

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



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Télécommunication

Spécialité : Communications et réseaux sans fil

Par : TALEB Rahma Djaouda

Sujet

**Réalisation des Antennes Reconfigurables dans les Réseaux Radio Cognitifs
destinés aux Applications Satellitaires**

Soutenue publiquement, le 11 /05 /2025 , devant le jury composé de :

M Nouredine BOUKLI-HACENE	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M Mohammed Zakarya BABA-AHMED	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M Mohammed Amin RABAH	MAB	Univ. Chlef	Co- Directeur de thèse
M Mohammed DEBBAL	MCA	Univ. Ain Témouchent	Examineur 1
Mme Yamina BELHADEF	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice 2

Année universitaire : 2024-2025.

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ALLAH, Le Tout-Puissant, pour ses innombrables bienfaits, pour la force, la patience et la persévérance qu'il m'a accordées tout au long de ce parcours de doctorat. Sans sa guidance et sa miséricorde, cette réalisation n'aurait jamais été possible.

Je souhaite exprimer mes remerciements les plus sincères et les plus chaleureux à mon directeur de thèse, Mr. Mohammed Zakarya BABA-AHMED. Votre soutien inestimable, votre disponibilité constante et votre foi en mes capacités ont été une véritable source de motivation tout au long de ces années. Vous avez su me guider avec une sagesse et une bienveillance exemplaires, faisant preuve d'une rigueur scientifique alliée à une grande humanité. Votre encadrement ne s'est pas limité à la recherche, mais a également nourri mon développement personnel et professionnel. Pour cela, je vous en suis profondément reconnaissante.

À mon co-directeur de thèse, Mr. Mohammed Amin RABAH, je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance. Votre expertise, vos remarques précieuses et vos encouragements constants ont été essentiels à l'aboutissement de cette thèse. Vous avez toujours été un pilier sur lequel je pouvais compter, offrant des solutions éclairées aux moments les plus critiques et partageant avec générosité votre savoir. Votre soutien indéfectible, tant sur le plan technique que moral, a joué un rôle fondamental dans la réussite de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury: Pr. Noureddine BOUKLI-HACENE le président du jury, ainsi que Dr. Mohammed DEBBAL et Dr. Yamina BELHADEF pour avoir accepté de consacrer de leur temps précieux à l'évaluation et à la discussion de ce travail. Leur expertise, leurs remarques pertinentes et leurs conseils avisés constituent une grande source d'enrichissement pour cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements au membres de Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT) pour ses accueils chaleureux et ses environnement propice à la recherche.

Dédicace

À ma chère mère,

Tu es le cœur de ma vie et la lumière qui m'a guidée dans chaque étape de ce parcours. Tes sacrifices infinis, ton amour inconditionnel et ton soutien constant ont été ma force motrice. Tu as toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles, et sans toi, rien de tout cela n'aurait été possible. Ce travail est avant tout le fruit de ton courage et de tes prières, et je te le dédie avec une gratitude infinie et tout l'amour du monde.

À mes sœurs,

Compagnons de route, qui ont cru en moi, partagé mes joies et mes épreuves, et dont la fierté me donne encore plus de courage, pour leur affection, leur complicité et leur présence réconfortante à chaque instant.

À ma grand-mère et mon grand-père,

Pour leur sagesse, leurs prières et leur amour qui m'ont accompagné et soutenu dans ce voyage.

À mes oncles et Ma tante,

Qui ont toujours été présents, me soutenant par leurs paroles bienveillances par leurs encouragements. Leur affection et leurs conseils m'ont accompagnée tous au long de ce parcours.

À mes cousins et cousines,

Pour leur présence joyeuse et leur soutien précieux.

À mes amis,

Véritables compagnons de route, pour leur amitié sincère, leurs encouragements et tous ces moments inoubliables qui ont illuminé ce parcours.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance, je vous dédie ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail et m'ont soutenue durant ces années de recherche.

Résumé

L'intégration des antennes reconfigurables aux Réseaux de Radio Cognitive (RRC) représente une réponse innovante aux besoins croissants des communications satellitaires modernes. La radio cognitive, en tant que technologie flexible, optimise l'utilisation du spectre radio en s'adaptant dynamiquement aux bandes de fréquence disponibles, tout en préservant les performances des autres utilisateurs. Les antennes reconfigurables jouent un rôle central dans cette optimisation, grâce à leur capacité à modifier leurs caractéristiques (fréquence, polarisation, diagramme de rayonnement) en temps réel. Le travail propose également une approche innovante en combinant les Systèmes Multi-Agents (SMA) avec les RRC, afin d'améliorer la gestion intelligente du spectre et de répondre aux exigences des applications satellitaires, comme la surveillance environnementale et les radars.

L'objectif de cette thèse est de concevoir, modéliser et réaliser des antennes reconfigurables capables de fonctionner sur des bandes spécifiques, telles que les bandes X et C, en s'appuyant sur des techniques avancées de reconfigurabilité. Les résultats attendus visent des avancées significatives en matière de flexibilité, d'efficacité et d'économie dans les systèmes de communication satellitaire, ouvrant la voie à des applications performantes et économes en ressources pour la gestion du spectre radio et les systèmes de surveillance par satellite.

Mots clés : Réseaux de Radio Cognitive, Gestion du Spectre, Antennes Reconfigurables, Système Multi-Agents, Applications Satellitaires.

Abstract

The integration of reconfigurable antennas into Cognitive Radio Networks (CRNs) represents an innovative response to the growing needs of modern satellite communications. Cognitive radio, as a flexible technology, optimizes radio spectrum usage by dynamically adapting to available frequency bands while maintaining the performance of other users. Reconfigurable antennas play a central role in this optimization due to their ability to modify their characteristics (frequency, polarization, radiation pattern) in real-time. This work also proposes an innovative approach by combining Multi-Agent Systems (MAS) with CRNs to enhance intelligent spectrum management and meet the requirements of satellite applications, such as environmental monitoring and radar systems.

The objective of this thesis is to design, model, and implement reconfigurable antennas capable of operating on specific bands, such as the X and C bands, using advanced reconfigurability techniques. The expected results aim for significant advancements in flexibility, efficiency, and cost-effectiveness in satellite communication systems, paving the way for high-performance and resource-efficient applications in radio spectrum management and satellite-based monitoring systems.

Keywords: Cognitive Radio Networks, Spectrum Management, Reconfigurable Antennas, Multi-Agent Systems, Satellite Applications.

المخلص

يمثل دمج الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل في شبكات الراديو المعرفي استجابة مبتكرة للاحتياجات المتزايدة للاتصالات الفضائية الحديثة. تعمل تقنية الراديو المعرفي، باعتبارها تقنية مرنة، على تحسين استخدام الطيف الراديوي من خلال التكيف الديناميكي مع النطاقات الترددية المتاحة، مع الحفاظ على أداء المستخدمين الآخرين. تلعب الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل دورًا مركزيًا في هذا التحسين، بفضل قدرتها على تعديل خصائصها (مثل التردد، الاستقطاب، مخطط الإشعاع) في الوقت الفعلي. يقترح هذا العمل أيضًا نهجًا مبتكرًا من خلال دمج الأنظمة متعددة الوكلاء مع شبكات الراديو المعرفي لتحسين إدارة الطيف الذكية وتلبية متطلبات التطبيقات الفضائية، مثل مراقبة البيئة وأنظمة الرادار.

تهدف هذه الأطروحة إلى تصميم ونمذجة وتنفيذ هوائيات قابلة لإعادة التشكيل قادرة على العمل في نطاقات محددة، مثل النطاقين X و C، باستخدام تقنيات متقدمة لإعادة التشكيل. تسعى النتائج المتوقعة إلى تحقيق تقدم كبير في المرونة والكفاءة والاقتصاد في أنظمة الاتصالات الفضائية، مما يمهد الطريق لتطبيقات عالية الأداء وموفرة للموارد لإدارة الطيف الراديوي وأنظمة المراقبة عبر الأقمار الصناعية.

الكلمات المفتاحية: شبكات الراديو الإدراكي، إدارة الطيف، الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، الأنظمة متعددة الوكلاء، التطبيقات الفضائية.

Table des matières

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé.....	iii
Abstract	iv
الملخص	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Acronymes	xvi
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Introduction à la Radio Cognitive et les Systèmes Multi-Agents.

I.1 Introduction.....	7
I.2 La radio logicielle	7
I.2.1 La radio logicielle restreinte (SDR).....	8
I.2.2 De l'idée de la radio logicielle à la radio cognitive	8
I.3 La radio cognitive	8
I.3.1 Historique.....	8
I.3.2 Définition	8
I.3.3 La relation entre la RC et la SDR	9
I.4 Principe de la radio cognitive	10
I.5 Architecture de la radio cognitive.....	11
I.6 Cycle de cognition	13
I.7 Composants de la radio cognitive.....	15
I.8 Fonctions de la radio cognitive	16
I.8.1 Détection du spectre.....	17
I.8.2 Gestion du spectre.....	17
I.8.3 Partage du spectre	18
I.8.4 Mobilité spectrale	19
I.9 Les applications de la RC	19

I.10	Utilisation des systèmes multi agents dans le contexte de la radio cognitive.....	20
I.10.1	Agent.....	21
I.10.2	Environnement.....	25
I.10.3	Interactions entre les agents.....	26
I.10.4	Organisation des systèmes multi agents.....	27
I.11	Plates-formes de développement des SMA.....	28
I.12	Conclusion.....	28

Chapitre II : Antennes (Réseaux et Reconfigurabilité).

II.1	Introduction.....	31
II.2	Définition d'une antenne.....	31
II.3	Caractéristiques d'une antenne.....	32
II.3.1	Caractéristiques électriques.....	32
II.3.2	Caractéristiques de rayonnement.....	33
II.4	Types d'antennes.....	35
II.5	Les antennes imprimés (Patch).....	37
II.5.1	Structure d'antenne imprimée.....	38
II.5.2	Méthodes d'excitation.....	39
II.5.3	Techniques d'adaptation.....	40
II.6	Réseau d'antennes.....	42
II.6.1	Définition.....	42
II.6.2	Alimentation d'un réseau d'antennes.....	42
II.7	Les antennes reconfigurables.....	44
II.7.1	Historique.....	44
II.7.2	Définition.....	44
II.7.3	Classification de reconfigurabilité.....	45
II.7.4	Mécanismes de reconfigurabilité.....	48
II.7.5	Comparaison entre les différentes techniques.....	54
II.7.6	Contribution des antennes reconfigurables à la radio cognitive.....	54
II.7.7	Intégration des antennes reconfigurables dans les systèmes satellitaires.....	55
II.8	Conclusion.....	56

Chapitre III : Optimisation des Antennes Reconfigurables : Approches Matérielles et Technologiques.

III.1	Introduction	59
III.2	Le choix de l’outil de simulation	59
III.3	La reconfigurabilité agile à l’aide de Graphène	60
III.3.1	Conception d’antenne	60
III.3.2	Nouveau design de l’antenne patch en Graphène	62
III.3.3	Etude de la variation du potentiel chimique du Graphène	67
III.3.4	Comparaison avec des travaux récents	69
III.4	La reconfigurabilité électrique à l’aide de diodes varicaps.....	69
III.4.1	Conception de l’antenne avant la reconfigurabilité	70
III.4.2	Intégrations de diodes varicaps	73
III.4.3	Réseaux d’antennes reconfigurables	76
III.5	La reconfigurabilité hybride à l’aide du Graphène et des diodes PIN	84
III.5.1	Conception de l’antenne.....	84
III.5.2	Reconfigurabilité par le Graphène	85
III.5.3	Reconfigurabilité par l’utilisation de diodes PIN.....	87
III.5.4	Reconfigurabilité en utilisant une diode PIN et du Graphène.....	88
III.6	Conclusion	89

Chapitre IV : Conception et Réalisation des Antennes Reconfigurables dans les Réseaux Radio Cognitifs Destinés aux Détection de Feux de Forêts et Radar Satellitaire.

IV.1	Introduction	92
IV.2	Conception d’antennes pour la détection de feu de forêts dans la bande C.....	92
IV.2.1	Conception de l’antenne patch rectangulaire	92
IV.2.2	Réseau d’antennes à deux éléments	94
IV.2.3	Réseau d’antennes à quatre éléments	95
IV.2.4	Reconfiguration de réseau d’antennes	97
IV.3	Programmation et application des SMA en réseau radio cognitif pour les antennes reconfigurables.....	101
IV.3.1	Application NETBEANS	101
IV.3.2	Plateforme Jade	101
IV.3.3	Temps de convergence	103

IV.3.4 Taux de réussite de meilleur offre.....	104
IV.4 Réalisation de réseau d'antennes reconfigurable en fréquence avec les diodes PIN pour les applications Radar	105
IV.4.1 Conception de structure d'antenne	105
IV.4.2 Conception d'un réseau d'antennes à quatre éléments.....	108
IV.4.3 Reconfigurabilité de réseau d'antennes à quatre éléments.....	110
IV.4.4 Résultats expérimentaux.....	114
IV.5 Conclusion.....	117
Conclusion générale.....	118
Liste des publications.....	122
Bibliographie.....	124

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: La relation entre RC et SDR.....	10
Figure I.2: Principe de la RC :(a)Politique d'allocation fixe du spectre ;(b)Technologie non-RC contre technologie RC ; (c)Une politique d'allocation opportuniste du spectre pour la technologie RC	11
Figure I.3: Les composants de l'architecture de la radio cognitive	12
Figure I.4: Les protocoles adoptés par la radio cognitive	13
Figure I.5: (a) Cycle de cognition de Mitola, (b) Cycle de cognition simplifié	14
Figure I.6: Composants de la radio cognitive	15
Figure I.7: Les différentes tâches d'un système de radio cognitive	17
Figure I.8: Les différentes approches de la RC: (a) Underlay; (b) Overlay.....	18
Figure I.9: Les applications de la RC	19
Figure I.10: Fonction d'un agent réactif	22
Figure I.11: Architecture réactive de subsumption	23
Figure I.12: Fonction d'un agent cognitive.....	23
Figure I.13: Architecture BDI d'un agent	24
Figure I.15: Architecture InterRRap	25
Figure I.16 : Architecture centralisée et non centralisée du SMA.....	15

Chapitre II

Figure II.1: Propagation d'une onde électromagnétique entre un émetteur et un récepteur via des antennes.....	32
Figure II.2: La bande passante.....	33
Figure II.3: Visualisation du diagramme de rayonnement d'une antenne	34
Figure II.4 : Les types de polarisations.....	35
Figure II.5: Structure de l'antenne patch.....	38
Figure II.6: Formes de l'élément rayonnant de l'antenne patch.....	38
Figure II.7: techniques d'alimentation des antennes	39
Figure II.8: Antenne adaptée par encoches.....	41

Figure II.9: Antenne adaptée par ligne quart d'onde	41
Figure II.10: Configuration de l'adaptation d'un stub unique (a) parallèle et (b) série	42
Figure II.11: Géométrie d'un réseau d'antennes à alimentation en série	43
Figure II.12: Géométrie d'un réseau d'antennes à alimentation en parallèle	43
Figure II.13: Les types de reconfigurabilité.	45
Figure II.14: Coefficient de réflexion d'une antenne reconfigurable en fréquence	45
Figure II.15: Antenne reconfigurable en polarisation.	47
Figure II.16: Les différents diagrammes de rayonnement d'une antenne reconfigurable	47
Figure II.17: Le circuit équivalent de la diode PIN pour les cas ON-OFF.....	48
Figure II.18: Géométrie de l'antenne reconfigurable avec diodes PIN.....	49
Figure II.19: Conception et fabrication d'antenne reconfiguré avec une diode PIN.....	49
Figure II.20: Géométrie de l'antenne reconfigurable en polarisation avec diodes PIN.	50
Figure II.21: Schéma structurel d'un interrupteur RF MEMS.	50
Figure II.22: Circuit équivalent de la diode Varicap	51
Figure II.23: (a) Configuration de mesure du prototype fabriqué (b) différentes configurations.	52
Figure II.24: Les différents configurations mécaniques (rotations) de l'antenne reconfigurable.	52
Figure II.25: Structure de l'antenne en spirale carrée à base de Graphène.....	53
Figure II.26: Organigramme de la radio cognitive	55

Chapitre III

Figure III.1: Structure de l'antenne de base rectangulaire.	60
Figure III. 2: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire.....	61
Figure III.3: Géométrie de la nouvelle antenne conçue avec (a) du cuivre et (b) du Graphène.	62
Figure III.4: Résultats de comparaison du S_{11}	63
Figure III.5: Résultats de comparaison de VSWR.	63
Figure III.6: Résultats de comparaison de Gain.	64
Figure III.7: Les diagrammes de rayonnement 2D des antennes patch en cuivre et en Graphène à 9 GHz.	65
Figure III.8: Le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch en Graphène.....	66
Figure III.9: Le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch en cuivre.....	66
Figure III.10: Coefficient de réflexion pour différentes valeurs du potentiel chimique.	67
Figure III.11: VSWR pour différentes valeurs du potentiel chimique.	67
Figure III.12: Effets de la variation du potentiel chimique sur le gain.	68
Figure III. 13: Géométrie de l'antenne.....	70
Figure III.14: Coefficient de réflexion de l'antenne (S_{11}).	71
Figure III.15: VSWR de l'antenne.	72

Figure III.16: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 9.5 GHz en 3D.	72
Figure III.17: Diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) d'antenne à 9.5 GHz en 2D.	72
Figure III.18: Le gain à 9.5 GHz.	73
Figure III.19: Antenne rectangulaire avec les diodes Varicaps.	73
Figure III.20: S_{11} pour les différentes valeurs de la capacité des diodes.	74
Figure III.21: S_{11} pour $C_v=0.01$ pF.	74
Figure III.22: S_{11} pour $C_v=0.01$ pF.	75
Figure III.23: La variation du VSWR de l'antenne reconfigurable pour différentes valeurs de la capacité.	75
Figure III.24: La variation de gain de l'antenne reconfigurable pour différentes valeurs de la capacité.	76
Figure III. 25: Structure de réseau de deux éléments en parallèle.	76
Figure III.26: Le coefficient de réflexion de réseau de deux éléments en parallèle.	77
Figure III.27: VSWR de réseau de deux éléments en parallèle.	77
Figure III.28: Diagramme de rayonnement de réseau de deux éléments en parallèle 3D.	78
Figure III.29: Le diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) de réseau de deux éléments en parallèle à 9.5 GHz en 2D.	78
Figure III.30: Le gain de réseau de deux éléments en parallèle à 9.5 GHz.	78
Figure III.31: S_{11} de réseau de deux éléments en parallèle pour différentes valeurs de la capacité.	79
Figure III.32: Gain de réseau de deux éléments en parallèle pour différentes valeurs de la capacité.	80
Figure III.33: Structure de réseau à quatre éléments en parallèle.	81
Figure III.34: Le coefficient de réflexion de réseau à quatre éléments en parallèle.	81
Figure III.35: Le diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) de réseau de quatre éléments en parallèle à 9.5 GHz en 2D.	82
Figure III.36: Le gain de réseau de quatre éléments en parallèle à 9.5 GHz.	82
Figure III. 37: S_{11} pour différentes valeurs de la capacité dans le réseau à quatre éléments.	83
Figure III.38: La variation du gain de réseau de quatre éléments en parallèle pour différentes valeurs de la capacité.	83
Figure III.39: Structure d'antenne	84
Figure III.40: L'antenne en Graphène.	85
Figure III.41: Comparaison du coefficient de réflexion entre l'antenne à patch en cuivre et en Graphène.	86
Figure III.42: Les diagrammes de rayonnement à 10,4 GHz pour le cuivre (a) et le Graphène (b). ...	86
Figure III.43: Coefficient de réflexion de l'antenne en cuivre avec la diode PIN.	87
Figure III.44: Les diagrammes de rayonnement de l'antenne en cuivre à 10,4 GHz pour la diode PIN ON (a) et OFF (b).	87
Figure III.45: Coefficient de réflexion de l'antenne en Graphène avec la diode PIN (ON-OFF).	88

Figure III.46: Diagrammes de rayonnement de l'antenne en Graphène à 10,4 GHz pour la diode PIN ON (a), OFF (b).....	89
--	----

Chapitre IV

Figure IV.1: Structure d'antenne.	92
Figure IV.2: Coefficient de réflexion de l'antenne simulée	93
Figure IV.3: Diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) de l'antenne à 5.8 GHz en 2D.	93
Figure IV.4: Le gain d'antenne.....	94
Figure IV.5: Structure de réseau d'antennes à deux éléments.....	94
Figure IV.6: S_{11} de réseau d'antennes à deux éléments.....	95
Figure IV.7: Structure de réseau d'antennes à quatre éléments.....	95
Figure IV.8: S_{11} de réseau d'antennes à quatre éléments.....	95
Figure IV.9: Le gain de réseau d'antennes à quatre éléments.	96
Figure IV.10: VSWR de réseau d'antennes à quatre éléments.....	96
Figure IV.11: Diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) du réseau à quatre éléments en 2D.	96
Figure IV.12: Diagramme de rayonnement du réseau à quatre éléments en 3D.	97
Figure IV.13: Le plan de masse du réseau d'antenne reconfigurable. (A) : L'état OFF-OFF, (B) : L'état OFF-ON, (C) : L'état ON-ON.....	98
Figure IV.14: Test du réseau d'antennes reconfigurables à quatre éléments.....	99
Figure IV.15: Comparaison entre la simulation et les mesures du coefficient de réflexion du réseau d'antennes reconfigurable. (A): L'état OFF-OFF, (B) : L'état OFF-ON, (C) : L'état ON-ON.....	99
Figure IV.16: Comparaison du coefficient de réflexion mesuré du réseau d'antennes reconfigurable dans les trois cas.....	100
Figure IV.17: Netbeans IDE 21.	101
Figure IV.18: Plateforme JADE.	102
Figure IV.19: Simulation JADE.	103
Figure IV.20: Interface Agent Sniffer.....	103
Figure IV.21: La moyenne du temps de convergence d'un SU a partager le spectre à la fréquence désirée sur 100 tentatives de communications avec les différents PUs.....	104
Figure IV.22: Taux de réussite de la meilleure offre pour le SU à la fréquence désirée sur 100 tentatives de communication avec les différents PUs détectés.	104
Figure IV.23: Structure d'antenne.	105
Figure IV.24: Le coefficient de réflexion de l'antenne avec le Roger.	106
Figure IV.25: Le gain de l'antenne avec le Roger.....	107
Figure IV.26: Structure de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger ; (a) : Patch, (b) : plan de masse.....	108

Figure IV.27: Coefficient de réflexion de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger.....	108
Figure IV.28: VSWR de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger.	109
Figure IV.29: Gain de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger.	109
Figure IV.30: Diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) du réseau à quatre éléments en Roger.	110
Figure IV.31: Plan de masse du réseau reconfigurable	111
Figure IV.32: S_{11} du réseau reconfigurable avec les diodes PIN.....	111
Figure IV.33: VSWR du réseau reconfigurable avec diodes PIN.	112
Figure IV.34: Diagramme de rayonnement en termes de directivité des trois états des diodes PIN dans le réseau reconfigurable.	113
Figure IV.35: Gain du réseau reconfigurable pour les trois états des diodes PIN.	113
Figure IV.36: Prototype du réseau d'antennes reconfigurable : (A) : Patch ; (B) : plan de masse.....	114
Figure IV.37: Coefficient de réflexion mesuré des trois cas : (A) : OFF-OFF ; (B) : OFF-ON ; (C) : ON-ON.....	115
Figure IV.38: Comparaison entre les mesures et les simulations de différents cas du réseau reconfigurable.	116

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Les types d'antennes	36
Tableau II.2. Comparaison des techniques d'alimentation	43
Tableau II.3: Comparaison entre les différentes techniques de reconfigurabilité.....	54
Tableau III.1: Dimensions de l'antenne de base.....	61
Tableau III.2: VSWR des différentes valeurs de potentiel chimique de l'antenne Graphène67	
Tableau III.3: Gain en fonction de variations de potentiel chimique.....	68
Tableau III.4: Comparaison de notre antenne avec des travaux récents.....	69
Tableau III.5: Dimensions de l'antenne.....	71
Tableau III.6: Les dimensions de l'antenne à 10.4 GHz.....	85
Tableau III.7: Les paramètres de la diode MA4AGBLP912 pour les deux états.....	85
Tableau IV.1 : les dimensions de l'antenne à 5.8 GHz.....	93
Tableau IV.2 : Résultats des simulations pour les trois configurations.....	98
Tableau IV.3: Les dimensions de l'antenne avec le Rogers.....	106

Acronymes

A

ADS : Advanced Design System
AM : Amplitude Modulation
AMS : Agent Management Systeme à avalanche

B

BDI : Beliefs, Desires, intentions

C

CDDL: Common Development and Distribution License
CDS: Centre de Développement des Satellites
CDTA: Centre de Développement des Technologies Avancées
CP : Circular Polarization
CR : Cognitive Radio
CST : Computer Simulation Technology

D

DF : Directory Facilitator

E

EPS : Expanded Polystyrene

F

FCC : Federal Communications Commission
FIPA: Foundation for Intelligent Physical Agents
FM : Frequency Modulation

I

IE3D: Integral Equation Three-Dimensional
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP: Internet Protocol

J

JADE : Java Agent Development Framework

L

LC : Liquid Crystal
LHCP : Left-Hand Circular polarization
LP : Liniare Polarization
LPWAN : Low Power Wide Area Networks

M

MAC : Medium Access Control

O

OSI: Open System Interconnection

P

PCB: Printed circuit board
PIN: Positive Intrinsic Negative
PNA: Perfect Network Analyser
PU: Primary User

Q

QoI: Quality of Information
QoS: Quality of Service

R

RF: Radio Frequency
RFID: Radio Frequency Identification
RF-MEMS: Radio-Frequency Microelectromechanical Systems
RHCP: Right-Hand Circular Polarization

S

SP: Sensory Perception
SR: Software Radio
SMA: System Multi Agents
SMA: SubMiniature version A
SU : Secondary User

T

TCP: Transmission Control Protocol
TOS: Taux d'Ondes Stationnaire

U

UDP: User Datagram Protocol

UHF: Ultra High Frequency

ULB: Ultra Large Band

UWB: Ultra Wide Band

V

VHF: Very High Frequency

VSAT: Very Small Aperture Terminal

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

Chapitre I

**Introduction à la Radio Cognitive et les Systèmes
Muti-Agents.**

Table des matières

I.1	Introduction	7
I.2	La radio logicielle.....	7
I.2.1	La radio logicielle restreinte (SDR).....	8
I.2.2	De l'idée de la radio logicielle à la radio cognitive	8
I.3	La radio cognitive	8
I.3.1	Historique.....	8
I.3.2	Définition	8
I.3.3	La relation entre la RC et la SDR	9
I.4	Principe de la radio cognitive	10
I.5	Architecture de la radio cognitive.....	11
I.6	Cycle de cognition.....	13
I.7	Composants de la radio cognitive.....	15
I.8	Fonctions de la radio cognitive	16
I.8.1	Détection du spectre.....	17
I.8.2	Gestion du spectre.....	18
I.8.3	Partage du spectre	18
I.8.4	Mobilité spectrale.....	19
I.9	Les applications de la RC.....	19
I.10	Utilisation des systèmes multi agents dans le contexte de la radio cognitive	20
I.10.1	Agent	21
I.10.2	Environnement	25
I.10.3	Interactions entre les agents	26
I.10.4	Organisation des systèmes multi agents.....	27
I.11	Plates-formes de développement des SMA.....	28
I.12	Conclusion	28

I.1 Introduction

La demande croissante de bandes de fréquence a conduit à une utilisation intensive du spectre RF disponible, entraînant une pénurie dans les bandes de fréquence. Cette situation est exacerbée par des politiques de gestion inefficaces de l'allocation du spectre, avec 70 % du spectre sous licence restant inutilisé, comme l'a noté la Federal Communications Commission (FCC) en novembre 2002. Face à cette saturation progressive, la gestion du spectre radioélectrique devient un enjeu crucial pour les systèmes de communication modernes.

