'une antenne microruban reconfigurable à base de diode PIN et des Structures EBG* ». 2019. Mémoire de fin d'étude. Université de M'sila.
- [37] **WIN, M.** et **SCHOLTZ, R.** « *Impulse radio: how it works* ». 1998. IEEE Communications Letters. Vol. 2, issue 3, pp. 36-38.
- [38] **HUILIN, X.** et **LIUQING, Y.** « *Ultra-wideband technology: Yesterday, today, and tomorrow* ». 2008. IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 715-718.
- [39] **FCC,** « *Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems* ». Adopted in Feb. 2002 and released in April 2002. First report and order, ET Docket 98-153, FCC 02-48.
- [40] **ZEMAM, Y.** et **FOUKIA, A.** « *Étude et conception d'antennes reconfigurables par Association d'éléments actifs* ». 2017. Mémoire de fin d'étude. Université de Tlemcen.
- [41] **NACHOUANE, H.** « *Contribution à la conception et à la réalisation d'antennes reconfigurables large bande à diversité pour les systèmes de communication radio cognitive de la quatrième génération* ». 2017. Thèse de doctorat. Institut National des Postes et Télécommunications.
- [42] **FERRERO, F.** « *Reconfiguration dynamique d'antennes imprimées en directivité et polarisation* ». 2007. Thèse de doctorat. Université de Nice.
- [43] **YUAN, X., DAMGACI, Y., MOPIDEVI, H.** et **al.** « *RF-N/MEMS integrated reconfigurable antenna for public safety applications* ». In 2009. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 2009. p. 1-4.
- [44] **JAFFRE, T.** « *Caractérisation Des matériaux à bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes* ». 2005. Thèse de doctorat. Université de Limoges.

- [45] **YANG, F.** et **RAHMAT-SAMII, Y.** « *Patch antenna with switchable slots (PASS) : reconfigurable design for wireless communications* ». 2002. In : IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313). IEEE, p. 462-465.
- [46] **YANG, F.** et **RAHMAT-SAMII, Y.** « *Patch antenna with switchable slots (PASS): Dual-frequency operation. Microwave and Optical Technology Letters* ». 2001. Vol. 31, no 3, p. 165-168.
- [47] **PETIT, L.** « *Antennes reconfigurables à base de MEMS-RF* ». 2007. Micro et nanotechnologies / Microélectronique. Université de Grenoble I.
- [48] **RUTSCHLIN, M.** et **SOKOL, V.** « *Reconfigurable antenna simulation: Design of reconfigurable antennas with electromagnetic simulation* ». 2013. IEEE Microwave Magazine. Vol. 14, no 7, p. 92-101.
- [49] **CUMMINGS, N.** « *Active antenna bandwidth control using reconfigurable antenna elements* ». 2003. Ph.D. dissertation. Virginia Tech, Bradley Dept. of Electrical and Computer Eng. Blacksburg, VA.
- [50] **PANAGAMUA, C., CHAURAYA, A.** et **VARDAXOGLU, J.** « *Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches* ». 2006. IEEE Transactions Antennas Propagation. Vol. 54, no. 2, pp. 449–454.
- [51] <http://www.3gpp.org/specifications/specifications> (consulté le 15-06-2022).