Les approches traditionnelles de gestion, fondées sur une allocation fixe des ressources spectrales, montrent leurs limites. En réponse à ces défis, la radio cognitive émerge comme une solution innovante, exploitant des techniques d'apprentissage automatique pour optimiser l'utilisation du spectre. Cette technologie permet aux dispositifs de détecter les opportunités spectrales libres, de s'adapter aux variations de l'environnement radioélectrique et de coexister avec les utilisateurs primaires sans générer d'interférences.

Dans ce chapitre, nous examinerons les principes fondamentaux de la radio cognitive, ses composantes clés et ses mécanismes de fonctionnement. Nous aborderons également ses applications et les défis technologiques associés à cette technologie. Enfin, une attention particulière sera donnée à l'intégration de systèmes multi agents dans le cadre de la radio cognitive, offrant ainsi une gestion collaborative et intelligente des ressources spectrales.

I.2 La radio logicielle

Le concept de radio logicielle, introduit par Joseph Mitola en 1991, désigne une technologie reprogrammable et reconfigurable utilisant des techniques numériques pour réaliser des fonctions radio comme la fréquence porteuse, la modulation, ou l'accès au réseau sous forme logicielle. La radio logicielle moderne, elle intègre aussi des fonctionnalités avancées telles que la cryptographie et le codage pour la voix, la vidéo ou les données [1].

La radio logicielle offre une grande flexibilité, permettant d'adapter les interfaces radio aux besoins spécifiques, d'améliorer les performances et d'assurer l'interopérabilité entre systèmes [2]. Cependant, les contraintes actuelles (puissance de calcul, coût, consommation) imposent une phase intermédiaire appelée radio logicielle restreinte, combinant techniques classiques et modernes, en attendant une intégration entièrement logicielle.

I.2.1 La radio logicielle restreinte (SDR)

La SDR (Software Defined Radio) est un système de communication radio capable de s'adapter dynamiquement à différentes bandes de fréquence et types de modulation en utilisant le même matériel. Elle se distingue par sa capacité à résoudre les problèmes de gestion dynamique du spectre tout en offrant une grande flexibilité [3]. Cette technologie permet l'intégration de nouvelles fonctionnalités sans fil hétérogènes aux systèmes existants, sans nécessiter de modification matérielle. Les équipements SDR, en particulier les versions idéales, peuvent s'adapter automatiquement à de nouvelles fréquences et modulations, leur permettant de fonctionner efficacement dans des réseaux sans fil hétérogènes [2].

I.2.2 De l'idée de la radio logicielle à la radio cognitive

Joseph Mitola a introduit un concept novateur appelé Software Radio (SR). Ce concept permet aux équipements de communiquer avec n'importe quel standard de communication radio sans modifier les composants matériels, uniquement en ajustant le logiciel intégré. Bien que cette technologie puisse sembler simple au premier abord, elle offre de nombreux avantages tout en posant des défis technologiques importants. Mitola a perçu la nécessité d'intégrer simultanément de l'intelligence dans les réseaux et les équipements, afin de répondre aux besoins des utilisateurs tout en tenant compte des contraintes de ressources, améliorant ainsi l'efficacité spectrale. C'est dans cette optique qu'il a proposé l'idée de la radio cognitive [4].

I.3 La radio cognitive

I.3.1 Historique

L'idée de la radio cognitive a été officiellement introduite par Joseph Mitola III lors d'un séminaire au KTH, l'Institut royal de technologie, en 1998. Elle a été ensuite approfondie dans plusieurs publications, notamment un article co-écrit avec Gerald Q. Maguire en 1999 et dans la thèse de doctorat de Mitola en 2000. Reconnu comme le « père de la radio logicielle » et l'un des auteurs les plus cités dans ce domaine, Mitola a tiré parti de son expertise en radio logicielle, associée à sa passion pour l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle, pour concevoir la technologie de la radio cognitive [5].

I.3.2 Définition

La radio cognitive (RC) est une technologie innovante basée sur des systèmes de radio définis par logiciel, conçue pour optimiser l'utilisation du spectre électromagnétique, une ressource

naturelle précieuse [6]. Elle se distingue par sa capacité à percevoir son environnement, à apprendre de celui-ci et à s'adapter de manière autonome et dynamique aux variations du contexte d'utilisation. Grâce à une prise de conscience en temps réel de l'environnement spectral, spatial et des comportements des utilisateurs, elle identifie les bandes de fréquences disponibles, réduit les interférences et ajuste ses paramètres opérationnels, tels que la fréquence porteuse, la puissance d'émission et le débit de transmission, afin de garantir une communication fiable et une exploitation efficace du spectre. Ces capacités lui permettent d'assurer la coexistence harmonieuse avec les utilisateurs primaires tout en offrant une qualité de service (QoS) aux utilisateurs secondaires. En intégrant des processus d'analyse, de mémorisation et de prise de décision, la radio cognitive peut également répondre à des besoins spécifiques, tels que la reconnaissance vocale ou la détection de situations d'urgence [7].

La radio cognitive constitue une solution prometteuse pour relever les défis des systèmes de communication modernes tout en maximisant l'efficacité et la durabilité des ressources spectrales.

I.3.3 La relation entre la RC et la SDR

La SDR est une plateforme matérielle et logicielle essentielle à la mise en œuvre de la radio cognitive, offrant une infrastructure flexible qui permet d'exécuter des fonctions adaptatives comme le balayage spectral (observation) et le changement dynamique de fréquence (action). En tant que technologie habilitante, la SDR garantit la flexibilité, la reconfigurabilité et la portabilité indispensables à l'adaptation des paramètres de la radio cognitive (fréquence, puissance, modulation, bande passante) à l'environnement radio. Bien qu'une SDR puisse exister sans intégrer la cognition, fonctionnant alors comme un système de communication programmable mais statique, la radio cognitive, quant à elle, s'appuie nécessairement sur la SDR pour exploiter pleinement ses capacités adaptatives. La relation entre ces deux technologies comme il est montré dans la figure ci-dessous repose sur le moteur cognitif, qui optimise et contrôle le module SDR en analysant des paramètres tels que la perception de l'environnement radio, le contexte utilisateur et l'état du réseau, permettant ainsi un apprentissage et un raisonnement dynamique adaptés aux conditions d'utilisation [8][9].

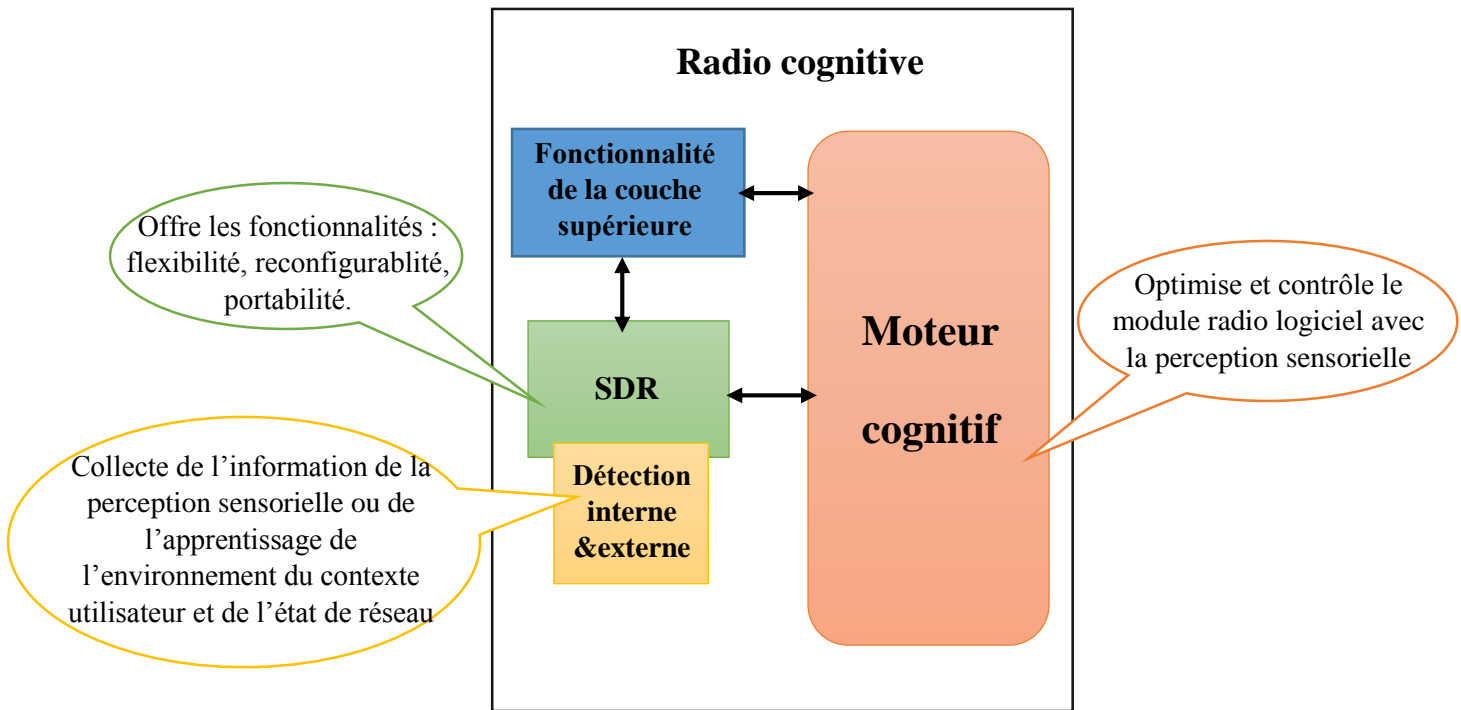


Figure I.1: La relation entre RC et SDR [10].

I.4 Principe de la radio cognitive

La norme IEEE 802.22, élaborée par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), autorise une gestion dynamique et opportuniste du spectre radioélectrique. Elle permet aux utilisateurs secondaires d'accéder aux bandes de fréquences inutilisées, tout en respectant les priorités des utilisateurs primaires [11].

Dans ce cadre, deux types principaux d'utilisateurs sont définis [12]:

- **Utilisateurs primaires (Primary Users - PU)** : également appelés utilisateurs licenciés, ils possèdent une autorisation officielle leur permettant d'utiliser en tout temps des bandes de fréquences spécifiquement attribuées.
- **Utilisateurs secondaires (Secondary Users - SU)** : n'ayant pas de licence dédiée, ils peuvent utiliser les fréquences inutilisées par les utilisateurs primaires à tout moment, et doivent les libérer une fois leur service terminé ou dès qu'un utilisateur primaire en a besoin.

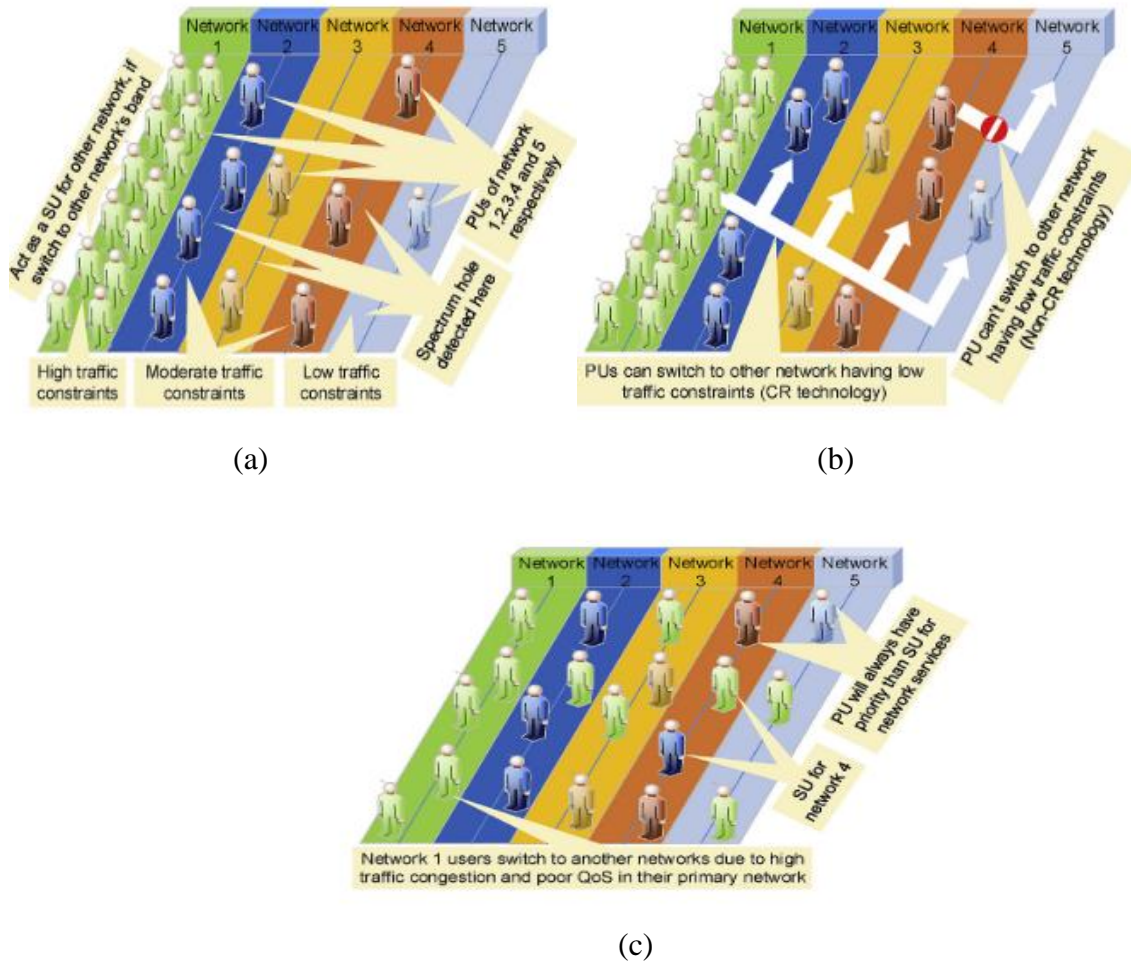


Figure I.2: Principe de la RC : (a) Politique d'allocation fixe du spectre ; (b) Technologie non-RC contre technologie RC ; (c) Une politique d'allocation opportuniste du spectre pour la technologie RC [13]

Cette approche favorise une utilisation plus efficace du spectre, en permettant aux utilisateurs secondaires d'exploiter les ressources disponibles sans interférer avec les utilisateurs primaires.

I.5 Architecture de la radio cognitive

Mitola a conçu l'architecture de la radio cognitive en tenant compte de trois aspects clés : l'utilisateur, le réseau et l'environnement. Cette architecture repose sur une structure intelligente composée de plusieurs éléments interconnectés, capables de fournir des fonctions et des services en respectant un ensemble cohérent de règles de conception [10]. La figure I.3 met en évidence les six composantes fonctionnelles principales de cette architecture, illustrant son équilibre entre adaptabilité, efficacité réseau et satisfaction des besoins utilisateurs.

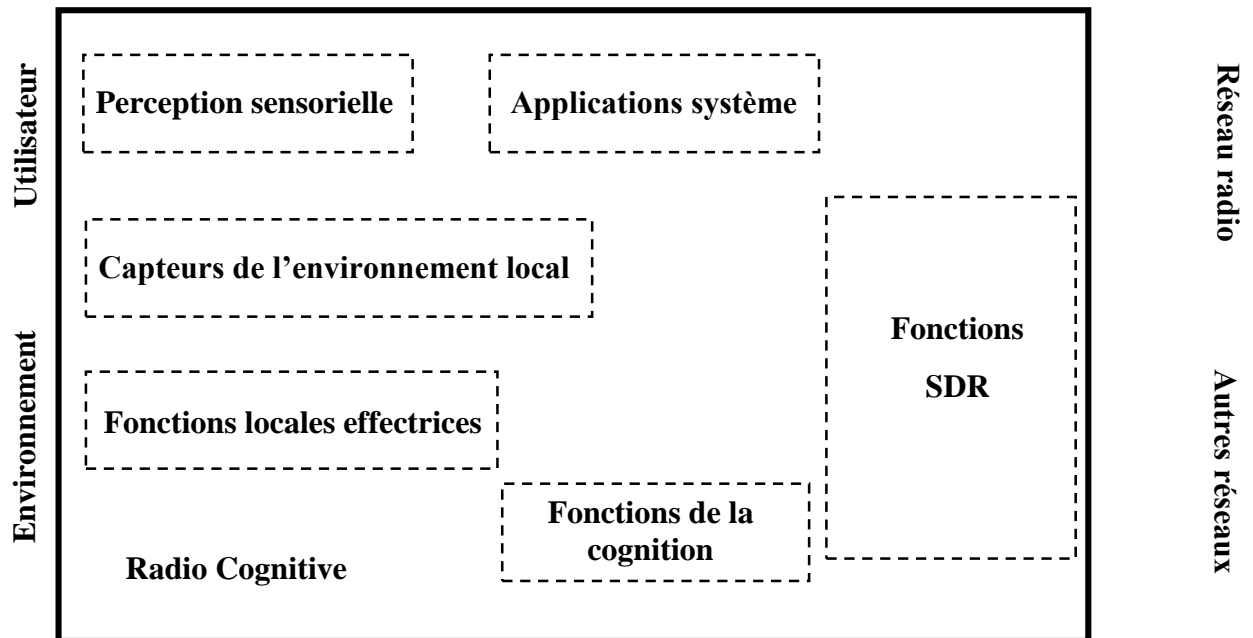


Figure I.3: Les composants de l'architecture de la radio cognitive [10].

- La perception sensorielle (Sensory Perception : SP) de l'utilisateur, englobant l'interface haptique (toucher), acoustique, vidéo ainsi que les fonctions de détection et de perception.
- Les capteurs de l'environnement local, tels que ceux mesurant l'emplacement, la température, ou encore l'accélération (accéléromètre).
- Les applications système, comprenant les services médias indépendants, comme les jeux en réseau.
- Les fonctions SDR, intégrant la détection RF et les applications radio définies par logiciel (SDR).
- Les fonctions de cognition, dédiées aux systèmes de contrôle, de planification et d'apprentissage.
- Les fonctions locales effectrices, incluant la synthèse vocale, textuelle, graphique, ainsi que l'affichage de contenus multimédias [10].

L'architecture des protocoles de la radio cognitive, illustrée à la figure I.4, repose sur le modèle OSI (Open System Interconnection), où la couche physique est assurée par la SDR. Les couches supérieures, comme la liaison de données MAC (Media Access Control), le réseau et le

transport, utilisent des protocoles adaptatifs : Transmission Control Protocol (TCP), User Datagram Protocol (UDP) et Internet Protocol (IP) pour gérer l'activité des utilisateurs principaux, les exigences des utilisateurs secondaires et les variations de qualité du canal. Un système de contrôle intelligent interconnecte la SDR aux applications, ajustant en temps réel les paramètres des protocoles en fonction de l'environnement radio cognitif [15].

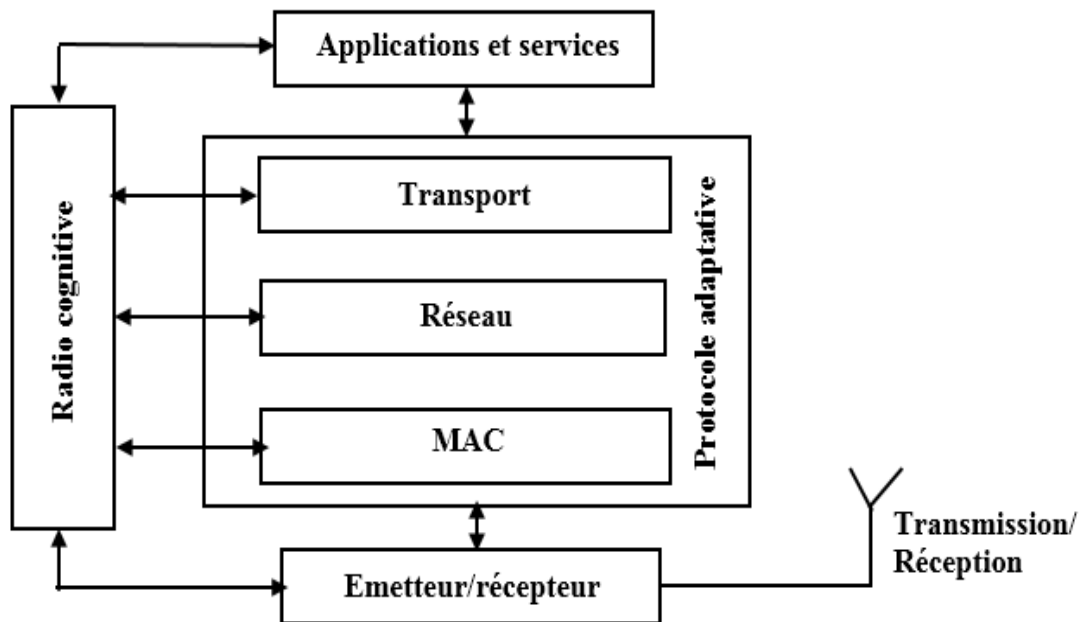


Figure I.4: Les protocoles adoptés par la radio cognitive [15].

I.6 Cycle de cognition

Pour garantir des performances optimales, la radio cognitive doit intégrer des fonctionnalités spécifiques, définies par Mitola dans ce qu'il appelle le cycle cognitif. Ce processus, représenté en détail dans la figure I.5, débute par une phase d'observation et se conclut par une action, permettant à la radio cognitive d'interagir efficacement avec son environnement. Ces systèmes mettent en œuvre des étapes d'observation, d'orientation, de planification, de prise de décision et d'action, tout en s'adaptant à leur environnement pour optimiser leurs performances au fil du temps [16].

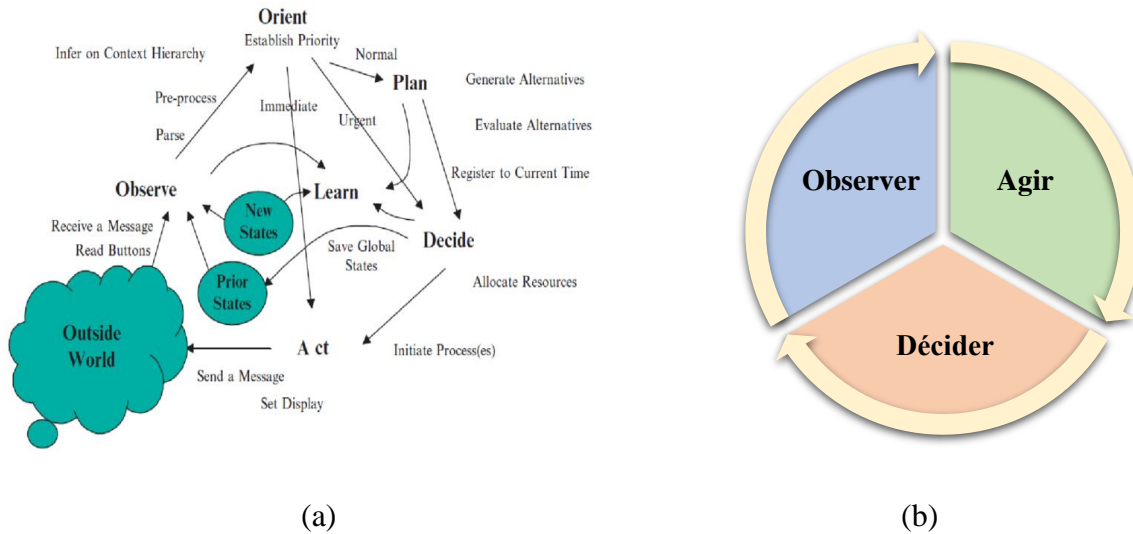


Figure 1.5: (a) Cycle de cognition de Mitola, (b) Cycle de cognition simplifié .

- **Phase d'observation (détecter et percevoir) :** La radio cognitive analyse son environnement en observant les flux de stimuli entrants. Lors de cette phase, elle intègre divers paramètres tels que l'emplacement, la température, et le niveau de luminosité des capteurs, afin de déduire le contexte de communication. En reliant ces stimuli à des expériences passées, elle identifie des schémas récurrents au fil du temps. Elle construit ainsi une base de connaissances en mémorisant l'ensemble des expériences accumulées [14].

- **Phase d'orientation :** À cette étape, les résultats recueillis lors de la phase d'observation sont analysés et comparés à des scénarios de transmission similaires précédemment rencontrés. Cette approche permet d'identifier et de reconnaître les différents schémas de communication.

- **Phase de planification :** Lorsqu'il s'agit de scénarios plus complexes nécessitant une analyse et une prise de décision approfondies, la composante cognitive de la RC entre en jeu. Elle utilise des algorithmes d'apprentissage automatique pour améliorer ses capacités de décision et d'adaptation en fonction des situations rencontrées. La RC est ainsi en mesure d'ajuster ses paramètres de transmission afin de répondre aux exigences de qualité de service, tout en évitant d'interférer avec les transmissions des utilisateurs primaires.

- **Phase de décision :** Cette phase consiste à choisir un plan parmi les options disponibles. Selon les niveaux de QoI (Quality of Information) évalués à cette étape, la radio peut soit notifier l'utilisateur d'un message entrant, soit différer l'interruption à un moment ultérieur.

- **Phase d'action :** Au cours de cette étape, le schéma d'allocation choisi lors de la phase de décision est appliqué. Ce processus interagit avec l'environnement externe, prenant en compte

l'état des transmissions des autres utilisateurs sur le réseau ainsi que la disponibilité des bandes de fréquences. Ainsi, le schéma d'allocation peut être ajusté à tout moment en fonction des besoins de l'utilisateur, grâce à l'accès à l'état interne de la radio cognitive.

- **Phase d'apprentissage :** L'apprentissage de la radio cognitive s'appuie sur l'analyse des données des phases d'observation et de décision. En comparant les états du réseau actuels et passés aux attentes des utilisateurs, elle ajuste ses stratégies pour optimiser la qualité des communications.

Toutes ces fonctionnalités essentielles peuvent être résumées en deux caractéristiques primordiales pour la radio cognitive [17] :

- **Capacité Cognitive :** Cette caractéristique met en évidence la capacité de radio à extraire des informations de son environnement. En d'autres termes, elle peut percevoir et analyser les signaux, les données et les éléments présents dans son champ d'action.

- **Reconfigurabilité :** Elle se réfère à la flexibilité de la radio pour ajuster ses paramètres sans nécessiter de modifications matérielles. Cela permet à la radio de s'adapter à différents contextes, fréquences et conditions sans devoir changer ses composants physiques.

I.7 Composants de la radio cognitive

La compréhension des composants de la radio cognitive sont essentiels pour permettre à cette technologie d'accomplir ses fonctions de manière autonome et intelligente. Voici une description des principaux composants montré dans la figure I.6.

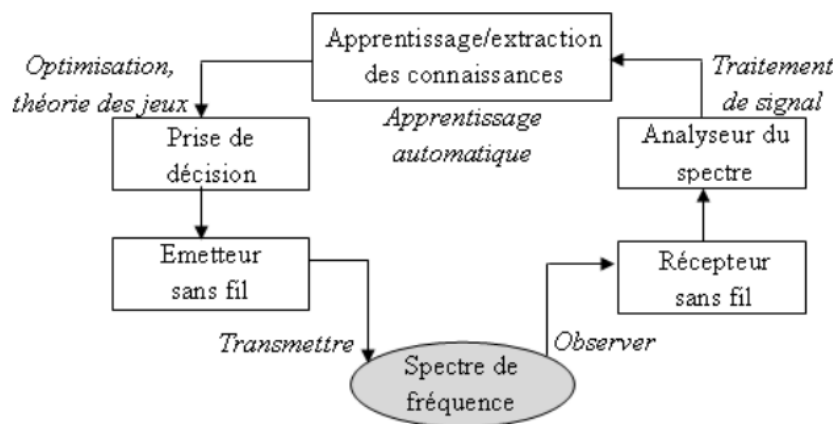


Figure I.6: Composants de la radio cognitive [14].

- **Émetteur/récepteur (émetteur-récepteur) :** L'émetteur-récepteur SDR (Software Defined Radio) est le composant principal qui assure la fonction d'envoi et de réception de signaux sans fil. De plus, des récepteurs sans fil sont déployés pour surveiller l'activité sur l'ensemble du spectre (analyse spectrale). Les paramètres d'émetteur-récepteur au sein d'un nœud radio cognitif peuvent être ajustés de manière dynamique sur la base de protocoles de couche supérieure [18].

- **Analyseur du spectre :** Un analyseur de spectre exploite les signaux détectés pour évaluer l'utilisation du spectre, notamment en identifiant les signatures des utilisateurs principaux et les zones disponibles pour les utilisateurs secondaires. Lorsqu'un utilisateur secondaire souhaite accéder au spectre, l'analyseur doit garantir que la transmission de l'utilisateur principal ne soit pas perturbée. Pour cela, différentes techniques de traitement du signal sont employées afin de recueillir des informations précises sur l'état d'utilisation du spectre [19].

- **Extraction/ apprentissage de connaissances :** L'apprentissage et l'extraction de connaissances utilisent les données d'utilisation du spectre pour analyser et comprendre l'environnement RF environnant, notamment le comportement des utilisateurs et les régimes de licences. Une base de connaissances sur l'accès au spectre est créée et régulièrement mise à jour. Cette base sert à optimiser et ajuster les paramètres de transmission en fonction des objectifs définis et des contraintes imposées. Ce processus d'acquisition et d'analyse peut être renforcé par l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage.

- **Prise de décision :** Dans le domaine de l'allocation du spectre, la prise de décision repose sur une analyse approfondie des conditions environnementales et des objectifs des utilisateurs. Les méthodes d'optimisation varient selon les besoins : l'optimisation classique convient aux systèmes avec des objectifs unifiés, la théorie des jeux est particulièrement adaptée aux interactions entre plusieurs utilisateurs aux intérêts divergents, et l'optimisation stochastique se révèle efficace dans les environnements incertains avec des variables imprévisibles. Chaque approche présente des avantages spécifiques et doit être choisie en fonction des caractéristiques du système étudié [20].

I.8 Fonctions de la radio cognitive

Un système radio cognitif typique effectue différentes tâches au travers d'un cycle cognitif, grâce auquel il obtient les informations nécessaires pour réutiliser une bande de fréquence spécifique.

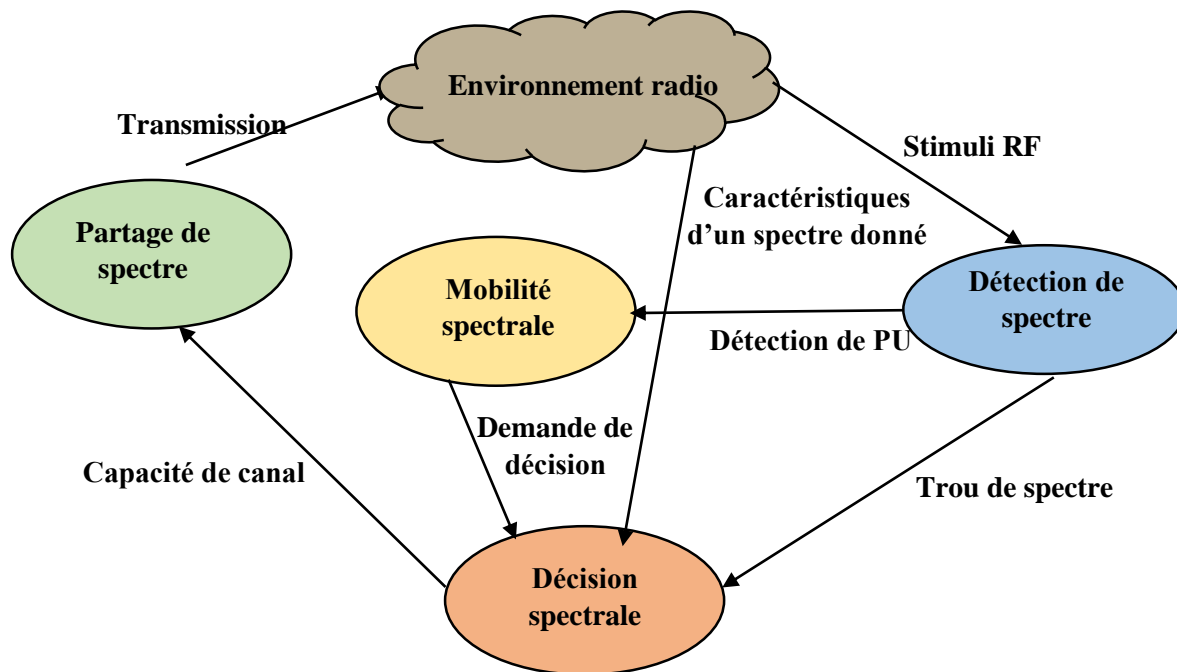


Figure I.7 : Les différentes tâches d'un système de radio cognitive [21].

La répartition de ces tâches et leur interconnexion, illustrée à la Figure I.7, et peut être résumée comme suit :

I.8.1 Détection du spectre

L'objectif principal du processus de détection du spectre est de mesurer l'état d'un spectre cible et l'activité d'un utilisateur primaire. Cela est réalisé par un transmetteur de radio cognitive qui détecte une opportunité spectrale et identifie la méthode appropriée pour y accéder (par exemple, durée, puissance de transmission), sans interférer avec le signal du PU. Il existe deux types de détection du spectre [22] :

- **La détection centralisée du spectre :** Un contrôleur de détection détecte la bande de fréquence cible et partage l'information avec les autres nœuds du système.
- **Détection distribuée du spectre :** La détection distribuée consiste en une détection coopérative qui dépend non seulement de la stratégie de l'utilisateur, mais aussi des stratégies adoptées par les autres utilisateurs, sans contrôleur de détection par d'autres utilisateurs, sans contrôleur de détection.

I.8.2 Gestion du spectre

La RC doit décider de la meilleure bande de fréquences pour répondre aux exigences de qualité de service sur toutes les bandes de fréquences disponibles. Par conséquent, la gestion du spectre est nécessaire pour la RC avec ses deux fonctions [22] :

- **Analyse du spectre** : Les informations obtenues lors du processus de détection du spectre sont ensuite analysées afin d'obtenir des connaissances sur les opportunités spectrales (par exemple, estimation des interférences, durée de disponibilité, probabilité de collision avec un PU en fonction des erreurs de détection). À la suite de cette analyse, une décision d'accès au spectre est prise dans le but de maximiser le débit de SU tout en maintenant les interférences causées au PU en dessous d'un seuil requis.
- **Accès au spectre** : Cette tâche est réalisée au niveau de la couche protocolaire MAC pour éviter les collisions avec un PU ou avec d'autres SUs. Le récepteur doit être synchronisé avec l'émetteur afin de recevoir le signal avec succès.

I.8.3 Partage du spectre

La RC attribue le trou de spectre au SU lorsque le PU ne l'utilise pas. Cette propriété est décrite pour le partage du spectre. Cette dernière repose sur deux méthodes illustrées dans la figure ci-dessous :

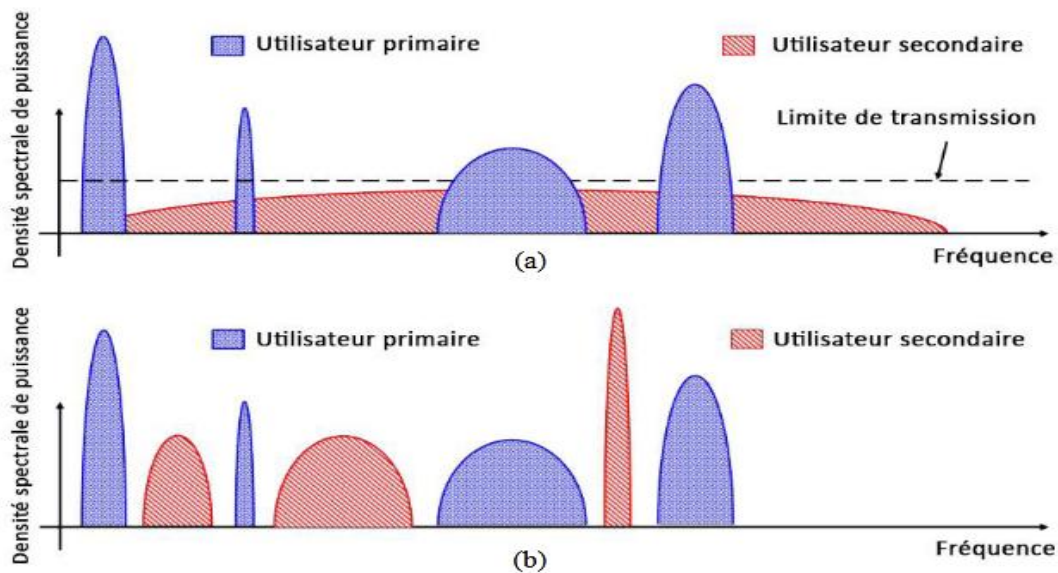


Figure I.8 : Les différentes approches de la RC : (a) Underlay ; (b) Overlay [23]

- **Le partage du spectre sous-jacent (Underlay) :** le principe est la possibilité d'accéder au spectre radio avec une puissance de transmission minimale, de manière à ne pas augmenter la température d'interférence au-delà des seuils prédéfinis

- **Partage du spectre par superposition (Overlay) :** Dans cette technique, les utilisateurs sans licence peuvent utiliser une bande de fréquences pendant une fraction du temps où les utilisateurs sous licence peuvent utiliser une bande de fréquences pendant une fraction du temps.

I.8.4 Mobilité spectrale

Cette fonction est liée au changement de bande de fréquence. Lorsqu'un PU commence à utiliser une bande de fréquence occupée par un SU, ce dernier doit basculer vers une autre bande de fréquence disponible. Ce changement est appelé « hand-off ». En conséquence, les paramètres des protocoles à différents niveaux de la pile protocolaire doivent être ajustés pour correspondre à la nouvelle bande de fréquence. De plus, ce mécanisme de hand-off doit garantir la continuité de la transmission des données par le SU dans la nouvelle bande [21].

I.9 Les applications de la RC

La technologie de la radio cognitive est un système dynamique et intelligent qui améliore l'utilisation efficace du spectre radioélectrique. Elle trouve des applications variées dans de nombreux domaines grâce à sa capacité à gérer les ressources spectrales de manière adaptative.



Figure I.9: Les applications de la RC [24].

- **Aviation civile :** La radio cognitive peut optimiser l'utilisation du spectre, renforcer la sécurité et améliorer la perception de la situation en aviation civile, en permettant des communications et une navigation plus efficace [25].

- **Communication sans fil** : Elle répond aux problèmes de rareté du spectre dans les communications sans fil et soutient des applications comme les services de santé, les loisirs personnels, la défense, la sécurité publique, les maisons intelligentes et la surveillance du trafic [26].

- **IoT Industriel (IIoT)** : Dans l'IIoT, la radio cognitive soutient les réseaux à large couverture et faible consommation d'énergie (LPWAN), améliorant ainsi la connectivité et l'efficacité, notamment pour des applications nécessitant un contrôle de la puissance et une rentabilité accrue [27].

- **Détection et gestion du spectre** : La radio cognitive joue un rôle essentiel dans la détection du spectre, indispensable pour un accès dynamique au spectre et une allocation efficace des fréquences dans les réseaux IoT et les réseaux de capteurs sans fil [28].

- **Réseaux d'urgence** : Le concept de la radio cognitive renforce la fiabilité et la flexibilité des communications sans fil pour les réseaux de sécurité publique et d'urgence. En cas de catastrophe, lorsque les infrastructures classiques sont indisponibles, ces réseaux adaptatifs permettent une communication efficace grâce à une utilisation dynamique des fréquences radio [29].

- **Intégration de l'intelligence artificielle** : Les techniques d'IA sont intégrées dans les réseaux de radio cognitive pour améliorer la détection, le partage et la mobilité du spectre, optimisant ainsi la prise de décision et l'allocation des ressources [30].

- **Accès dynamique au spectre** : La radio cognitive permet une utilisation dynamique du spectre, réduisant les interférences et optimisant l'exploitation des fréquences, ce qui est crucial pour répondre à la demande croissante des applications IoT [31].

- **Large bande et photonique** : Les systèmes de radio cognitive intégrant la photonique offrent une meilleure efficacité spectrale et une vitesse accrue, avec des applications dans les communications à large bande et les systèmes radar [32].

I.10 Utilisation des systèmes multi agents dans le contexte de la radio cognitive

L'approche multi-agents s'impose comme une solution idéale pour répondre aux besoins des systèmes de radio cognitive, ce qui explique l'intensification des recherches exploitant les systèmes multi-agents (SMA) pour la gestion du spectre dans ces réseaux. Les SMA permettent aux agents intégrés aux terminaux de gérer leurs objectifs de manière autonome et décentralisée.

En outre, ils possèdent la capacité de percevoir leur environnement et d'interagir entre eux, une fonctionnalité essentielle pour les terminaux de radio cognitive [33].

L'approche AEIO de Demazeau analyse les SMA à travers quatre dimensions : Agent, Environnement, Interaction, et Organisation [34].

I.10.1 Agent

Dans la littérature spécialisée, le concept d'agent est interprété de diverses manières, avec des points communs mais des variations selon le contexte spécifique de développement. Ferber définit un agent comme une entité, physique ou virtuelle, capable d'interagir avec un environnement donné, de communiquer directement avec d'autres agents, de gérer ses propres ressources, de percevoir son environnement de manière partielle et de disposer de compétences spécifiques. L'objectif principal de l'agent est d'atteindre ses buts en exploitant ses ressources, ses compétences et ses capacités de communication [35].

En revanche, Jennings propose une définition différente, décrivant un agent comme un système informatique opérant dans un environnement donné, capable d'agir de manière autonome et de s'adapter pour accomplir les tâches qui lui sont assignées. Une représentation visuelle met en évidence l'interaction de l'agent avec son environnement, montrant comment il capte les données via ses capteurs et génère des actions en réponse [36].

I.10.1.1 Caractéristiques des agents

En s'appuyant sur l'ouvrage de Wooldridge et Jennings ainsi que sur les définitions précédemment mentionnées, plusieurs caractéristiques peuvent être attribuées à un agent :

- **Autonomie** : Capacité d'agir de manière indépendante, sans intervention directe d'un humain ou d'un autre agent, tout en contrôlant ses propres actions et son état interne [37].
- **Proactivité** : Aptitude à adopter un comportement opportuniste, orienté par ses objectifs ou sa fonction d'utilité, et à prendre des initiatives au moment opportun [38].
- **Flexibilité** : Faculté de réagir de manière adaptée et opportune aux changements ou aux stimuli [39].
- **Sociabilité** : Capacité à interagir avec d'autres agents, qu'ils soient artificiels ou humains [40].

- **Situé** : Capacité à recevoir des informations sensorielles de l'environnement et à entreprendre des actions pouvant influencer cet environnement en retour [41].

I.10.1.2 Classification des agents

Dans le domaine des SMA, on distingue généralement deux grandes catégories d'agents : les agents réactifs et les agents cognitifs. Pour surmonter les limites propres à chacune de ces catégories, une troisième catégorie, appelée agents hybrides, a été proposée dans la littérature [42].

- **Agents réactifs** : Ce sont des agents qui n'ont pas d'intelligence anticipative ou de capacité de planification. Leur fonctionnement est basé sur une réaction directe aux stimuli présents dans leur environnement immédiat. Leur organisation est implicite ou induite, et ils communiquent principalement à travers l'environnement [42].

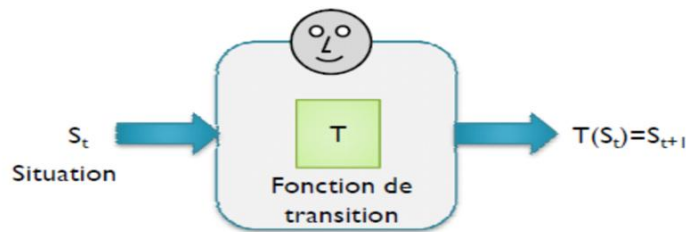


Figure I.10: Fonction d'un agent réactif [42].

Les architectures réactives permettent aux agents de répondre rapidement à des problèmes simples sans nécessiter de raisonnement complexe. Ils agissent directement en fonction des changements de leur environnement, sans avoir besoin d'une représentation symbolique de celui-ci. Toutefois, leur principal inconvénient réside dans l'absence de formalisme, ce qui complique la compréhension et la prédiction de leur comportement ainsi que la vérification de leurs actions.

L'architecture réactive la plus célèbre est celle de la subsomption, proposée par Rodney Brooks. Elle repose sur plusieurs modules, chacun dédié à une tâche spécifique, organisés en couches hiérarchiques pour faciliter la prise de décision [43]. Les couches supérieures sont responsables des tâches plus abstraites, tandis que les couches inférieures, qui traitent des tâches plus simples, bénéficient d'une priorité plus élevée. Une illustration de cette architecture est présentée dans la figure I. 12.

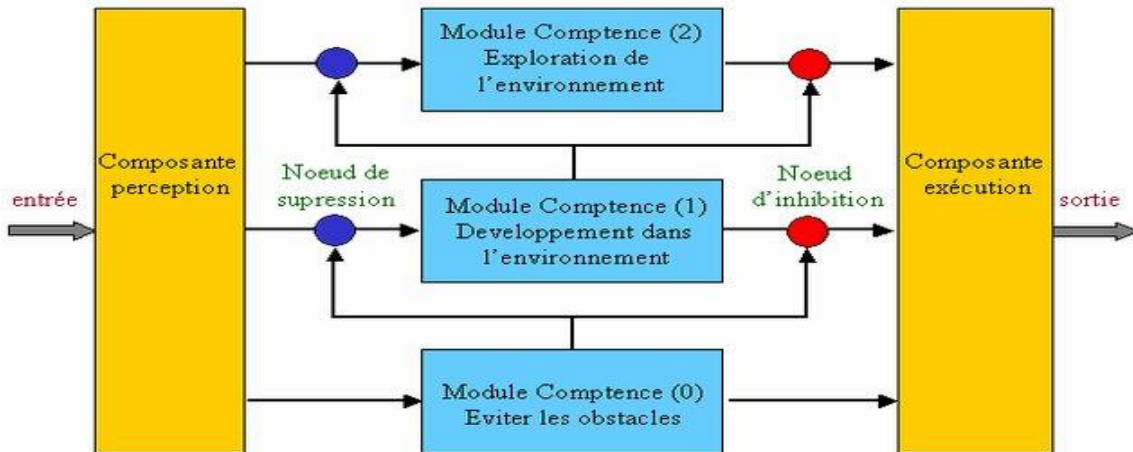


Figure I.11: Architecture reactive de subsumption [44].

- **Agents cognitifs** : Chaque agent est spécialisé dans un domaine spécifique et capable d'interagir avec les autres. Il dispose d'objectifs clairement définis ainsi que de plans explicites pour les réaliser [45].

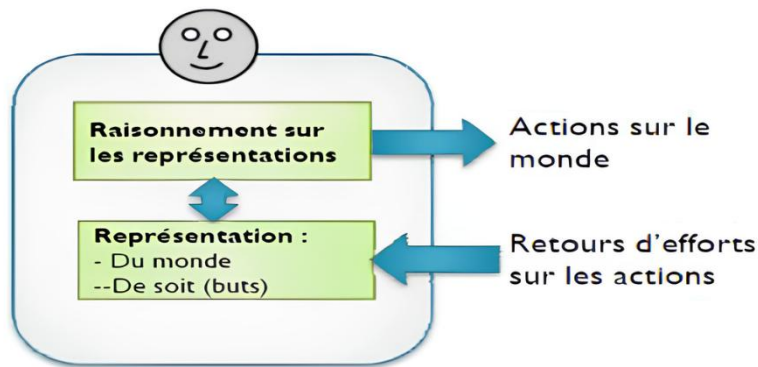


Figure I.12: Fonction d'un agent cognitive [42].

L'architecture d'un agent cognitif repose sur le modèle "Beliefs, Desires, Intentions" (BDI). Dans ce cadre [46] :

- ✓ Les **croiances** (*Beliefs*) représentent les informations que l'agent possède sur son environnement et sur les autres agents avec lesquels il interagit.
- ✓ Les **désirs** (*Desires*) correspondent aux états ou objectifs que l'agent souhaite atteindre dans l'environnement ou pour lui-même.
- ✓ Les **intentions** (*Intentions*) désignent les désirs que l'agent a décidé de poursuivre et de concrétiser.

Comme illustré dans la figure I.13, l'agent perçoit son environnement, ce qui lui permet de construire ses croyances. Grâce à ses capacités de raisonnement, il détermine ses désirs et identifie différents plans en fonction de ses buts et croyances. En mobilisant ses motivations et son aptitude à prendre des décisions, l'agent sélectionne le plan d'action le plus approprié et met en œuvre ses intentions.

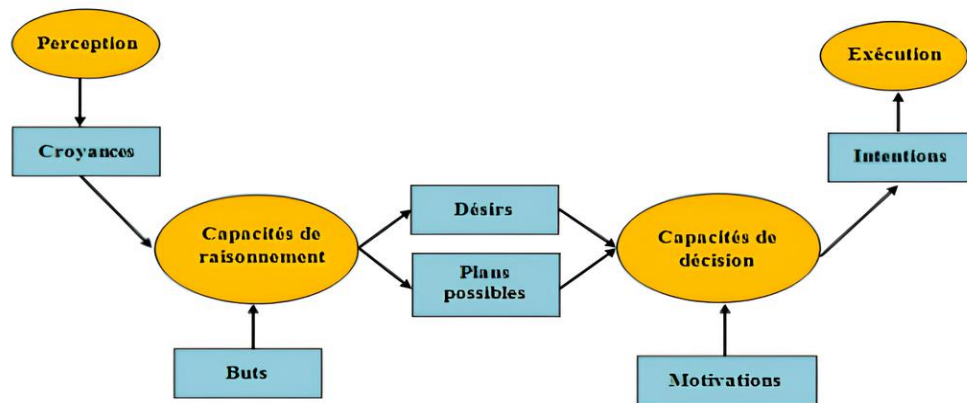


Figure I.13: Architecture BDI d'un agent [47].

- **Agents hybrides :** Un agent hybride combine les deux approches en structurant ses fonctionnalités sous forme de couches. Chaque couche peut correspondre soit à des agents cognitifs, soit à des agents réactifs.

Une architecture hybride d'agent intelligent combine des modules cognitifs, dotés de capacités de raisonnement symbolique, et des modules réactifs, organisés hiérarchiquement. Elle vise à allier la proactivité guidée par les objectifs à la réactivité aux changements de l'environnement, tout en tirant parti des forces des deux approches et en réduisant leurs limites.

L'architecture InteRRaP, l'une des plus connues, est un exemple hybride. Ce système, basé sur le modèle BDI, comprend trois couches de contrôle (réactive, planification locale, et coopérative) et trois bases de connaissances (environnement, planification, et interactions sociales). Les perceptions remontent de la couche inférieure à la supérieure, tandis que les actions suivent un flux descendant. Chaque couche intègre des modules dédiés à l'activation des objectifs et à la planification [48].

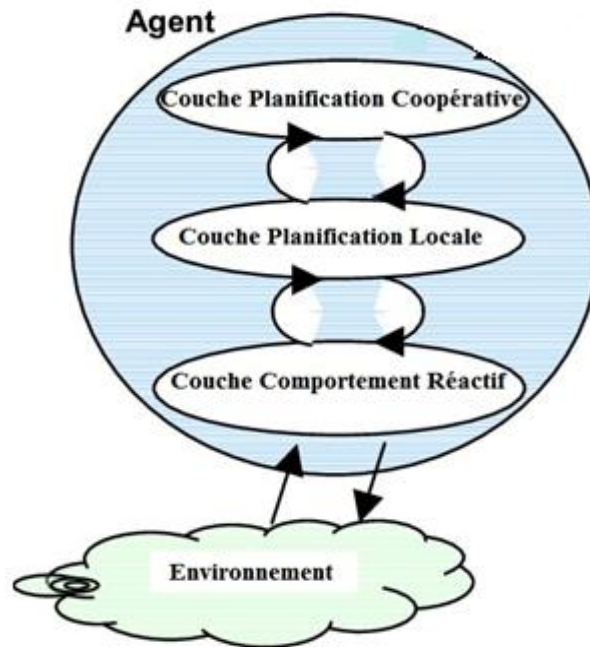


Figure I.14: Architecture InterRRap [49].

Bien que ces architectures soient efficaces dans de nombreuses applications, elles manquent d'un formalisme rigoureux et d'une méthodologie standardisée pour leur conception, ce qui constitue un défi pour leur implémentation optimale.

I.10.2 Environnement

Un agent ne peut exister sans environnement, qui constitue l'espace dans lequel il évolue. L'agent interagit avec son environnement, et réciproquement, l'environnement influence l'agent. Celui-ci joue un rôle crucial dans le fonctionnement dynamique d'un système multi-agents, en étant la combinaison du contexte de déploiement (entités externes et ressources avec lesquelles le SMA interagit) et de l'environnement spécifique à l'application.

L'agent perçoit cet environnement grâce à ses capteurs, choisit les actions à entreprendre en fonction de sa fonction interne, puis exécute ces actions à travers ses effecteurs [50].

I.10.2.1 Propriétés d'environnement

L'évolution de l'environnement peut être modélisée de différentes manières selon les caractéristiques prises en compte et les simplifications adoptées. Les principaux types d'environnements sont :

- **Environnement accessible ou inaccessible :** Un environnement est accessible à l'agent si celui-ci peut percevoir intégralement son état, ou du moins tous les aspects importants pour ses actions. Sinon, il est considéré comme inaccessible [51].
- **Environnement déterministe ou non déterministe :** Un environnement est déterministe si l'état suivant est entièrement déterminé par l'état actuel et l'action de l'agent. Si l'état futur est incertain et que l'action de l'agent peut mener à plusieurs résultats possibles, l'environnement est non déterministe [52].
- **Environnement statique ou dynamique :** Un environnement est statique si son état ne change pas sans intervention de l'agent. Il est dynamique si son état peut évoluer de manière autonome entre deux perceptions de l'agent [53].
- **Environnement discret ou continu :** Un environnement est discret si les transitions entre états se font directement, sans passer par des états intermédiaires. Il est continu si les transitions nécessitent un passage par une séquence d'états intermédiaires [54].

I.10.3 Interactions entre les agents

Dans un système multi-agents, les interactions entre agents jouent un rôle fondamental. Elles se manifestent par des actions réalisées au sein du système qui influencent le comportement des autres agents. Parmi les principales formes d'interactions, on distingue:

- **Négociation :** Ce processus repose sur la communication entre agents afin de parvenir à un accord acceptable pour tous [55].
 - ✓ **Négociation compétitive :** Les agents, ayant des intérêts divergents, cherchent à choisir collectivement une option parmi plusieurs alternatives.
 - ✓ **Négociation coopérative :** Les agents, partageant un objectif commun, unissent leurs efforts pour l'atteindre ensemble.
- **Coopération :** Les agents collaborent en dépassant la simple maximisation de leurs propres intérêts pour favoriser le succès global. Ils unissent leurs efforts pour résoudre des problèmes partagés. Cette collaboration peut être volontaire ou évaluée par un observateur externe, qui analyse les comportements des agents selon des critères tels que l'interdépendance des actions ou le volume de communication pour qualifier leur nature coopérative [56].
- **Coordination :** La coordination est essentielle dans les SMA pour assurer une résolution efficace des problèmes distribués. Sans une coordination adéquate, des dysfonctionnements

graves peuvent survenir, entraînant le désordre et l'inefficacité au sein du groupe d'agents. L'absence de règles claires dans un tel groupe risque de compromettre son bon fonctionnement [57].

I.10.4 Organisation des systèmes multi agents

L'organisation des SMA peut être classée principalement en deux catégories : centralisée et non centralisée. Chaque modèle présente des caractéristiques spécifiques adaptées à différents contextes et applications

- **Organisation centralisée :** Dans une architecture centralisée, un agent détient une connaissance exhaustive de l'ensemble des autres agents du système, ce qui lui permet d'identifier ceux requis pour une compétence spécifique ou une intervention particulière. Les agents, partageant une structure commune composée d'un état et d'un comportement, interagissent de manière à favoriser l'émergence d'une intelligence collective, générant ainsi des comportements émergents et des solutions innovantes [58].

- **Organisation non centralisée (non libre) :** Dans une architecture décentralisée, aucun agent ne dispose d'une connaissance complète de l'ensemble des agents du système. Chaque agent possède une connaissance locale, limitée aux agents avec lesquels il est susceptible d'interagir, sans vision globale initiale. Les agents ne se connaissent pas à l'avance et découvrent leurs pairs progressivement au fil des interactions et des échanges. De plus, ils peuvent présenter des structures variées, reflétant la diversité des rôles et des fonctions au sein du système [58].

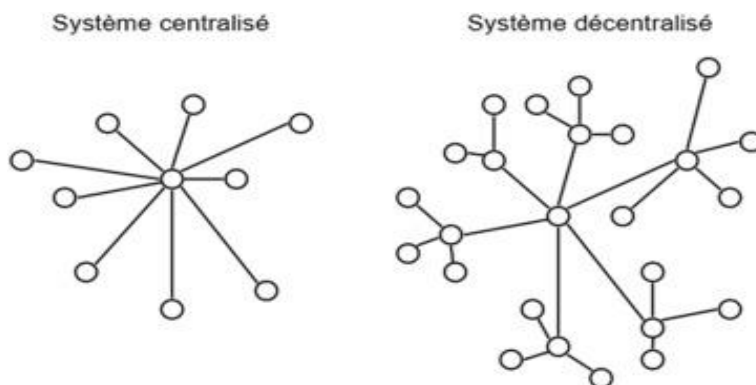


Figure I.15: Architecture centralisée et non centralisée du SMA [59].

I.11 Plates-formes de développement des SMA

Les plateformes dédiées au développement des systèmes multi-agents jouent un rôle clé en optimisant leur mise en œuvre. Elles permettent aux développeurs de concevoir des applications sans se concentrer sur les fonctionnalités de base, réduisant ainsi la complexité liée aux concepts théoriques des SMA. Parmi les notables plateformes figurant [60] [61]:

- **JADE (Java Agent Development Framework)** : Framework open-source en Java, il prend en charge la norme FIPA-ACL et propose des outils pour la vérification syntaxique des messages basés sur des ontologies spécifiques.

- **ZEUS** : Conçu par British Telecom, cette plateforme en Java est dédiée aux applications collaboratives dans le cadre de projets multi-agents.

- **JACK** : Langage et environnement de développement pour agents cognitifs, basé sur Java et développé par Agent Oriented Software.

- **SWARM** : Plateforme spécialisée dans les agents réactifs, utilisée en vie artificielle, développée en Objective-C et Java.

- **JADEX** : Développé par l'Université de Hambourg, ce framework modulaire en Java facilite le développement d'agents intelligents conformes aux standards.

- **MAGIQUE** : Plateforme Java dédiée aux agents distribués physiquement, utilisant un modèle de communication innovant et une architecture modulaire pour une flexibilité accrue [61].

I.12 Conclusion

Ce chapitre a exploité les concepts fondamentaux de la radio cognitive, une technologie avancée qui intègre l'intelligence artificielle pour optimiser l'utilisation des ressources spectrales et minimiser les interférences. Nous avons abordé ses principes de fonctionnement, son architecture et son cycle de cognition, mettant en évidence son rôle dans l'amélioration des communications sans fil, notamment en termes de fiabilité et de sécurité dans des environnements complexes. En parallèle, nous avons exploré les systèmes multi-agents (SMA), en définissant les types d'agents et en analysant leurs architectures réactive et cognitive. Cette approche permet de mieux comprendre les interactions entre agents et la manière dont ces

systemes intelligents peuvent être utilisés dans la gestion du spectre et qui seront utilisé plus tard dans cette thèse.

Le prochain chapitre se concentrera sur les antennes et leurs caractéristiques, notamment les antennes reconfigurables, qui sont indispensables pour la mise en œuvre des réseaux radio cognitifs.

Chapitre II

Antennes (Réseaux et Reconfigurabilité)

Table des matières

II.1	Introduction	31
II.2	Définition d'une antenne	31
II.3	Caractéristiques d'une antenne	32
II.3.1	Caractéristiques électriques	32
II.3.2	Caractéristiques de rayonnement	33
II.4	Types d'antennes	35
II.5	Les antennes imprimés (Patch)	38
II.5.1	Structure d'antenne imprimée	38
II.5.2	Méthodes d'excitation	39
II.5.3	Techniques d'adaptation	41
II.6	Réseau d'antennes	42
II.6.1	Définition	42
II.6.2	Alimentation d'un réseau d'antennes	43
II.7	Les antennes reconfigurables	44
II.7.1	Historique	45
II.7.2	Définition	45
II.7.3	Classification de reconfigurabilité	45
II.7.4	Mécanismes de reconfigurabilité	49
II.7.5	Comparaison entre les différentes techniques	55
II.7.6	Contribution des antennes reconfigurables à la radio cognitive	55
II.7.7	Intégration des antennes reconfigurables dans les systèmes satellitaires	56
II.8	Conclusion	57

II.1 Introduction

Dans le contexte actuel des communications sans fil, les antennes jouent un rôle essentiel en assurant le lien entre les systèmes émetteurs et récepteurs. L'évolution rapide des besoins en termes de fréquence, de miniaturisation des dispositifs et de compatibilité avec des environnements variés a conduit à une demande croissante pour des antennes capables de s'adapter dynamiquement aux conditions d'utilisation. C'est dans ce cadre que les antennes reconfigurables se positionnent comme une solution prometteuse et innovante.

Grâce à leur capacité à modifier certaines de leurs caractéristiques fondamentales, les antennes reconfigurables répondent efficacement aux défis des réseaux modernes, notamment dans les domaines de la radio cognitive et des applications satellitaires. Cette flexibilité fonctionnelle repose sur l'intégration de technologies avancées, telles que les matériaux intelligents et les dispositifs de commutation, offrant ainsi une alternative performante aux antennes conventionnelles.

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble des caractéristiques générales des antennes, en mettant l'accent sur les antennes patch et les réseaux d'antennes. Par la suite, nous concentrerons notre attention sur les antennes reconfigurables, en détaillant les différentes formes de reconfigurabilité ainsi que les techniques employées pour les mettre en œuvre. Enfin, nous soulignerons leurs rôles clé dans les réseaux radio cognitifs et les systèmes de communication satellitaire.

II.2 Définition d'une antenne

Selon la norme IEEE qui définit les termes relatifs aux antennes, une antenne est un dispositif destiné à émettre ou capter des ondes radio. Concrètement, elle reçoit des signaux provenant d'une ligne de transmission, les convertit en ondes électromagnétiques et les diffuse dans l'espace lorsqu'elle est en mode émission. En mode réception, elle intercepte les ondes électromagnétiques et les retransforme en signaux électriques [1]. En général, une antenne peut être utilisée pour l'émission et la réception avec les mêmes propriétés rayonnantes, en vertu du principe de réciprocité. Ce principe est une conséquence du théorème de réciprocité, sauf dans des cas particuliers où des matériaux non linéaires ou anisotropes rendent le fonctionnement non réciproque [2][3].

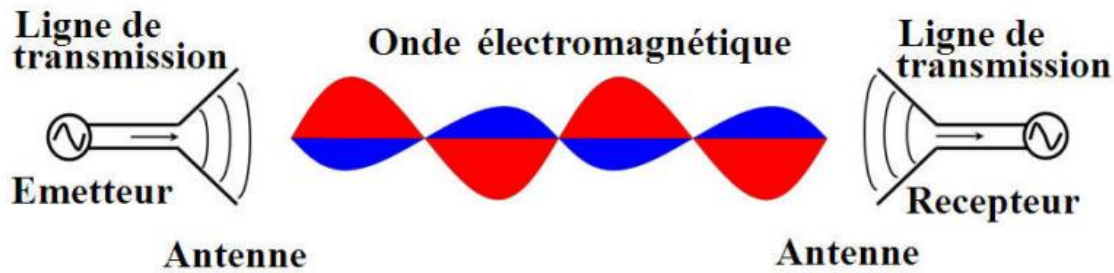


Figure II.1: Propagation d'une onde électromagnétique entre un émetteur et un récepteur via des antennes [3].

II.3 Caractéristiques d'une antenne

Les performances d'une antenne sont définies par deux types de paramètres. Les premiers concernent les aspects électriques, comme l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, le taux d'onde stationnaire et la bande passante. Les seconds décrivent les propriétés de rayonnement, telles que le diagramme de rayonnement, l'efficacité, le gain, la directivité et la polarisation.

II.3.1 Caractéristiques électriques

- **L'impédance d'entrée**

L'impédance d'entrée Z_e permet d'adapter l'antenne au générateur ou à l'alimentation, assurant un transfert optimal de puissance. Elle est déterminée en mode émission en calculant le rapport entre le courant (I_{in}) et la tension (V_{in}) à l'entrée de l'antenne [5].

$$Z_e = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R + jX \quad (\text{II.1})$$

Où : R : la résistance : la partie réelle (active).

X : la réactance : la partie imaginaire (réactive).

- **Coefficient de réflexion**

Le coefficient de réflexion se définit comme le rapport entre l'onde réfléchie à l'entrée de l'antenne et l'onde incidente [5]. Ce paramètre est étroitement associé à l'impédance caractéristique (Z_c) et à l'impédance d'entrée (Z_e), conformément à la relation suivante [6] :

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{II.2})$$

Il s'exprime en décibels par :

$$S_{11}(dB) = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (\text{II.3})$$

- **Taux d'onde stationnaire**

Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), ou le rapport d'onde stationnaire de tension, est une mesure cruciale dans le domaine des antennes et des lignes de transmission. Il évalue l'adéquation entre l'impédance d'une antenne et celle de la ligne de transmission à laquelle elle est reliée [7]. Il correspond au rapport entre la tension maximale et minimale sur la ligne, ou il peut être calculé en fonction du coefficient de réflexion Γ (ou S_{11}) à l'aide de la relation suivante [8] :

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

(II.4)

- **La bande passante**

La bande passante d'une antenne correspond à la plage de fréquences où l'impédance d'entrée de l'antenne est adaptée. En pratique, elle est définie comme la bande de fréquences où le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB (décibel), ce qui équivaut à un TOS inférieur à 2 [9].

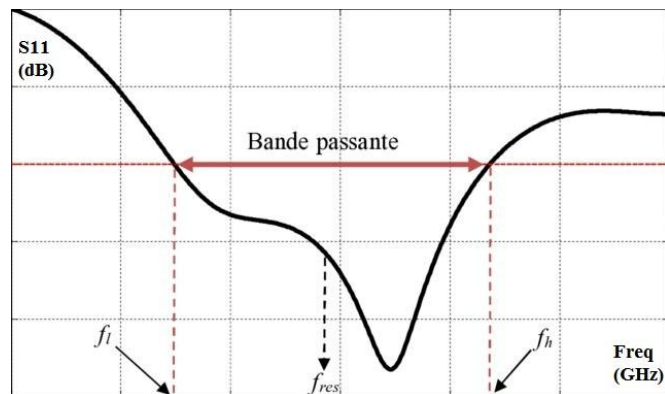


Figure II.2: La bande passante [10].

II.3.2 Caractéristiques de rayonnement

- **Le diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est une représentation graphique en 2D ou 3D du rayonnement de la puissance, du gain ou du champ électrique en fonction des angles de site (θ) et d'azimut (ϕ) [11]. Ce diagramme est souvent présenté dans deux plans perpendiculaires : le plan E (champ électrique maximal) et le plan H (champ magnétique maximal) [12].

L'énergie rayonnée n'est pas répartie uniformément dans l'espace ; certaines directions sont privilégiées, appelées lobes de rayonnement [13]. Le lobe principal contient le maximum d'énergie. L'angle d'ouverture correspond à l'angle où la puissance chute à la moitié de celle du maximum. Les lobes secondaires, y compris le lobe arrière (rayonnement à 180° du lobe principal), sont des directions indésirables, et la conception d'une antenne vise à les minimiser [14].

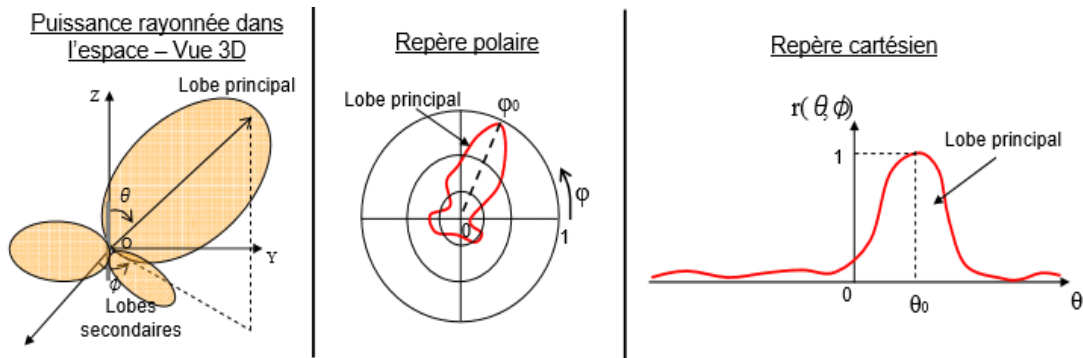


Figure II.3: Visualisation du diagramme de rayonnement d'une antenne [15].

Les antennes directionnelles concentrent plus de puissance dans certaines directions, tandis que les omnidirectionnelles émettent uniformément dans un seul plan [16].

- **Directivité**

La directivité d'une antenne se réfère à son aptitude à focaliser l'énergie émise dans une direction spécifique, ou à capter plus efficacement l'énergie provenant d'une direction particulière lors de la réception [17], elle se calcule par [18] :

$$D = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{total}} \quad (II.5)$$

Où : $U(\theta, \phi)$ est la densité de puissance rayonnée dans la direction (θ, ϕ) .

Et : P_{total} est la puissance totale rayonnée par l'antenne.

- **Efficacité**

L'efficacité d'une antenne (η) est le rapport entre la puissance rayonnée ($P_{rayonnée}$) et la puissance totale fournie à l'antenne ($P_{entrée}$). Elle prend en compte les pertes internes (chaleur, pertes dans les matériaux) et influence directement le gain de l'antenne [19]. Sa formule est [20] :

$$\eta = \frac{P_{\text{rayonnée}}}{P_{\text{entrée}}} \quad (\text{II.6})$$

- **Gain**

Le gain inclut la directivité mais prend aussi en compte l'efficacité de l'antenne, c'est-à-dire les pertes. Il montre combien de puissance est émise par rapport à une antenne idéale. Il est lié à la directivité D et à l'efficacité η de l'antenne par la relation suivante [21] :

$$G = \eta \cdot D \quad (\text{II.7})$$

- **Polarisation**

La polarisation désigne l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique et constitue un aspect crucial dans l'étude des antennes, car celles-ci ne reçoivent efficacement qu'une polarisation spécifique [22]. Elle est définie par la direction du champ électrique E .

- ✓ Lorsque E conserve une direction constante dans le temps, on parle de polarisation rectiligne [23].
- ✓ Si la direction de E varie au cours du temps en formant un cercle ou une ellipse, on parle de polarisation circulaire ou elliptique [24].

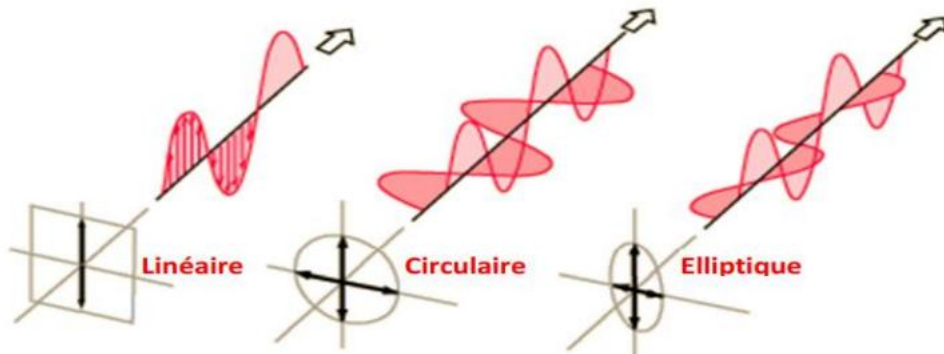


Figure II.4 : Les types de polarisations [25].

II.4 Types d'antennes

Après avoir défini les antennes et leurs principes de fonctionnement, il est important de résumer les principales catégories d'antennes et leurs caractéristiques. Le tableau suivant présente les types d'antennes les plus utilisés, en mettant en évidence leurs spécificités techniques et domaines d'application.

Types d'antennes	Caractéristiques	Applications courants	Avantages	Inconvénients
Antenne dipôle [26][27][28]	Structure simple composée de deux éléments conducteurs	Radio AM/FM, systèmes de communication sans fil	Facile à construire, omnidirectionnelle	Faible gain, bande passante limitée
Antenne Yagi-Uda [29][30]	Antenne directionnelle composée d'un dipôle et d'éléments parasites	Télévision, radio amateur	Gain élevé, directionnelle	Taille relativement grande
Antenne parabolique [31]	Réflecteur en forme de parabole pour concentrer les ondes	Satellites, radar, radioastronomie	Gain très élevé, focalisation précise	Difficile à aligner, encombrante
Antenne patch (microstrip) [33][34]	Antenne plane souvent imprimée sur un substrat	Télécommunications, systèmes GPS, radars	Compacte, légère, facile à intégrer aux circuits	Faible gain, faible efficacité
Antenne hélicoïdale [35][36]	Structure en forme d'hélice qui peut être utilisée en mode axial ou normal	Communications satellites, VHF, UHF	Large bande passante, gain élevé en mode axial	Assez grande en longueur pour un bon gain
Antenne boucle (loop) [37][38]	Conducteur en forme de boucle utilisé pour émettre ou	Communication à courte portée, RFID, radio	Taille compacte, bonne directivité	Faible gain, sensibilité à la polarisation

	recevoir des ondes			
Antenne log-périodique [39]	Antenne directionnelle avec large bande passante	Réseaux TV, radar, radioastronomie	Large bande passante, directionnelle	Taille grande, structure complexe
Antenne fractale [40][41]	Utilise des motifs répétitifs pour augmenter la longueur effective	Télécommunications, réseaux sans fil, antennes miniatures	Compacte, large bande passante	Fabrication complexe
Antenne slot (à fente) [42][43]	Antenne basée sur une fente découpée dans une surface conductrice	Radar, systèmes militaires, Wi-Fi	Bonne directivité, compacte	Complexité de fabrication
Antenne en cornet [44][45]	Antenne directionnelle utilisée souvent dans les bandes de fréquences élevées (micro-ondes)	Radar, télécommunications par satellite, radioastronomie	Large bande passante, gain élevé	Taille encombrante à basse fréquence

Tableau II.1 : Les types d'antennes.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons opté à se focaliser sur l'antenne patch en raison de sa simplicité de conception et de sa compatibilité avec des systèmes miniaturisés tels que les satellites. Bien que ce type d'antenne soit connu pour son faible gain et sa bande passante limitée, ces limitations peuvent être efficacement surmontées grâce à l'utilisation de réseaux d'antennes.

II.5 Les antennes imprimés (Patch)

L'antenne patch, également appelée antenne micro-ruban, est un dispositif compact conçu pour émettre et recevoir des ondes électromagnétiques [46]. Elle est particulièrement utilisée dans des applications requérant un haut niveau d'intégration, comme, les smartphones, les avions, les véhicules spatiaux et les satellites, où les contraintes de taille, de performance, de poids et d'installation sont cruciales. Les antennes imprimées, en raison de leurs caractéristiques, s'avèrent être l'une des meilleures solutions pour répondre à ces exigences.

L'antenne patch est capable de s'adapter à différentes fréquences et polarisations. De plus, elle peut être optimisée grâce à des techniques de reconfigurabilité, ce qui en fait une solution idéale pour des applications nécessitant à la fois une antenne efficace et peu coûteuse [47] [48].

II.5.1 Structure d'antenne imprimée

Une antenne imprimée est un type d'antenne qui est généralement fabriquée en utilisant des techniques de gravure sur un substrat diélectrique, similaire à celles employées dans la fabrication de circuits imprimés.

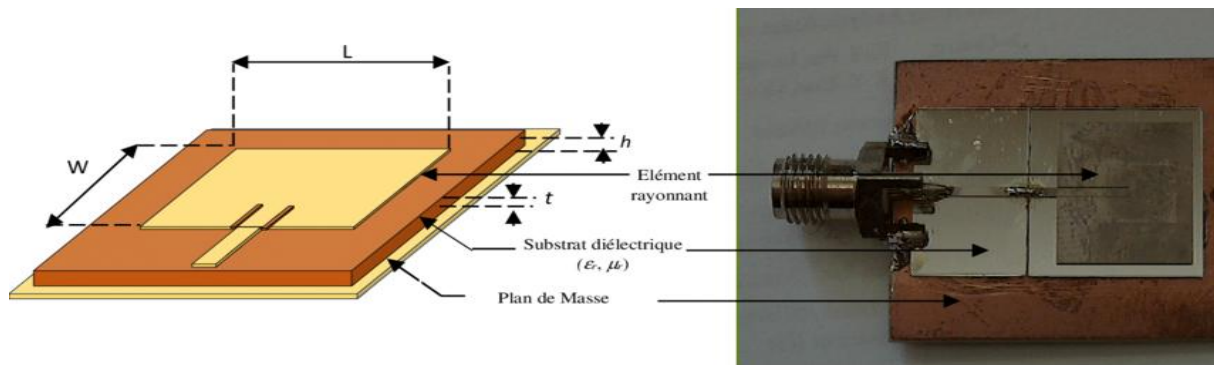


Figure II.5: Structure de l'antenne patch [49].

Voici les principaux éléments de sa structure :

- **Patch rayonnant** : C'est la partie métallique de l'antenne qui émet et reçoit les ondes électromagnétiques. Il est généralement en cuivre ou en un autre matériau conducteur et peut avoir différentes formes comme il est illustré dans la figure ci-dessous [50] :

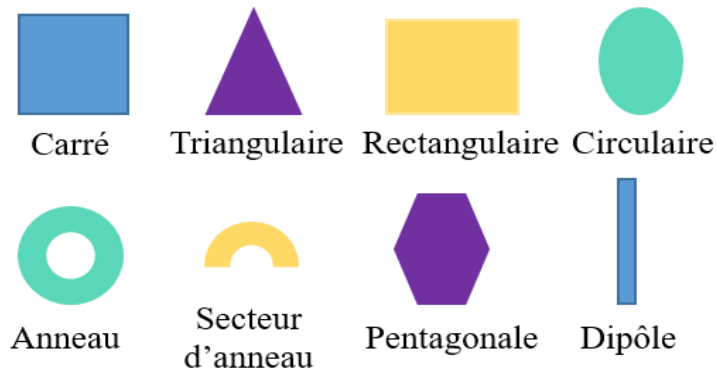


Figure II.6: Formes de l'élément rayonnant de l'antenne patch [50].

- **Substrat** : Une couche diélectrique sur laquelle le patch est imprimé. Le substrat détermine certaines propriétés de l'antenne, comme sa fréquence de résonance et son efficacité. Les matériaux courants incluent le Roger, le FR4, ou le téflon [51].
- **Plan de masse (ou réflecteur)** : Une plaque métallique qui se trouve au-dessous du substrat et qui sert à réfléchir les ondes électromagnétiques, optimisant ainsi la performance de l'antenne [52].
- **Ligne d'alimentation** : Un guide qui fournit le signal à l'antenne. Elle peut être de type micro-ruban, ou bien une sonde qui traverse le substrat et se connecte au patch [51].

II.5.2 Méthodes d'excitation

Les techniques d'alimentation des antennes comme il est montré dans la figure ci-dessous sont classées selon deux méthodes en contact direct avec l'antenne ou en reposant sur un couplage électromagnétique. Voici un aperçu des principales méthodes d'alimentation, catégorisées en techniques de contact et sans contact :

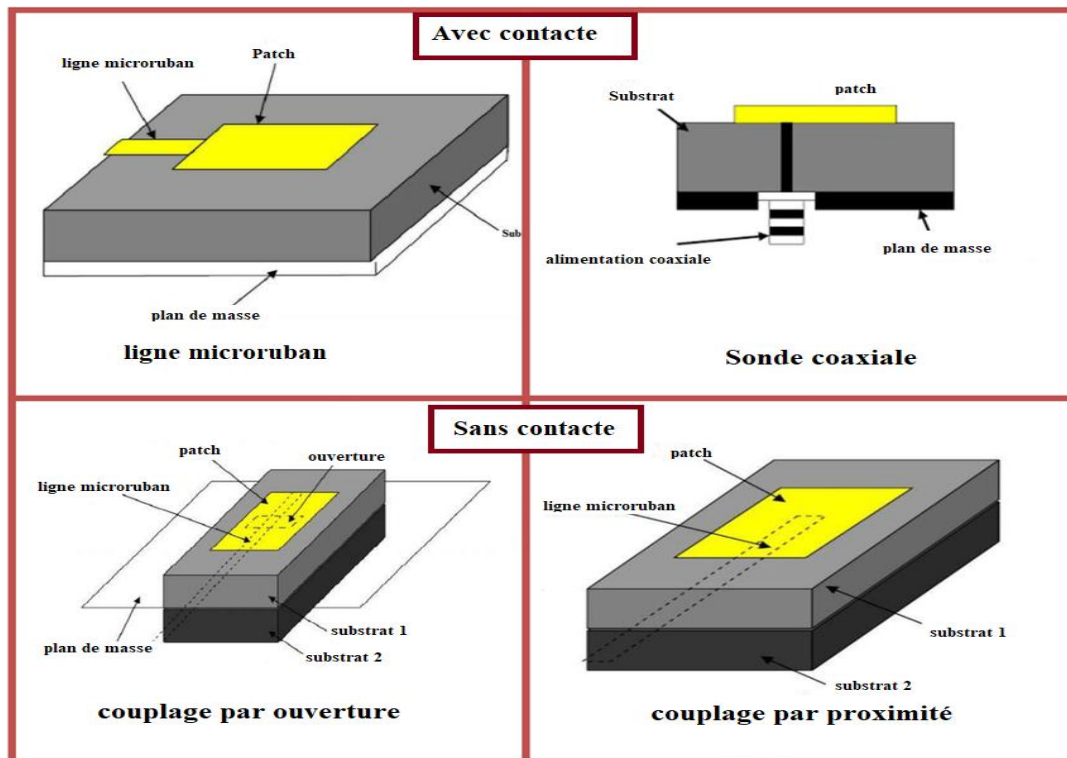


Figure II.7: techniques d'alimentation des antennes [53].

A. Méthodes d'alimentation avec Contact

Ces méthodes impliquent une connexion physique entre la ligne d'alimentation et le patch de l'antenne.

- **Alimentation par ligne micro-ruban** : Une bande conductrice est connectée directement au patch de l'antenne, permettant aux signaux RF de circuler de la ligne d'alimentation vers le patch.

Avantages : Conception simple, faible coût, et facile à intégrer dans les conceptions de circuits imprimés (PCB) [54].

Inconvénient : bande passante limité [55].

- **Alimentation par sonde coaxiale** : Le conducteur interne d'un câble coaxial entre en contact avec le patch de l'antenne, tandis que le conducteur externe est relié à la masse.

Avantages : Offre une bonne adaptation d'impédance et convient aux applications à haute fréquence [56].

Inconvénients : défi de l'adaptation d'impédance [55].

B. Méthodes d'alimentation sans contact

Ces méthodes transfèrent l'énergie à l'antenne sans connexion électrique directe.

- **Alimentation par couplage à ouverture** : La puissance RF est alimentée à travers une ouverture dans un plan de masse, permettant le transfert d'énergie depuis une ligne micro-ruban située en dessous [57].

Avantages : Réduit le rayonnement parasite et améliore la bande passante, idéale pour les conceptions d'antennes multicouches [58].

Inconvénients : sensible au positionnement [55].

- **Alimentation par couplage de proximité** : Une ligne d'alimentation est placée à proximité de l'antenne sans contact direct, en utilisant des champs électromagnétiques pour le transfert d'énergie [59].

Avantages : Permet une bande passante plus large et une meilleure adaptation d'impédance par rapport aux méthodes avec contact [59].

Inconvénients : nécessite une mise au point précise [55].

II.5.3 Techniques d'adaptation

L'adaptation d'une antenne patch consiste à ajuster l'impédance entre l'antenne et la ligne de transmission pour maximiser le transfert de puissance et minimiser les réflexions, ce qui améliore ses performances. Voici quelques techniques :

- **Adaptation par des encoches** : La conception d'une antenne à encoches implique l'ajout et l'optimisation de fentes ou d'ouvertures dans la structure de l'antenne pour obtenir une adaptation optimale de l'impédance à la fréquence de fonctionnement ciblée. Ce type d'antenne est apprécié pour sa compacité, son profil bas et sa large bande passante [60].

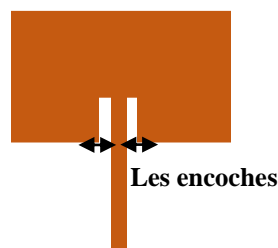


Figure II.8: Antenne adaptée par encoches.

- **Adaptation par ligne quart d'onde** : L'adaptation par ligne quart d'onde transforme une impédance de charge Z_L en une impédance d'entrée Z_{in} via une ligne de transmission ayant une impédance caractéristique Z_0 . La relation de base est définie par :

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (\text{II.8})$$

Ce qui signifie que l'impédance d'entrée Z_{in} dépend de l'impédance de charge Z_L et de l'impédance caractéristique Z_0 de la ligne. Pour que cette adaptation soit efficace, il est essentiel que la longueur de la ligne soit précisément $\lambda/4$ à la fréquence de résonance [61].

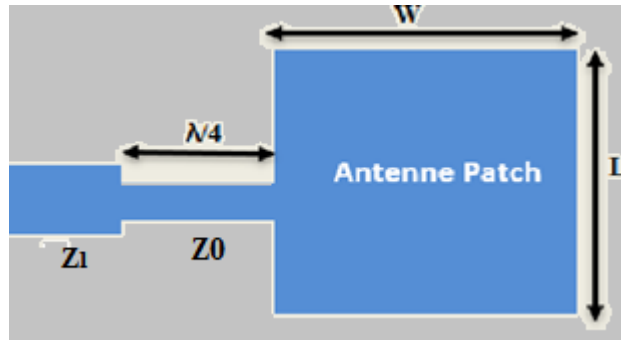


Figure II.9: Antenne adaptée par ligne quart d'onde [62].

- **Adaptation par stub :** Une méthode alternative pour adapter une charge consiste à utiliser un stub, soit en circuit ouvert, soit en court-circuit, en choisissant généralement l'option la plus compacte. Pour simplifier le calcul, il est courant de travailler en admittance et de sommer les impédances parallèles ramenées [63]. Un stub est une section de ligne d'une longueur donnée, connectée en parallèle à la ligne principale à une certaine distance de la charge [64].

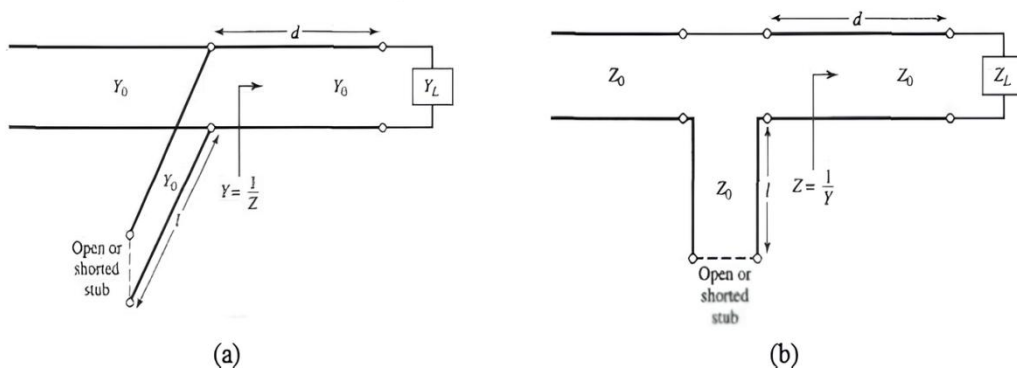


Figure II.10: Configuration de l'adaptation d'un stub unique (a) parallèle et (b) série [65].

II.6 Réseau d'antennes

II.6.1 Définition

Les réseaux d'antennes se composent habituellement de multiples éléments rayonnants, identiques et opérant dans une bande de fréquences commune, afin de créer une ouverture rayonnante [66]. En augmentant le nombre de ces éléments, on peut améliorer la directivité et

le gain du réseau [67]. Ces éléments rayonnants peuvent être constitués de patches imprimés, de fentes, de cornets ou encore de dipôles, répartis stratégiquement dans l'espace. Dans notre cas, nous réaliserons ce réseau avec des antennes patch.

II.6.2 Alimentation d'un réseau d'antennes

Les réseaux d'antennes peuvent être alimentés de deux façons principales : en série et en parallèle. Chaque configuration présente des caractéristiques, des avantages et des inconvénients spécifiques, qui influencent la performance globale du système.

- **Alimentation en série :** Dans une configuration d'alimentation en série, les antennes sont connectées successivement, ce qui signifie que le courant les traverse l'une après l'autre. Cette méthode, bien que simple en termes de câblage, présente certaines contraintes : l'impédance totale résulte de la somme des impédances individuelles, rendant l'adaptation plus complexe, surtout si les antennes diffèrent. Par ailleurs, un problème sur une antenne (comme un court-circuit) peut perturber l'ensemble du réseau et causer une perte de signal [68].

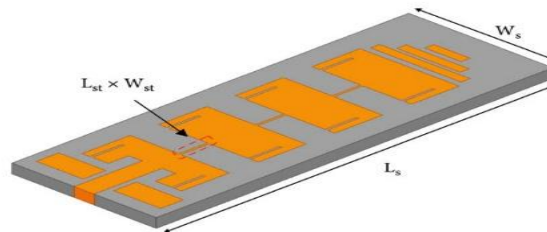


Figure II.11: Géométrie d'un réseau d'antennes à alimentation en série [69].

- **Alimentation en parallèle :** Dans le cas d'une alimentation en parallèle, chaque antenne est directement reliée à la source d'alimentation, permettant à chaque antenne de recevoir le même signal indépendamment des autres. Cette configuration offre une meilleure fiabilité, car une défaillance d'une antenne n'affecte pas les autres, et facilite l'adaptation d'impédance, minimisant les pertes par réflexion. Cependant, elle nécessite plus de câblage et des composants supplémentaires pour alimenter chaque antenne individuellement [70].

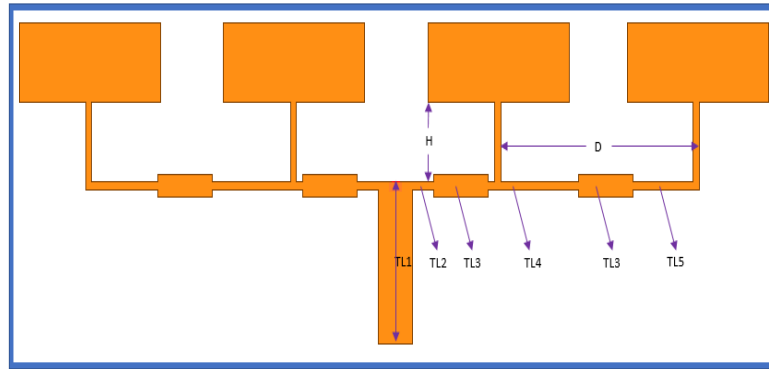


Figure II.12: Géométrie d'un réseau d'antennes à alimentation en parallèle [71].

- **Comparaison entre les techniques d'alimentation de réseau d'antennes**

Le choix du mode d'alimentation est essentiel pour optimiser les performances d'un réseau d'antennes, influençant la simplicité, la fiabilité et la gestion des pertes de signal. Le tableau suivant compare les alimentations en série et en parallèle selon ces critères clés.

Critères	Alimentation série	Alimentation parallèle
Simplicité	Plus simple	Plus complexe
Fiabilité	Moins fiable	Plus fiable
Adaptation d'impédance	Difficile	Moins facile
Perte de signal	Peut affecte tous le réseau	Affecte uniquement l'antenne défaillante

Tableau II. 2 : Comparaison des techniques d'alimentation.

Ainsi, à la lumière de cette comparaison, nous avons opté dans nos structures pour une approche qui combine les deux techniques afin de tirer parti des avantages de chacune tout en réduisant leurs inconvénients

II.7 Les antennes reconfigurables

Avec l'évolution des technologies et l'intégration de dispositifs intelligents, les antennes traditionnelles, bien qu'efficaces dans de nombreuses applications, peinent à répondre aux exigences des environnements de communication dynamiques. Leur capacité d'adaptation limitée aux fréquences variables et aux conditions de propagation fluctuantes souligne la nécessité de solutions plus flexibles. Les antennes reconfigurables offrent une réponse prometteuse à cette problématique en permettant une plus grande adaptabilité et flexibilité.

II.7.1 Historique

Le concept d'antenne reconfigurable est apparu dans les années 1930 pour diriger et ajuster les signaux radio. Des antennes à réseaux variables ont été développées pour détecter les directions des ondes courtes et améliorer la précision du radar, notamment avec le réseau Wullenweber pendant la Seconde Guerre mondiale. Dans les années 1970, la "reconfigurabilité" a été définie comme la capacité de modifier les faisceaux en fonction des besoins [72].

II.7.2 Définition

Contrairement aux antennes traditionnelles, les antennes reconfigurables ont la capacité d'ajuster dynamiquement leurs paramètres de fonctionnement tels que la fréquence, la polarisation et le diagramme de rayonnement pour s'adapter aux variations des conditions environnementales et aux exigences du système. Cette reconfiguration se réalise en modifiant la distribution du courant électrique, ce qui influence les propriétés du champ électromagnétique et l'impédance de l'antenne, impactant ainsi ses capacités d'émission et de réception. Grâce à cette adaptabilité, les antennes reconfigurables optimisent les performances des systèmes de communication sans fil dans divers contextes, offrant une efficacité accrue et une plus grande flexibilité [73].

En ajustant réversiblement leurs propriétés opérationnelles en fonction des besoins spécifiques d'une application, ces antennes permettent de réduire le nombre d'équipements nécessaires, économisant ainsi de l'espace. Elles remplissent les fonctions de plusieurs antennes sans augmentation de la taille, tout en atteignant différents objectifs de communication [74, 75].

II.7.3 Classification de reconfigurabilité

Une représentation schématique des différents types d'antennes reconfigurables est donnée dans la figure suivante :

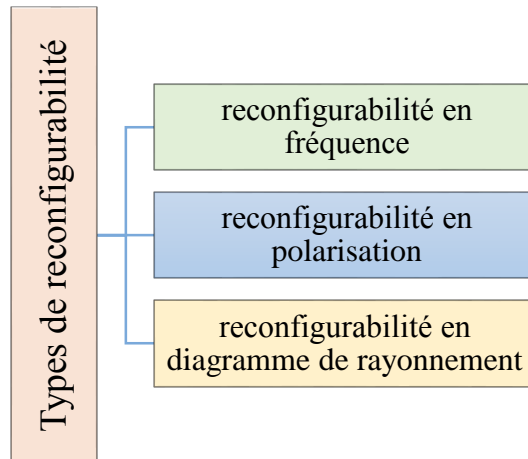


Figure II.13 : Les types de reconfigurabilité.

II.7.3.1 Antennes reconfigurables en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence ont la capacité de couvrir plusieurs bandes de fréquences, ce qui réduit considérablement le nombre d'antennes nécessaires pour les communications multimodes. La reconfiguration en fréquence permet de modifier les fréquences de fonctionnement de l'antenne comme il est montré dans la figure ci-dessous. Ces antennes, également appelées antennes accordables en fréquence, se divisent en deux catégories : continue et discrète (par commutation) [76].

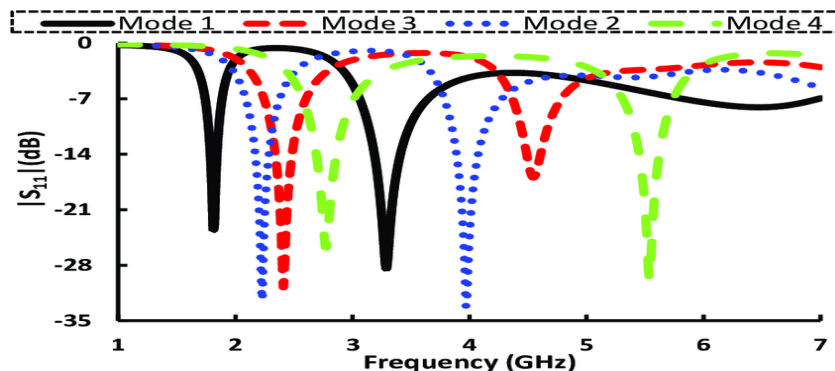


Figure II.14: Coefficient de réflexion d'une antenne reconfigurable en fréquence [77].

- **Antenne reconfigurable en fréquence continue** : Dans ce cas, le réglage de la fréquence est fluide et peut être ajusté dans une plage continue, permettant ainsi à l'antenne de fonctionner à n'importe quelle fréquence au sein d'une bande spécifiée sans être limitée à des paliers de fréquence spécifiques. Ce type est souvent obtenu grâce à composants ajustables, tels que des diodes varactor ou des matériaux à permittivité variable comme le Graphene ou les cristaux liquides. Il est particulièrement utile pour les applications nécessitant un contrôle

précis de la fréquence afin de s'adapter en temps réel à divers environnements ou conditions opérationnelles [78].

- **Antenne reconfigurable en fréquence discrète** : la fréquence peut uniquement être commutée entre un ensemble de valeurs prédéfinies, ce qui signifie que l'antenne fonctionne avec des fréquences fixes plutôt qu'une plage continue. La reconfiguration discrète est généralement obtenue avec des diodes PIN (Positive Intrinsic Negative) ou des commutateurs RF-MEMS (Radio-Frequency Microelectromechanical Systems), chaque position du commutateur correspondant à une fréquence de résonance spécifique. Ce type de reconfiguration est plus simple en termes de contrôle et offre plus de stabilité, mais il est moins flexible pour l'adaptation de la fréquence, ce qui le rend idéal pour les applications nécessitant des bandes de fréquence prédéfinies, comme les systèmes multi-bandes [79].

La reconfigurabilité en fréquence est essentielle, notamment dans les applications de la radio cognitive, pour permettre la transition entre le mode détection et le mode communication, c'est pour ça nous nous sommes basés sur ce type dans nos travaux.

II.7.3.2 Antennes reconfigurables en polarisation

La polarisation d'une antenne peut également être reconfigurée pour permettre la réutilisation des fréquences et la réduction des effets de trajets multiples [80]. La polarisation d'une antenne dépend généralement de sa configuration physique, car la direction du courant de surface sur ses parties rayonnantes est directement influencée par la forme de l'antenne et la manière dont elle est excitée. Une polarisation reconfigurable peut exploiter la capacité d'une antenne à changer le sens de polarisation en différents types (c'est-à-dire, de linéaire (LP) à circulaire (CP), de circulaire droite (RHCP) à circulaire gauche (LHCP), etc.). Cela améliore la capacité d'envoyer et de recevoir des informations avec un plus grand nombre d'antennes ayant des polarisations diverses [81].

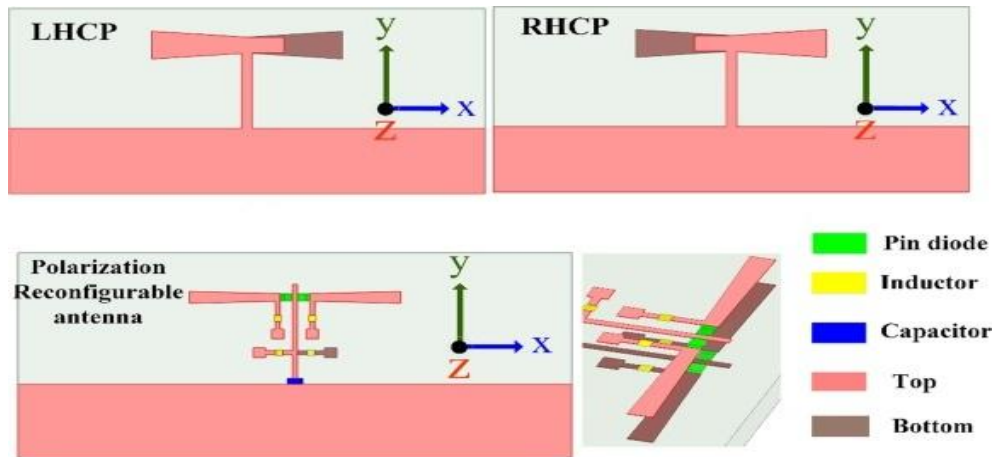


Figure II.15: Antenne reconfigurable en polarisation [82].

II.7.3.3 Antennes reconfigurables en diagramme de rayonnement

Les antennes à reconfiguration de diagramme représentent une technologie clé pour les applications de télécommunication modernes. Cette dernière permet de modifier la forme, l'orientation ou le gain des diagrammes de rayonnement, facilitant ainsi le ciblage ou l'exclusion de certaines directions spécifiques. Cette capacité de reconfiguration trouve des applications diverses, notamment pour minimiser les interférences provenant de sources de bruit ou de brouillage électronique, renforcer la sécurité des communications et optimiser l'efficacité énergétique en dirigeant la directivité vers les utilisateurs ciblés [83].

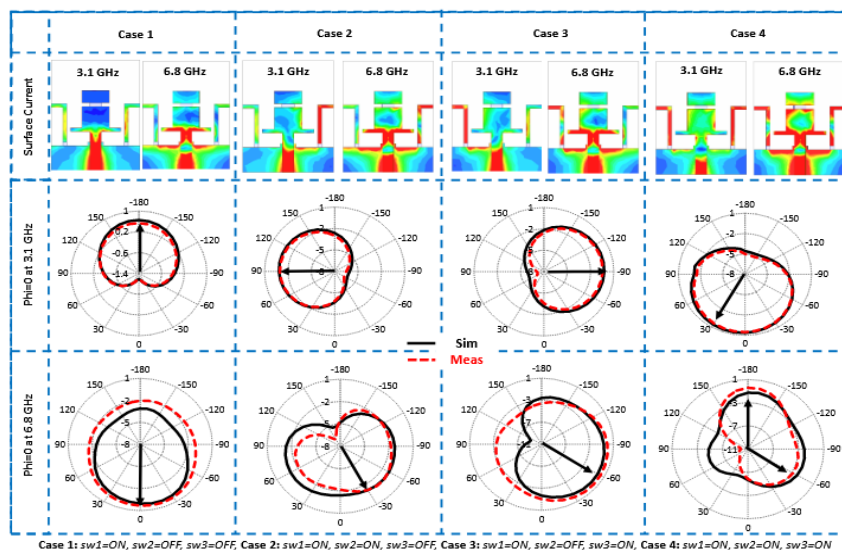


Figure II.16: Les différents diagrammes de rayonnement d'une antenne reconfigurable [85].

Ainsi, cette approche offre une solution prometteuse pour maximiser le signal dans une direction souhaitée tout en atténuant les interférences en provenance des directions non

désirées. En outre, elle permet de modifier la distribution des sources de courant sur la structure de l'antenne, orientant ainsi l'énergie rayonnée sous forme de faisceau vers des directions spécifiques, ce qui contribue à améliorer le débit de données de la communication [84].

II.7.4 Mécanismes de reconfigurabilité

Après avoir exploré les différents types de reconfigurabilité, il est essentiel de comprendre les mécanismes permettant leur mise en œuvre. Ces mécanismes incluent des approches électriques, optiques, mécaniques ou encore l'utilisation de matériaux agiles. Nous détaillerons ces techniques dans cette section.

II.7.4.1 Electrique

Dans cette méthode de reconfiguration, les caractéristiques de l'antenne sont modifiées à l'aide d'éléments de commutation électroniques tels que les diodes PIN, les varactors ou les RF-MEMS [86].

- Diode PIN :** La diode PIN possède une large région intrinsèque entre les jonctions p et n, ce qui lui confère une tension de claquage élevée, adaptée aux applications à haute tension. La figure II. 17 nous montre son circuit équivalent. La valeur de l'inductance L reste identique dans les configurations ON et OFF. Cependant, une faible valeur de la résistance série R_L (environ 1Ω) permet le passage du courant en état ON, tandis qu'une grande valeur de la résistance parallèle R_h (environ $1 M\Omega$) entraîne un comportement de circuit ouvert en état OFF. Ce fonctionnement peut être modélisé comme une frontière RLC équivalente dans une simulation en onde complète [86] [87].

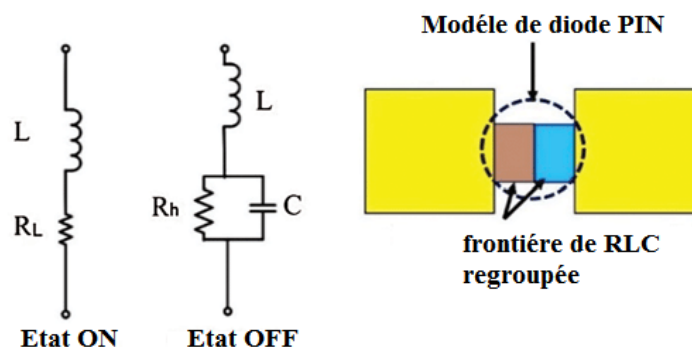


Figure II. 17: Le circuit équivalent de la diode PIN pour les cas ON-OFF [88].

De plus, les diodes PIN présentent plusieurs avantages par rapport à d'autres mécanismes de commutation, notamment un coût inférieur, un temps de commutation plus court et une tension d'alimentation plus élevée [87].

L'étude présentée dans [89] propose une antenne patch reconfigurable montrée dans la figure II. 18, conçue pour fonctionner à plusieurs fréquences grâce à l'intégration de deux diodes PIN. Cette antenne peut être reconfigurée pour opérer à 2,88 GHz, 5,5 GHz, 10,8 GHz et 11,1 GHz.

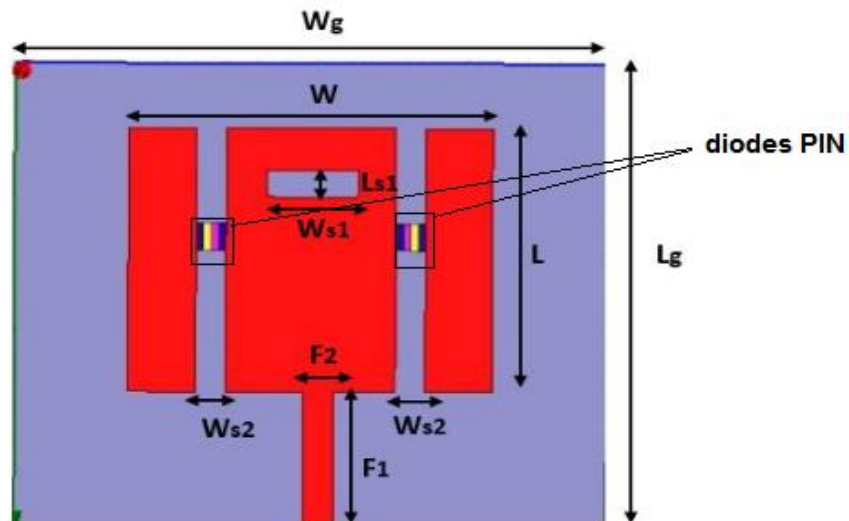


Figure II.18: Géométrie de l'antenne reconfigurable avec diodes PIN [89].

Jabber et Thaher [90] ont présenté une antenne à fréquence reconfigurable utilisant une diode PIN. Une triple bande a été proposée pour fonctionner dans des applications de radio cognitive. Tripathi et Tiwari [91] ont exploité une antenne patch micro-ruban reconfigurable avec une diode PIN (voir la Figure II. 19), adaptée à plusieurs bandes de fréquences pour des applications Bluetooth, WLAN, LTE, WiMAX, S-DMB et en bande X, l'antenne offre différentes fréquences de résonance selon l'état de la diode (ON ou OFF).

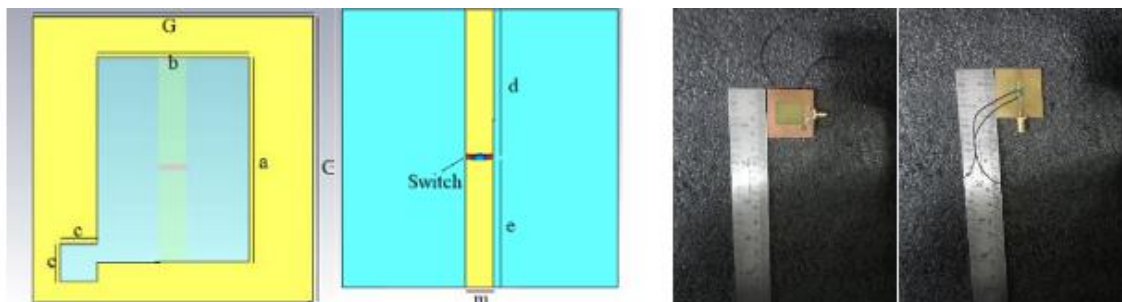


Figure II.19: Conception et fabrication d'antenne reconfiguré avec une diode PIN [91].

Dans [92], une antenne reconfigurable à quadruple polarisation est présentée avec un schéma d'alimentation compact et commutable capable de générer des ondes en polarisation linéaire (LP) et circulaire (CP). L'antenne peut commuter entre les états LP à -45° et à $+45^\circ$, LHCP et RHCP en variant les tensions de polarisation des diodes PIN.

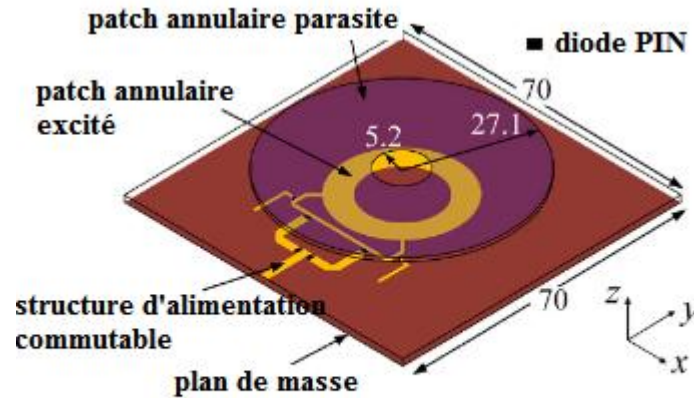


Figure II.20: Géométrie de l'antenne reconfigurable en polarisation avec diodes PIN [92].

- RF-MEMS** : Les commutateurs MEMS (Systèmes MicroElectroMécaniques) utilisent des structures mécaniques microscopiques, comme des leviers ou des membranes, pour établir ou interrompre des connexions pour les signaux RF. Ils se distinguent par une faible perte d'insertion, une excellente isolation des ports, une linéarité élevée et une faible consommation énergétique. Leur miniaturisation croissante en fait une solution idéale pour les dispositifs IoT (Internet of Things) et les applications où l'espace est limité. Cependant, ils présentent des défis, tels que des variations dans la répétabilité entre les lots de fabrication et des vitesses de commutation plus lentes que celles des solutions semi-conductrices [93]. Deng, Z., Wang, Y., et Lai, C, dans [94], mettent en avant une antenne patch compacte et fine intégrant des commutateurs RF MEMS pour reconfigurer son diagramme de rayonnement, générant trois angles de rayonnement distincts (-8° , 0° et $+8^\circ$) à 35 GHz. Cette conception démontre l'efficacité des MEMS RF dans les antennes reconfigurables pour les applications à haute fréquence.

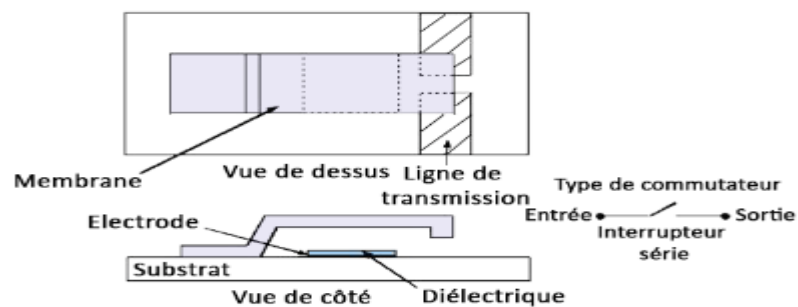


Figure II.21: Schéma structurel d'un interrupteur RF MEMS [83].

- **Diodes Varicaps :** Les diodes varactors, ou varicap, sont des semi-conducteurs caractérisés par une capacité dépendante de la tension appliquée. Cette propriété permet un réglage continu de leur capacité en modifiant la tension de polarisation, ce qui influence directement la fréquence de résonance de l'antenne et permet son fonctionnement sur différentes fréquences. L'équivalent du circuit d'un varactor est montré dans la figure ci-dessous ; la capacité typique C_J varie généralement entre quelques dizaines et plusieurs centaines de picofarads, L_f est l'inductance parasite et les résistances (R_R et R_G) introduisent des pertes dans le circuit, diminuant le facteur de qualité et donc l'efficacité de la diode varicap. [86].

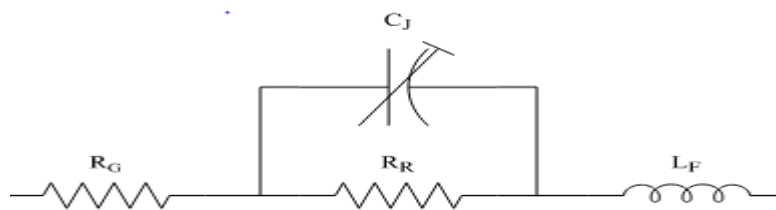


Figure II.22: Circuit équivalent de la diode Varicap [86].

Bien qu'elles soient largement utilisées dans les dispositifs d'accord et les antennes reconfigurables, les diodes varactors présentent certaines limitations. Elles nécessitent des tensions de polarisation élevées, pouvant atteindre 20 V, et ont une capacité limitée de gestion de puissance, ce qui peut restreindre leur utilisation dans certains dispositifs, notamment les antennes de réception [95].

II.7.4.2 Commutateurs optiques

Les commutateurs optiques, notamment les photoconducteurs, sont prisés dans les antennes reconfigurables pour leur fonctionnement sans éléments métalliques ni circuits de polarisation, simplifiant ainsi la conception et préservant les diagrammes de rayonnement. En utilisant du silicium dopé, qui devient conducteur sous l'effet de la lumière laser, ces dispositifs offrent un faible temps de réponse et permettent un réglage optique précis, bien que leur coût reste élevé. L'intégration de fibres optiques et de diodes laser améliore la conductivité RF du silicium, réduisant l'impédance et ajustant la fréquence de résonance des antennes [96] [83]. Une antenne optiquement reconfigurable pour les applications 5G à ondes millimétriques est présentée dans [97]. Elle utilise une structure en réseau de guides d'ondes fendus avec des interrupteurs photoconducteurs, permettant de configurer et reconfigurer ses performances en modifiant leurs positions sur les fentes.

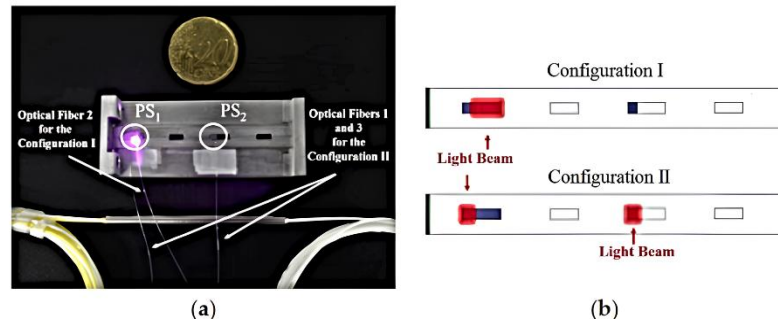


Figure II.23 : (a) Configuration de mesure du prototype fabriqué (b) différentes configurations [97].

II.7.4.3 Modification mécanique

Une technique moins couramment utilisée dans la conception des antennes reconfigurables repose sur la modification mécanique de leur structure. Ce type de reconfiguration, basé sur un changement physique, offre des avantages tels qu'une gestion de puissance élevée, des pertes réduites et un réglage continu. En déformant ou en déplaçant la structure de l'antenne, il devient possible d'ajuster le diagramme de rayonnement, la polarisation ou la fréquence de fonctionnement. Contrairement aux techniques impliquant des interrupteurs électriques ou optiques, ces approches ne nécessitent ni circuits de polarisation complexes ni environnements optiques spécifiques [96]. Les principales méthodes incluent le pliage, la rotation ou le déplacement contrôlé de certaines parties de l'antenne, comme mentionné dans [98-100]. Voici un exemple de reconfiguration d'antenne par changement physique [101].

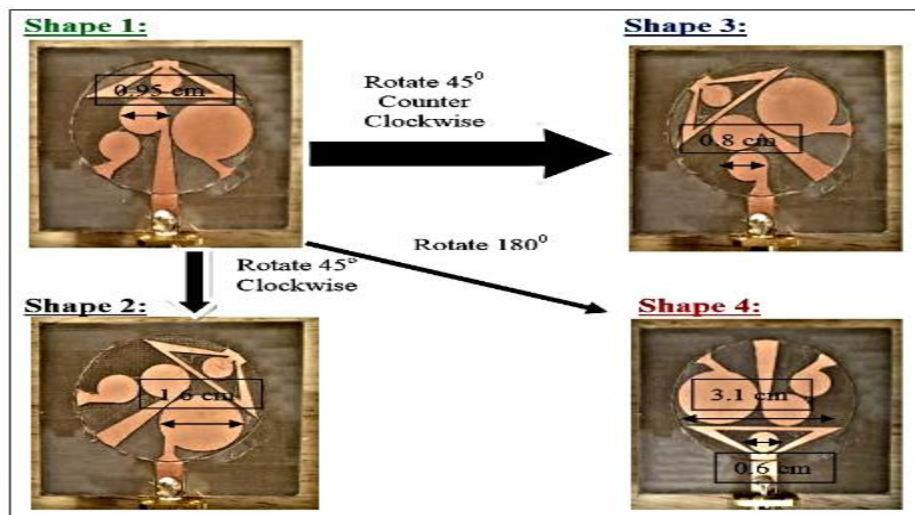


Figure II.24 : Les différents configurations mécaniques (rotations) de l'antenne reconfigurable [101].

II.7.4.4 Matériaux agiles

Une approche plus novatrice pour obtenir la reconfigurabilité repose sur l'utilisation de matériaux intelligents dont les propriétés électromagnétiques (telles que la permittivité et/ou la perméabilité) peuvent être ajustées. Ces dernières années, de nombreuses recherches ont exploré l'intégration de ces matériaux pour concevoir des antennes reconfigurables, en mettant particulièrement l'accent sur les cristaux liquides et le Graphene.

- **Cristaux liquides :** Un cristal liquide (LC) est un matériau non linéaire dont la constante diélectrique peut être modifiée en appliquant différents niveaux de tension, ce qui agit sur l'orientation des molécules du cristal liquide [102]. Dans [103], les LC sont intégrés comme substrat d'une ligne micro ruban. Un changement de permittivité des LC induit une différence de phase, permettant de reconfigurer le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes.

- **Graphene :** est un matériau innovant bidimensionnel composé d'atomes de carbone disposés en structure hexagonale, offre une ajustabilité exceptionnelle sur une large gamme de fréquences, des micro-ondes aux fréquences térahertz. Grâce à des techniques de contrôle électrique et thermique, il se distingue comme une solution idéale pour concevoir des antennes reconfigurables et des dispositifs térahertz [104]. Ces antennes, exploitant les propriétés uniques du Graphene, combinent miniaturisation extrême avec des dimensions réduites à l'échelle du micron et performances élevées en termes de gain et de bande passante. Cette avancée technologique ouvre la voie à de nouvelles applications, notamment dans les bandes d'infrarouge lointain et au-delà [105]. Une antenne térahertz reconfigurable en fréquence et faisceau, basée sur le Graphene, atteint une plage de 0,1-2 THz et une efficacité maximale de 85 % grâce à l'ajustement des potentiels chimiques, offrant des performances prometteuses pour les communications térahertz [106].

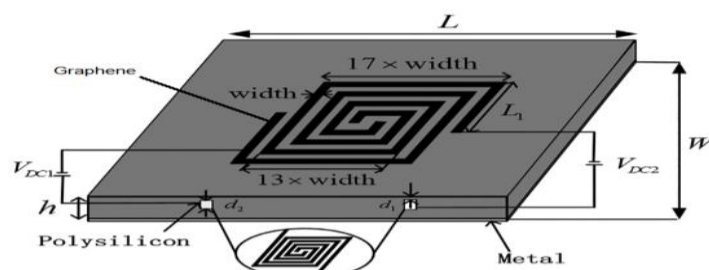


Figure II.25 : Structure de l'antenne en spirale carrée à base de Graphene [106].

II.7.5 Comparaison entre les différentes techniques

Une comparaison approfondie de ces approches est essentielle pour identifier la solution la mieux adaptée à nos applications, en tenant compte des performances requises et des contraintes de conception. Le tableau ci-dessous résume ces comparaisons [93] [107].

Technique de reconfiguration	Avantages	Limitations
Electrique	-Implémentation facile. -faible coût.	-Nécessite des systèmes de polarisation.
Optique	- Pas besoin de lignes de polarisation. - Pas de distorsion d'intermodulation.	-Cout potentiellement élevé. -Mécanisme d'activation complexe.
Mécanique	- Pas besoin d'éléments actifs. - Pas besoin de systèmes de polarisation.	- Réponse lente. - Nécessite une source d'alimentation.
Matériaux agiles	-Poids faible. -Ecologique et adapté à la miniaturisation.	- Energie faible. -Applications limité.

Tableau II.3: Comparaison entre les différentes techniques de reconfigurabilité.

Dans la suite de notre thèse, nous avons opté de travailler sur des techniques de reconfiguration jugées optimales et utiles pour des applications ciblées comme l'utilisation des diodes Varicap et PIN, et du Graphene pour tirer parti de leurs avantages respectifs.

Alors que la majorité des recherches se sont concentrées sur l'utilisation du Graphene dans les bandes térahertz, nous avons choisi de relever le défi d'explorer son potentiel dans les gigahertz. Ce choix ambitieux vise à adapter les propriétés uniques du Graphene à des fréquences plus basses, en surmontant des défis techniques liés à sa conductivité, afin d'élargir ses applications aux communications satellites et aux réseaux radio cognitifs.

L'association des diodes PIN et du Graphene représente ainsi une approche innovante et stratégique pour répondre aux exigences croissantes en matière d'antennes reconfigurables performantes.

II.7.6 Contribution des antennes reconfigurables à la radio cognitive

La radio cognitive (RC), la radio logicielle restreinte (SDR) et les antennes reconfigurables en collaboration peuvent garantir des communications sans fil adaptables et

performantes. La RC exploite dynamiquement les opportunités spectrales, nécessitant des équipements capables de fonctionner sur différentes fréquences. Grâce à la SDR, le système bénéficie d'un contrôle logiciel pour ajuster des paramètres tels que la modulation et la fréquence. Les antennes reconfigurables, quant à elles, adaptent leurs propriétés en temps réel pour répondre aux exigences changeantes, optimisant ainsi l'efficacité spectrale.

Les spécifications des antennes dépendent fortement de l'architecture du système RC, comme décrit au premier chapitre. Comme l'illustre la figure 26, le système RC s'appuie sur une antenne de détection pour identifier les portions inutilisées du spectre, puis sur une antenne reconfigurable pour établir une communication optimale en attribuant le canal approprié [96]. Par conséquent, il est essentiel que l'antenne de détection puisse couvrir une large gamme de fréquences. Toutefois, lors de l'opération en bande ultra-large (UWB), des interférences peuvent survenir, réduisant les performances globales.

Pour pallier ces défis, une antenne unique intégrant des caractéristiques de reconfigurabilité est proposée, afin de simplifier l'architecture en basculant entre le mode de détection ULB (Ultra Large Bande) et le mode de communication reconfigurable. Une telle intégration permet de réduire les pertes de trajectoire et de garantir une communication efficace tout en répondant aux contraintes spectrales dynamiques [102] [108].

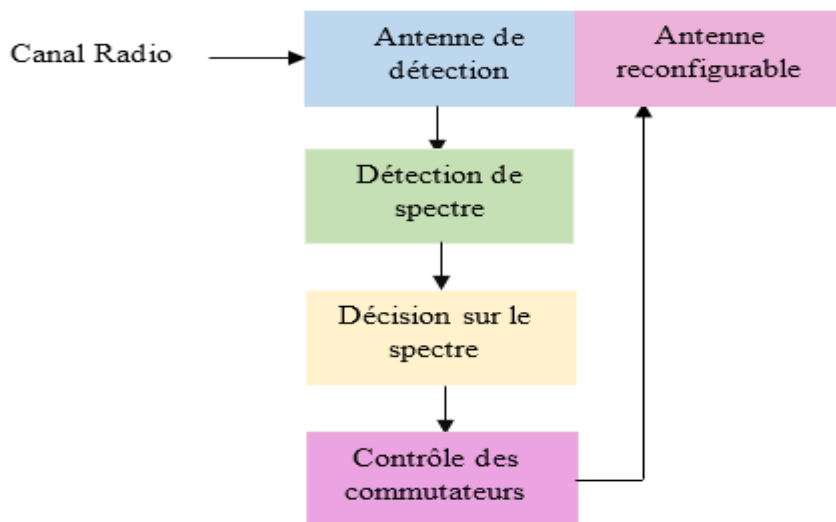


Figure II.26 : Organigramme de la radio cognitive [96].

II.7.7 Intégration des antennes reconfigurables dans les systèmes satellitaires

Les antennes reconfigurables sont devenues essentielles dans les systèmes de communication et de radar, notamment grâce à leur faible coût et leur capacité à s'intégrer

facilement avec des dispositifs de commutation et des circuits de contrôle. Elles simplifient considérablement les systèmes satellitaires en remplissant plusieurs fonctions avec une seule antenne, ce qui réduit le poids et améliore l'efficacité [109].

Adaptables en temps réel, elles peuvent ajuster leur faisceau ou leur fréquence pour éviter les interférences ou cibler des zones spécifiques. Elles optimisent également l'utilisation de la bande passante en accédant à différentes fréquences selon les besoins, une solution idéale face à la saturation spectrale actuelle.

Leur flexibilité leur permet de s'adapter à de nombreuses applications [110] :

- Dans les télécommunications : elles offrent une connectivité multi-bandes avec une couverture optimisée ; en observation de la Terre, elles répondent aux exigences des capteurs radar et multi spectraux.
- Dans les systèmes de navigation : elles améliorent la qualité des signaux, même dans des environnements difficiles.
- Et pour les radars satellitaires : elles permettent de suivre des cibles avec une grande précision.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques fondamentales des antennes, en mettant particulièrement l'accent sur les antennes patch et les réseaux d'antennes, qui sont des éléments clés dans les systèmes de communication modernes. Nous avons également exploré les antennes reconfigurables, en détaillant les différentes reconfigurations possibles et les techniques utilisées pour les réaliser.

Comme mentionné précédemment, nous allons affiner nos recherches sur des antennes micro ruban en raison de leur simplicité de fabrication, de leur faible coût et de leur facilité d'intégration dans les circuits RF. Pour améliorer leurs performances, nous envisagerons l'ajout de réseaux d'antennes afin d'augmenter le gain. De plus, nous allons opter pour l'utilisation des diodes Varicap et PIN, ainsi que du Graphene, afin de tirer parti de leurs avantages respectifs.

Le chapitre suivant sera dédié à la simulation des antennes reconfigurables, où nous appliquerons les concepts théoriques abordés pour concevoir des modèles, puis validerons leurs performances à travers des simulations et des comparaisons avec des résultats expérimentaux. Cette étape nous permettra de confirmer l'efficacité des solutions proposées et d'optimiser les performances des antennes pour les applications ciblées.

Chapitre III

Optimisation des Antennes Reconfigurables : Approches Matérielles et Technologiques

Table des matières

III.1	Introduction	59
III.2	Le choix de l’outil de simulation	59
III.3	La reconfigurabilité agile à l’aide de Graphène	60
III.3.1	Conception d’antenne.....	60
III.3.2	Nouveau design de l’antenne patch en Graphène	62
III.3.3	Etude de la variation du potentiel chimique du Graphène	67
III.3.4	Comparaison avec des travaux récents.....	69
III.4	La reconfigurabilité électrique à l’aide de diodes varicaps	69
III.4.1	Conception de l’antenne avant la reconfigurabilité.....	70
III.4.2	Intégrations de diodes varicaps	73
III.4.3	Réseaux d’antennes reconfigurables	76
III.5	La reconfigurabilité hybride à l’aide du Graphène et des diodes PIN	84
III.5.1	Conception de l’antenne.....	84
III.5.2	Reconfigurabilité par le Graphène	85
III.5.3	Reconfigurabilité par l’utilisation de diodes PIN.....	87
III.5.4	Reconfigurabilité en utilisant une diode PIN et du Graphène.....	88
III.6	Conclusion	89

III.1 Introduction

La recherche et le développement d'antennes reconfigurables sont au cœur de l'innovation dans les communications satellitaires et les réseaux radio cognitifs. L'aptitude d'une antenne à modifier ses caractéristiques électromagnétiques, telles que la fréquence de fonctionnement, le diagramme de rayonnement ou encore la polarisation, permet d'optimiser les performances du système et d'adapter ses fonctionnalités aux exigences dynamiques des applications modernes. Dans ce contexte, la présente étude se concentre sur l'exploration de divers matériaux et techniques pour réaliser cette reconfigurabilité, avec une attention particulière portée à l'utilisation du Graphène et des composants électroniques tels que les diodes varicaps et PIN.

Ce chapitre vise à détailler les méthodologies adoptées pour concevoir et analyser des antennes reconfigurables en exploitant ces techniques. Nous débutons par une présentation de l'outil de simulation choisi, qui joue un rôle clé dans l'évaluation des performances des conceptions envisagées. Ensuite, nous abordons la reconfigurabilité par le Graphène, un matériau aux propriétés remarquables pour l'électronique avancée. La conception des antennes en Graphène, ainsi que l'étude de la variation du potentiel chimique du Graphène seront examinées en détail.

Par ailleurs, la reconfigurabilité électrique à l'aide de diodes varicaps est explorée. Nous examinons également les approches hybrides combinant le Graphène et les diodes PIN, offrant une synergie potentielle pour atteindre une reconfigurabilité plus étendue et efficace.

Ce chapitre s'achève par une comparaison des résultats obtenus avec les travaux récents dans le domaine, mettant en lumière les avancées réalisées et les perspectives d'amélioration.

III.2 Le choix de l'outil de simulation

Parmi les simulateurs électromagnétiques disponibles pour la conception de composants micro-ondes tels que les antennes imprimées et les filtres haute fréquence, on peut citer HFSS (High Frequency Simulation Software), ADS (Advanced Design System) Momentum, IE3D (Integral Equation Three-Dimensional), et CST MICROWAVE STUDIO (Computer Simulation Technology). Ce dernier, spécialisé dans la simulation 3D à haute fréquence, se distingue par l'utilisation de la technique des éléments finis (FIT) pour résoudre les équations de Maxwell. Un des principaux atouts de CST MICROWAVE STUDIO est sa capacité à traiter diverses structures homogènes, quelle que soit la technologie utilisée. Grâce à ses fonctionnalités avancées

et son interface intuitive, il permet une analyse détaillée et l'optimisation des performances des antennes imprimées [1]. C'est pour ces raisons que nous avons choisi CST MICROWAVE STUDIO comme outil de simulation dans notre étude, garantissant ainsi une modélisation précise et efficace des composants à haute fréquence.

III.3 La reconfigurabilité agile à l'aide de Graphène

La radio cognitive optimise l'utilisation du spectre radiofréquence en exploitant notamment les bandes sous-utilisées, telles que la bande UHF. Dans cette étude, notre intérêt se porte spécifiquement sur la bande X (8 à 12 GHz). Étant donné que la radio cognitive couvre une large gamme de fréquences, de 3 kHz à 100 GHz, et trouve des applications majeures dans les domaines militaire et satellitaire, l'intégration d'antennes reconfigurables apparaît comme une solution pertinente pour assurer une exploitation dynamique des fréquences. Cette approche s'inscrit en parfaite synergie avec la radio définie par logiciel (SDR). Dans cette section, en nous appuyant sur les travaux antérieurs [2][3][4], nous abordons un enjeu majeur : la comparaison entre une antenne reconfigurable à base de graphène et une antenne patch en cuivre opérant dans la bande X, dans le contexte des réseaux de radio cognitive [5].

Ces résultats sont publiés dans la revue internationale « Advances in Space Research » [6]

III.3.1 Conception d'antenne

La figure III.1 illustre la structure de base de l'antenne, tandis que le tableau III.1 énumère les paramètres associés. Cette antenne consiste en une antenne patch rectangulaire fonctionnant à une fréquence de résonance $f_r = 9$ GHz, et a été conçue et simulée à l'aide du logiciel CST Studio Suite. Elle est réalisée sur un substrat FR-4, dont la permittivité relative est $\epsilon_r = 4,3$ et l'épaisseur $h = 1,6$ mm.

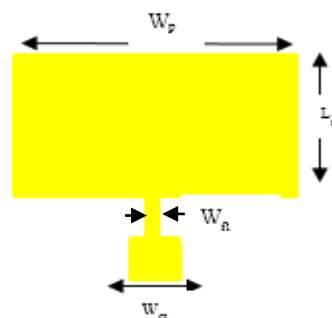


Figure III.1: Structure de l'antenne de base rectangulaire.

Les dimensions du patch (W_p, L_p) sont déterminées à partir des équations suivantes [7] :

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L \quad (III.1)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (III.2)$$

$$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{w}{h}+0.8\right)} \quad (III.3)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (III.4)$$

$$W_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r+1}} \quad (III.5)$$

Paramètres	Dimensions (mm)
Largeur de substrat (W_s)	19.83
Longueur de substrat (L_s)	16.93
Largeur de patch (W_p)	10.15
Longueur de patch (L_p)	7.33
Largeur d'alimentation (W_{f1})	0.56
Largeur d'alimentation (W_{f2})	3.03

Tableau III.1: Dimensions de l'antenne de base.

La Figure III.2 illustre le paramètre S_{11} de l'antenne étudiée, exprimé en (dB) de 7 à 12 GHz.

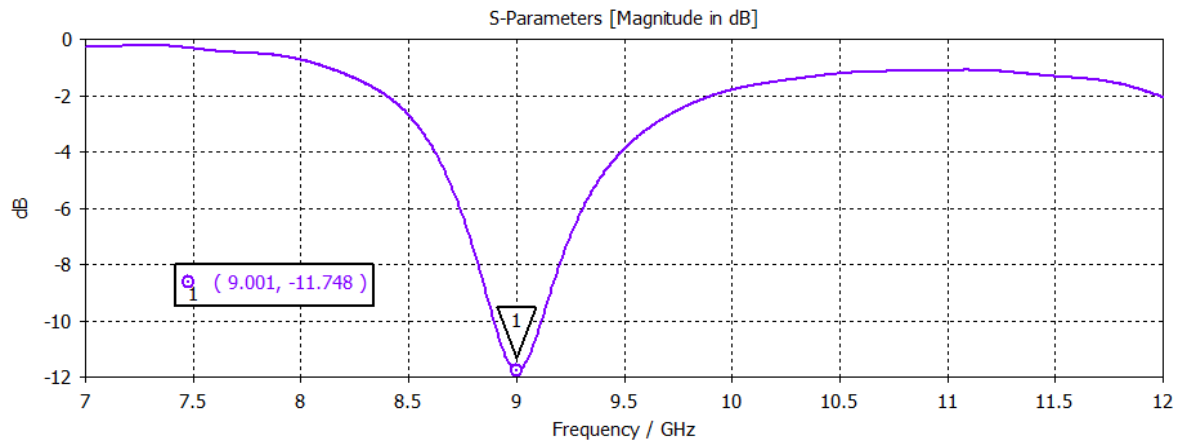


Figure III.2: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire.

Comme indiqué dans la figure III.2, l'antenne présente une fréquence de résonance à 9 GHz avec une perte de retour de -11,748 dB. Cependant, cette valeur indique une correspondance relativement acceptable entre l'antenne et la ligne de transmission.

III.3.2 Nouveau design de l'antenne patch en Graphène

A cette phase, nous présentons notre nouveau design d'antenne, dérivé de son prédécesseur (Figure III.1) par la suppression de deux coins et l'ajout de fentes au centre de l'antenne. Les dimensions de ces fentes ont été optimisées à l'aide du logiciel CST afin de réduire les réflexions des ondes électromagnétiques. À l'origine, le patch était en cuivre, mais il a été remplacé par du graphène pour permettre un décalage de fréquence via une technique de reconfigurabilité des matériaux, comme montré à la Figure III.3 (a et b).

Pour notre conception d'antenne en Graphène, nous avons utilisé un Graphène EPS (Expanded Polystyrene) avec une épaisseur de 10 nm, un potentiel chimique (μ_c) de 2 eV, un temps de relaxation (τ) de 0,1 ps et une température (T) de 300 Kelvin. Les résultats de la comparaison des simulations entre la nouvelle antenne en cuivre (Figure III.3.a) et l'antenne avec patch rayonnant en Graphène (Figure III.3.b) sont présentés respectivement dans les figures III.4, III.5 et III.6, en termes de S_{11} , de VSWR et de gain.

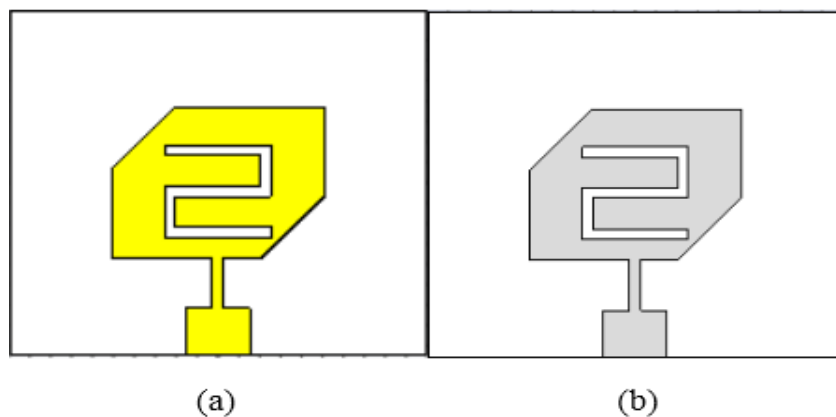


Figure III.3: Géométrie de la nouvelle antenne conçue avec (a) du cuivre et (b) du Graphène.

La comparaison présentée dans la Figure III.4 montre que la résonance de l'antenne à base de Graphène se déplace vers des fréquences plus élevées lorsqu'on utilise les mêmes dimensions que celles de l'antenne à patch en cuivre, ce qui montre que le Graphène peut servir la technologie de nanofabrication.

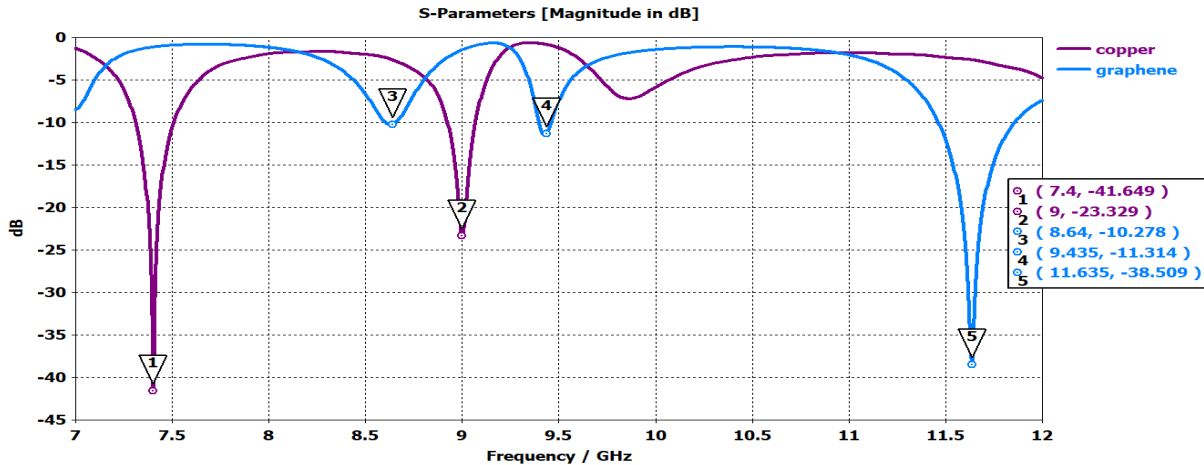


Figure III.4: Résultats de comparaison du S₁₁.

Lors de l'utilisation du cuivre comme matériau du patch, nous avons obtenu seulement deux fréquences de résonance (7,4 et 9 GHz) avec une excellente adaptation (respectivement -41,6 et -23,3 dB).

En remplaçant le cuivre par du Graphène, l'antenne a présenté trois fréquences de résonance, accompagnées de bonnes caractéristiques d'adaptation (-10,27, -11,34 et -38,5 dB) respectivement à la fréquence de 8,6 GHz utilisée pour les télécommunications, 9,4 GHz pour le radar et 11,6 GHz exploitée pour les réseaux VSAT (Very Small Aperture Terminal).

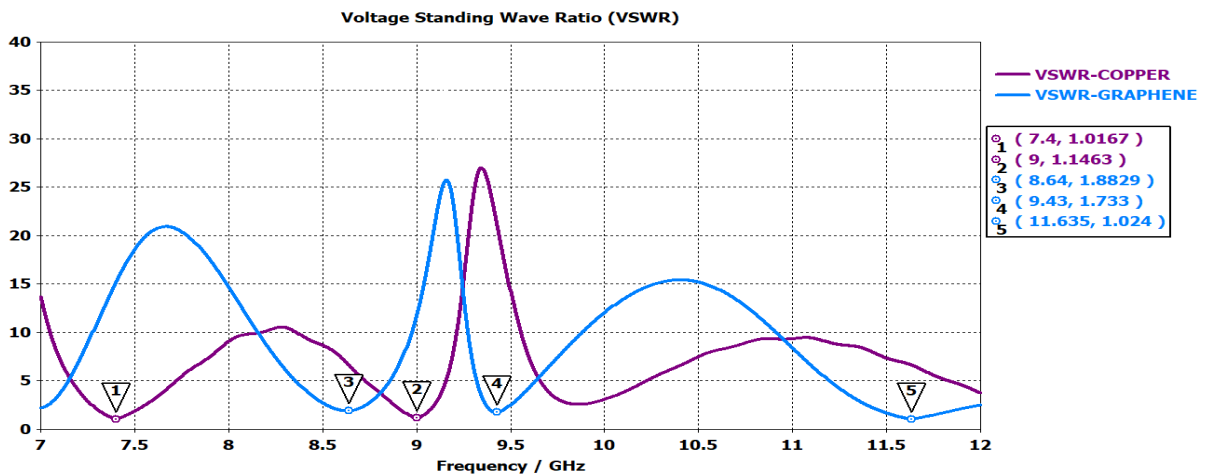


Figure III.5: Résultats de comparaison de VSWR.

La Figure III.5 illustre que toutes les fréquences de résonance des antennes en cuivre et en Graphène présentent un bon appariement d'impédance. Plus précisément, l'utilisation du cuivre a

donné des valeurs de VSWR de 1,01 à 7,4 GHz et de 1,14 à 9 GHz. En revanche, l'utilisation du Graphène a entraîné des valeurs de VSWR de 1,88 à 8,6 GHz, 1,73 à 9,4 GHz et 1,02 à 11,6 GHz.

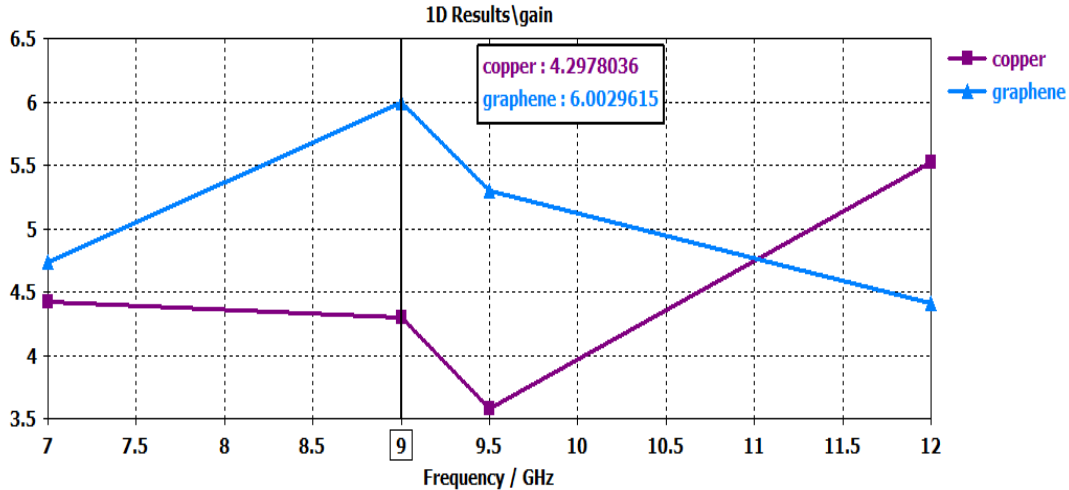


Figure III.6: Résultats de comparaison de Gain.

L'antenne patch en Graphène de la Figure III.6 présente un gain de 6 dBi à 9 GHz par rapport à l'antenne patch en cuivre, qui a un gain de 4,3 dBi. L'une des raisons de cette différence de gain réside dans la mobilité élevée des électrons du Graphène, qui favorise une meilleure transmission du signal. Le Graphène possède une mobilité des électrons très élevée par rapport à d'autres matériaux, ce qui signifie que les électrons peuvent y circuler rapidement et efficacement, entraînant une meilleure transmission du signal grâce aux propriétés intrinsèques du Graphène [8].

Un autre facteur contribuant au gain plus élevé de l'antenne patch en Graphène est sa faible résistance. Le Graphène présente une résistance extrêmement faible, ce qui réduit les pertes de signal dans l'antenne et permet à davantage de signal d'être rayonné [9]. Cela, à son tour, se traduit par un gain plus élevé et de meilleures performances de l'antenne.

Dans l'ensemble, la haute mobilité des électrons et la faible résistance du Graphène en font un matériau prometteur pour les applications d'antennes, en particulier à des fréquences élevées où les performances des antennes classiques à base de métaux peuvent être limitées [11].

La comparaison du diagramme de rayonnement polaire 2D entre l'antenne en cuivre et l'antenne en Graphène à 9 GHz est présentée dans la figure III.7.

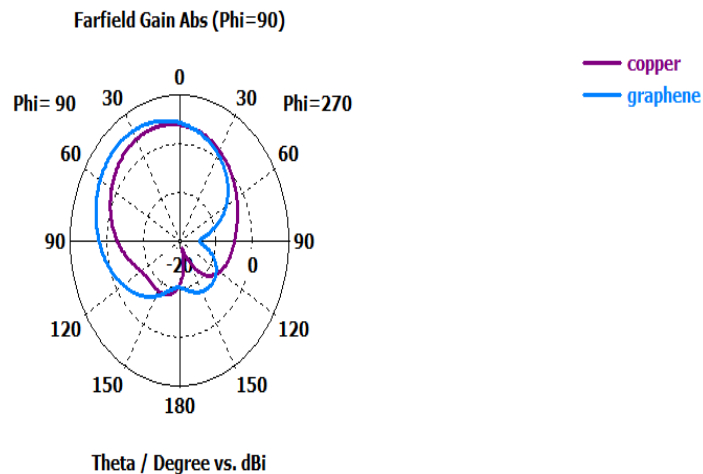


Figure III.7: Les diagrammes de rayonnement 2D des antennes patch en cuivre et en Graphène à 9 GHz.

D'après la Figure III.7, on peut constater qu'à la fréquence de résonance de 9 GHz, pour un angle de coupe de $\phi = 90^\circ$, l'amplitude du lobe principal est plus élevée pour l'antenne en Graphène (6 dBi) par rapport à l'antenne en cuivre (4,27 dBi). Cela indique que l'antenne en Graphène émet davantage de puissance dans la direction du lobe principal par rapport à celle en cuivre.

La direction du lobe principal diffère également pour les deux diagrammes, avec 35° pour le Graphène et 16° pour le cuivre. Cela indique que les antennes ont des orientations différentes, ce qui peut être important pour orienter correctement l'antenne vers la cible souhaitée.

Les deux diagrammes présentent une plage angulaire similaire pour la demi-puissance à -3 dB $94,7^\circ$ pour le premier diagramme (cuivre) et $94,8^\circ$ pour le second diagramme (Graphène).

Le niveau du lobe secondaire est plus bas pour le second diagramme, à -13,6 dB, contre -12,5 dB pour le premier diagramme.

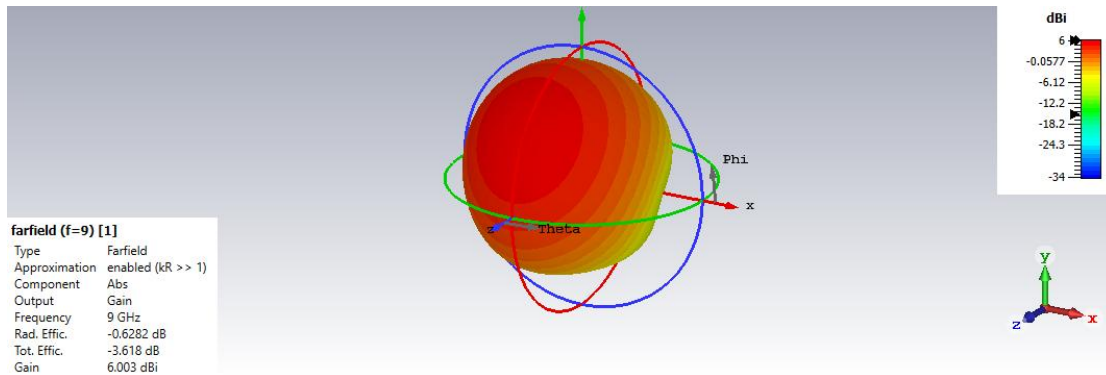


Figure III.8: Le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch en Graphène.

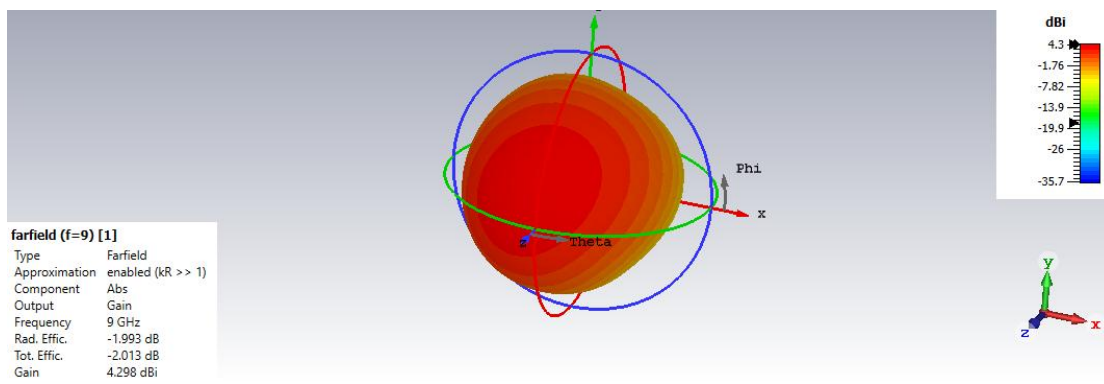


Figure III.9: Le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch en cuivre.

À 9 GHz, le diagramme de rayonnement de l'antenne patch en Graphène, comme le montre la figure 8, présente un gain de 6 dBi, avec une directivité maximale de 6,631 dB.

Le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch en cuivre est indiqué dans la figure III.9, avec des valeurs de gain. Cependant, par rapport à l'antenne en Graphène, le gain et la directivité sont inférieurs. La valeur du gain est de 4,298 dBi, et la directivité est de 6,291 dB.

La comparaison entre le cuivre et le Graphène a démontré que le Graphène offre des performances supérieures, notamment en termes de coefficient de réflexion, VSWR, gain et rayonnement. Ces résultats prometteurs justifient une étude approfondie des paramètres clés du Graphène, ce qui constituera l'objet de la prochaine section.

III.3.3 Etude de la variation du potentiel chimique du Graphène

Dans cette section, nous procéderons à une étude de variation du potentiel chimique du Graphène afin de mieux comprendre son impact sur la reconfigurabilité et l'efficacité des antennes, avec une plage variant de 0 à 4 eV.

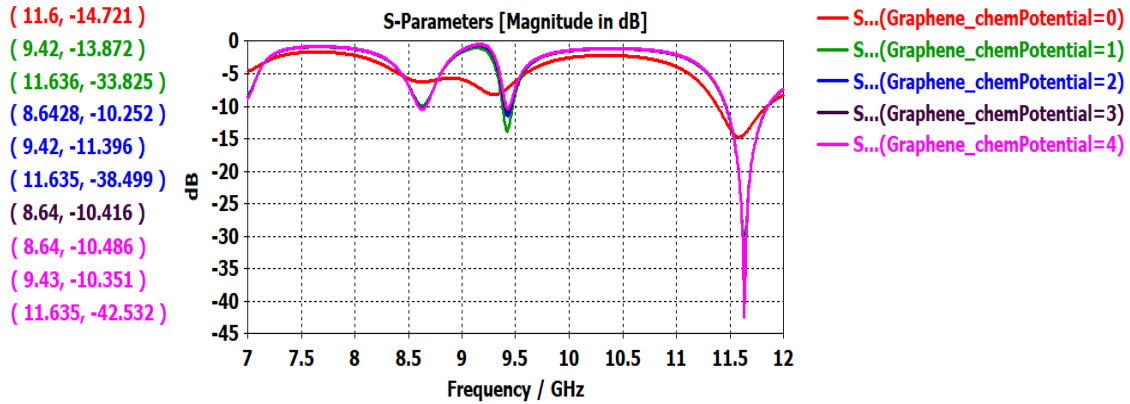


Figure III.10: Coefficient de réflexion pour différentes valeurs du potentiel chimique.

Dans la Figure III.10, nous pouvons observer la variation du S_{11} pour différentes valeurs du potentiel chimique. Il est évident qu'il y a un changement significatif à chaque augmentation du potentiel chimique sur toutes les fréquences de résonance.

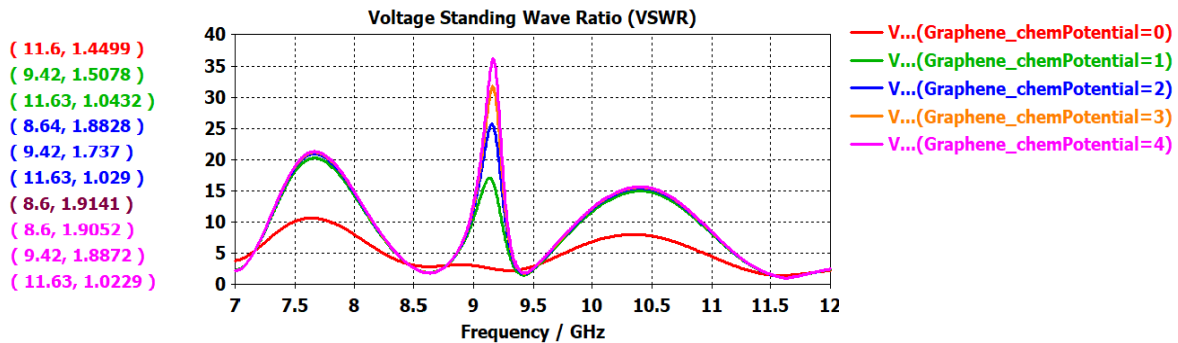


Figure III.11: VSWR pour différentes valeurs du potentiel chimique.

Potentiel chimique (eV)	Frequences (GHz)	VSWR
0	11.6	1.45
1	9.42;11.63	1.5;1.04
2	8.64; 9.42; 11.63	1.9;1.7;1.02
3	8.6;9.42;11.63	1.8;1.8;1.02
4	8.6;9.4;11.63	1.9;1.8;1.02

Tableau III.2: VSWR des différentes valeurs de potentiel chimique de l'antenne en Graphène.

D'après la Figure III.11 et le Tableau III.2, il est observé que, bien que les fréquences auxquelles les valeurs de VSWR sont mesurées restent constantes lorsque le potentiel chimique varie de 0 à 4 eV, les valeurs de VSWR changent légèrement. En particulier, lorsque le potentiel chimique augmente de 0 à 1 eV, la valeur de VSWR diminue de 1,45 à 1,04, indiquant une meilleure adaptation entre la ligne de transmission et la charge. Cependant, une augmentation supplémentaire du potentiel chimique à 2, 3 et 4 eV entraîne une légère hausse des valeurs de VSWR, reflétant une adaptation moins optimale.

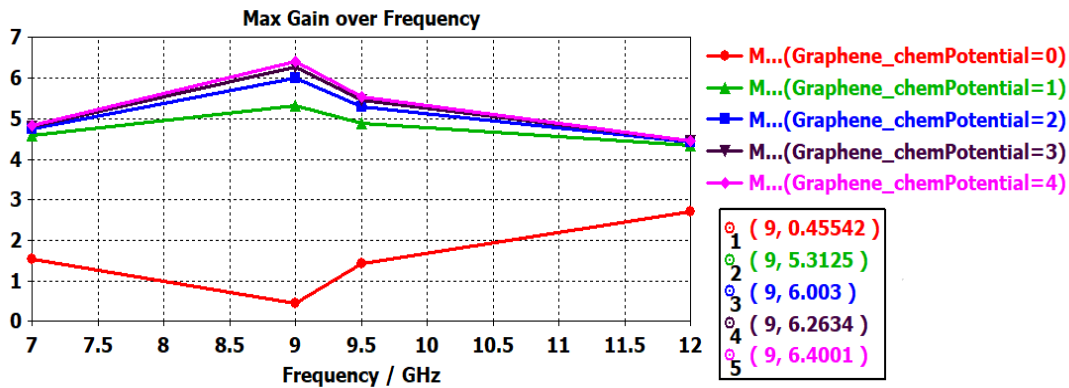


Figure III.12: Effets de la variation du potentiel chimique sur le gain.

Le Tableau III.3 montre comment le gain varie en fonction des différentes valeurs du potentiel chimique à la fréquence de résonance sélectionnée de 9 GHz.

Potentiel chimique (eV)	Gain (dBi)
0	0.45
1	5.31
2	6
3	6.26
4	6.4

Tableau III.3: Gain en fonction de variations de potentiel chimique.

Il ressort clairement de la Figure III.12 et du Tableau III.3 que la variation du potentiel chimique du Graphène augmente le gain, illustrant ainsi le concept de reconfigurabilité du gain.

La reconfigurabilité du gain fait référence à la capacité d'ajuster ou de modifier le gain d'un système ou d'un dispositif. Dans ce cas, il semble que le potentiel chimique du Graphène puisse être modifié pour augmenter le gain. Cela permettrait de reconfigurer le gain dans un système utilisant le Graphène, offrant ainsi une flexibilité accrue dans l'adaptation des performances de l'antenne en fonction des besoins spécifiques.

Ces résultats mettent en évidence les avantages des antennes à base de Graphène en termes de fréquence de résonance, de gain et de reconfigurabilité, faisant du Graphène un matériau prometteur pour les applications d'antenne et la radio cognitive, en particulier dans la bande X.

III.3.4 Comparaison avec des travaux récents

Le Tableau III.4 compare les caractéristiques de performance de l'antenne proposée à celles d'autres travaux précédents.

References	Type d'antennes	Fréquences (GHz)	Meilleur S_{11} (dB)	Max gain (dBi)
[11]	Antenne à fente.	9.8 and 16	-27	3.1
[12]	Rectangulaire	15	-30.82	2.39
[13]	Triangulaire	2 to 10	-25	5.4
[14]	Guide d'ondes coplanaire	2 to 10	-38	2.01
[15]	Antenne patch à fente alimentée par guide d'ondes coplanaire.	5.85 to 13.75	-38	5.6
Notre étude	Rectangulaire	8.6 to 11.6	-42	6.4

Tableau III.4: Comparaison de notre antenne avec des travaux récents.

Le Tableau III.4 présente des informations cruciales concernant les performances des antennes, en détaillant les types, les fréquences de fonctionnement, la réflexion minimale (S_{11}) et le gain maximal. Les études antérieures rapportent des mesures variées ; par exemple, [11] et [12] abordent les antennes en Graphène, tandis que [13], [14] et [15] introduisent des antennes reconfigurables utilisant une technique différente, impliquant des diodes PiN. Cependant, notre antenne reconfigurable en Graphène se distingue par une réflexion minimale impressionnante de -42 dB sur une plage de fréquences allant de 8,6 à 11,6 GHz, accompagnée d'un gain maximal remarquable de 6,4 dBi. Ces résultats mettent en évidence le potentiel exceptionnel de notre antenne à base de Graphène pour les applications satellitaires qui nécessitent une faible réflexion et un gain élevé.

III.4 La reconfigurabilité électrique à l'aide de diodes varicaps

L'objectif de cette étude est de présenter la conception et l'évaluation des performances d'une antenne satellitaire en bande X dotée de la reconfigurabilité en fréquence à l'aide de diodes varactor. L'antenne proposée résonne à 9,5 GHz et offre la capacité d'ajuster dynamiquement sa fréquence de résonance, lui permettant de fonctionner efficacement sur différents canaux de

communication au sein de la bande X. Le processus de conception implique une considération minutieuse de divers paramètres, notamment la géométrie de l'antenne, le choix des diodes varactor, l'adaptation d'impédance et les caractéristiques du diagramme de rayonnement. La conception de l'antenne doit garantir que la reconfigurabilité ne compromette pas d'autres paramètres de performance essentiels, tels que le gain, l'efficacité de rayonnement et la bande passante.

III.4.1 Conception de l'antenne avant la reconfigurabilité

L'antenne proposée est une antenne patch rectangulaire résonnant à 9,5 GHz, adaptée par une impédance d'entrée de 50Ω , avec un substrat FR-4 (LOSSY) de permittivité relative $\epsilon_r=4,3$ et d'une épaisseur de $h=1,6$ mm. Le plan de masse est composé du même matériau que le patch (cuivre) avec une épaisseur identique de $t=0,035$ mm. Des fentes ont été ajoutées de largeur $W_e=0,5$ mm, de longueur $L_e=1$ mm, avec un espacement de $a=0,5$ mm entre les fentes. Initialement, seulement deux fentes ont été insérées, mais aucune amélioration notable de l'adaptation n'a été constatée. Par la suite, nous avons inséré trois fentes, ce qui nous a permis d'obtenir un résultat satisfaisant. La conception et les dimensions de l'antenne sont illustrées à la Figure III.13 et dans le Tableau III.5.

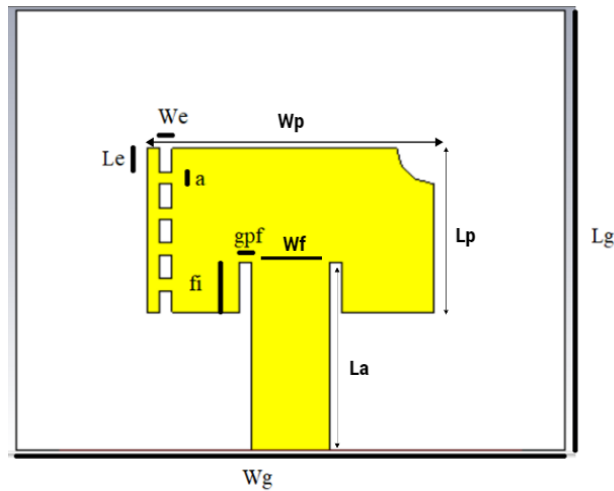


Figure III. 13: Géométrie de l'antenne.

Parametres	Dimensions (mm)
Largeur de patch (W_p)	11.27
Longueur de patch (L_p)	6.92
Hauteur de patch (t)	0.035
Largeur de substrat (W_g)	22
Longueur de substrat (L_g)	18.52
Hauteur de substrat (h)	1.6
Largeur de Gap (gpf)	0.5
Longueur de Gap (fi)	2.11
Longueur d'alimentation (L_a)	5.8
Largeur d'alimentation (W_f)	3.137
Largeur de fente (W_c)	0.5
Longueur de fente (L_c)	1
Espace entre les fentes (a)	0.5

Tableau III.5: Dimensions de l'antenne.

La Figure III.14 montre le coefficient de réflexion de l'antenne. Nous avons obtenu une bonne correspondance de fréquence à 9,5 GHz avec un S_{11} de -17,23 dB, indiquant une faible réflexion d'énergie et une bonne performance de l'antenne à cette fréquence.

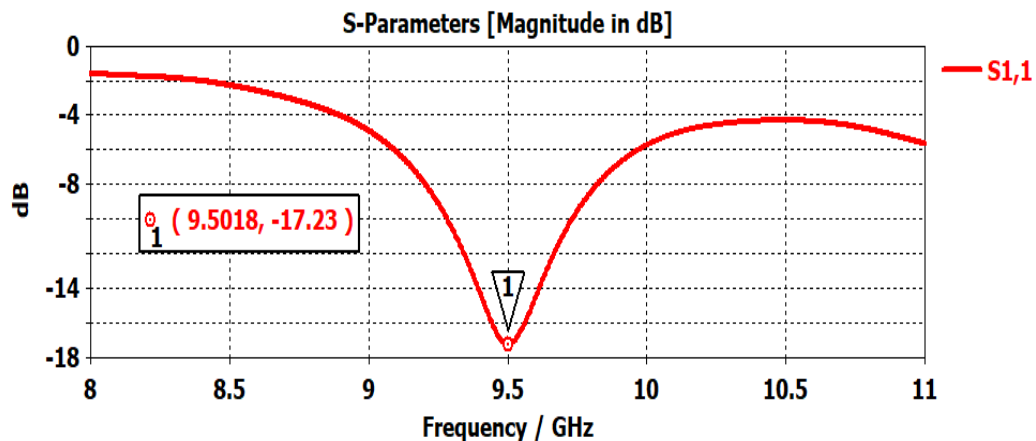


Figure III.14: Coefficient de réflexion de l'antenne (S_{11}).

Le rapport d'ondes stationnaires de tension (VSWR) est inférieur à 2 (1,61), indiquant une bonne adaptation. Un VSWR faible indique une bonne adaptation de l'antenne à la ligne de transmission, ce qui suggère un transfert de puissance efficace entre ces deux éléments.

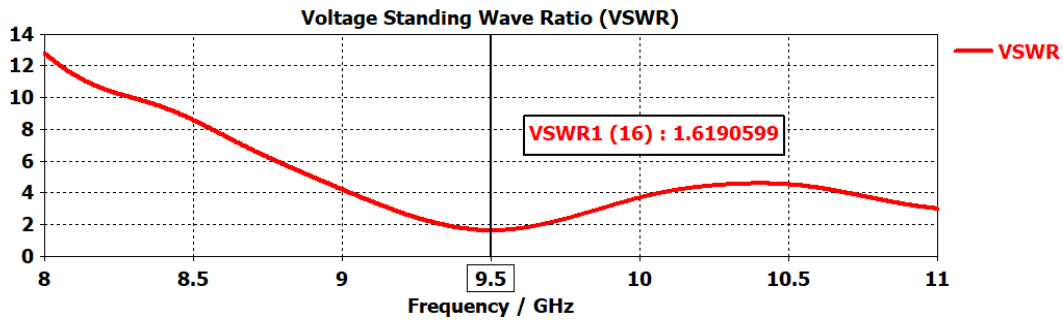


Figure III.15: VSWR de l'antenne.

Les Figures III.16 et III.17 présentent le diagramme de rayonnement de l'antenne à 9,5 GHz en 3D et en 2D, respectivement.

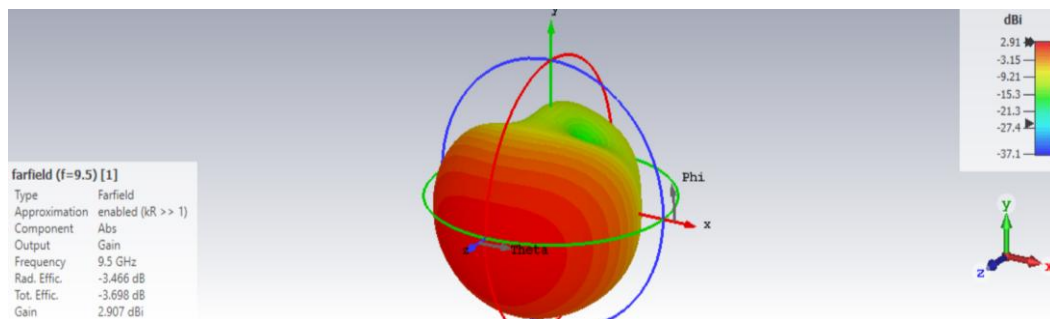


Figure III.16: Diagramme de rayonnement de l'antenne à 9.5 GHz en 3D.

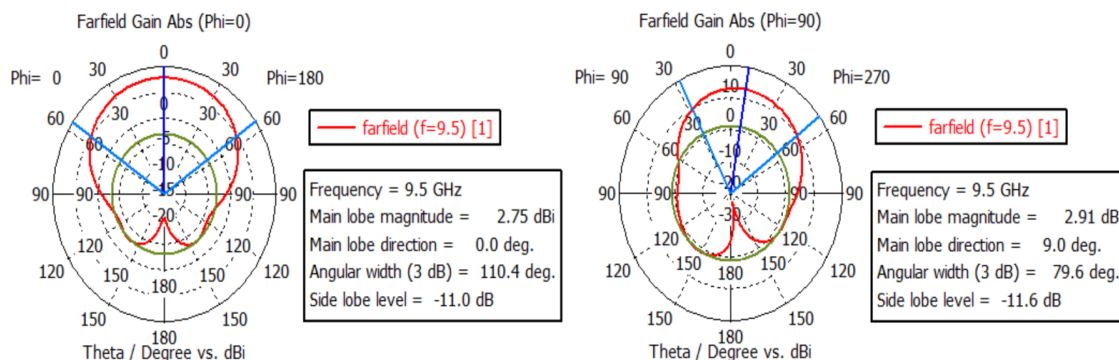


Figure III.17: Diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) d'antenne à 9.5 GHz en 2D.

Les représentations 3D et 2D de cette antenne montrent qu'à 9,5 GHz, le gain est de 2,9 dBi et que le diagramme de rayonnement est quasi-omnidirectionnel, avec une largeur de faisceau de 110,4 degrés à $\phi=0^\circ$ et de 79,6 degrés à $\phi=90^\circ$. Cela indique que l'antenne émet de l'énergie de manière relativement uniforme dans diverses directions autour de son axe, offrant une couverture quasi-omnidirectionnelle.

La Figure III.18 illustre le gain de l'antenne en fonction de la fréquence. On peut voir qu'à 9,5 GHz, un gain positif de 2,9 dBi a été obtenu, ce qui signifie qu'elle amplifie la puissance du signal dans une direction spécifique à cette fréquence.

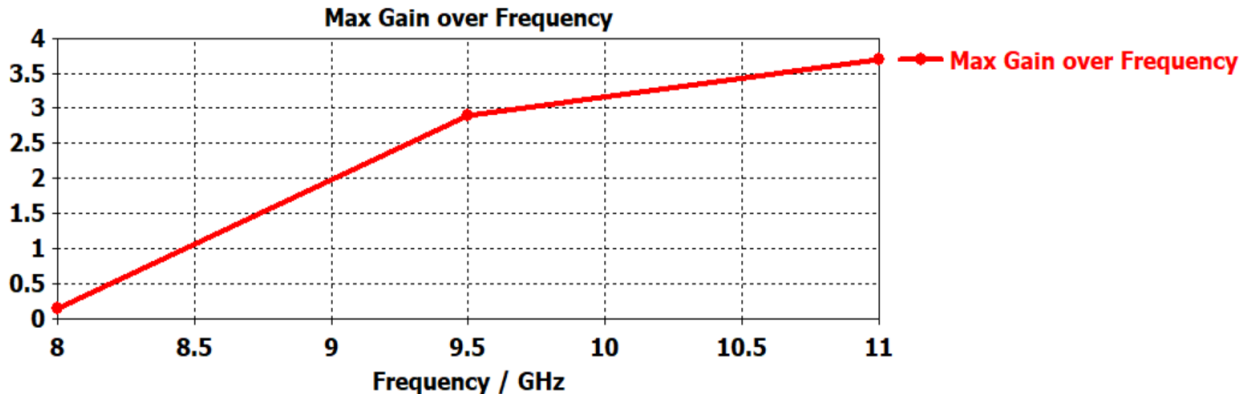


Figure III.18: Le gain à 9.5 GHz.

III.4.2 Intégrations de diodes varicaps

Dans cette section, nous étudions la reconfiguration fréquentielle de l'antenne en intégrant cinq diodes varicap identiques, dont la capacité varie entre 0,01 pF et 0,8 pF dans la bande X. Ces diodes possèdent une résistance de 0,07 Ω et une inductance de 0,2 nH. La Figure III.19 illustre leur position sur le patch.

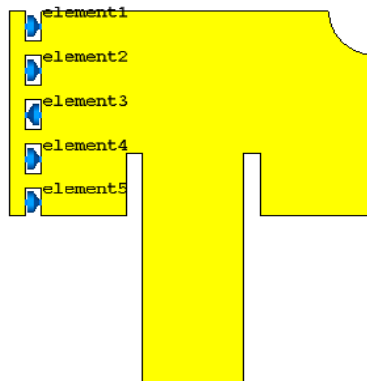


Figure III.19: Antenne rectangulaire avec les diodes Varicaps.

La Figure III.20 fournit une analyse du coefficient de réflexion obtenu pour la conception proposée sous différentes conditions de capacité des diodes. Des variations de la fréquence de résonance sont observées, aboutissant à des excellentes adaptations satisfaisantes.

Lorsque $C_v = 0,01$ pF, nous obtenons une adaptation acceptable à notre fréquence souhaitée (9,5 GHz) avec un S_{11} de -12,5 dB (voir Figure III.21). À l'inverse, lorsque $C_v = 0,222$ pF, nous

atteignons trois fréquences de résonance dans la bande X à 9,5 GHz, 10,65 GHz et 10,9 GHz avec des adaptations satisfaisantes de -12,5 dB, -20 dB et -30 dB respectivement (comme illustré dans la Figure III.22).

Tous ces résultats sont obtenus sans apporter de modification à la structure de l'antenne. Cela démontre que l'antenne possède l'avantage d'être reconfigurable en fréquence, permettant d'ajuster ses performances à différentes fréquences sans avoir besoin de modifier son design ou ses composants. La reconfigurabilité en fréquence offre une flexibilité et une adaptabilité précieuses, permettant à l'antenne de s'adapter à des conditions et des exigences de communication variées sans modifications significatives.

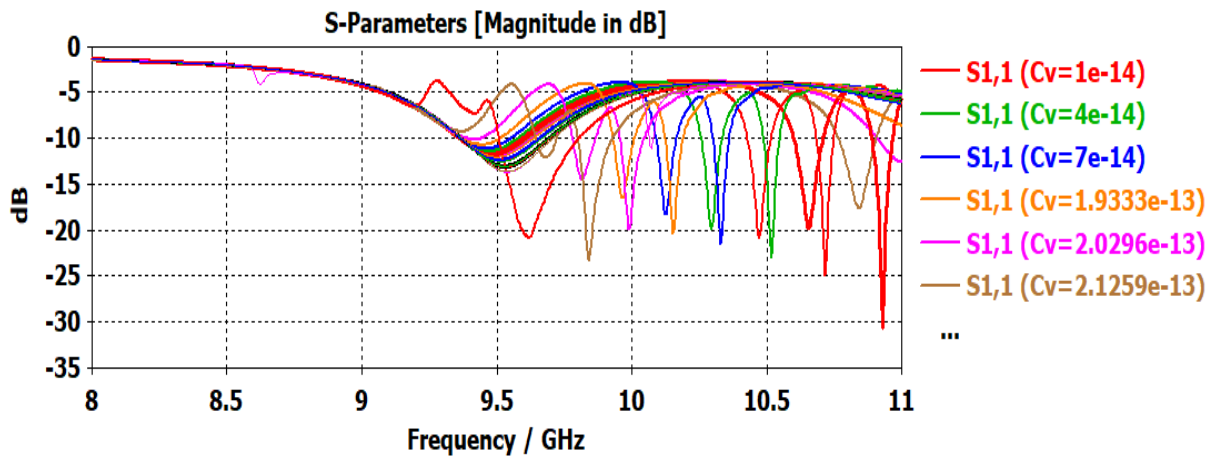


Figure III.20: S₁₁ pour les différentes valeurs de la capacité des diodes.

- Cv1=0.01 pF

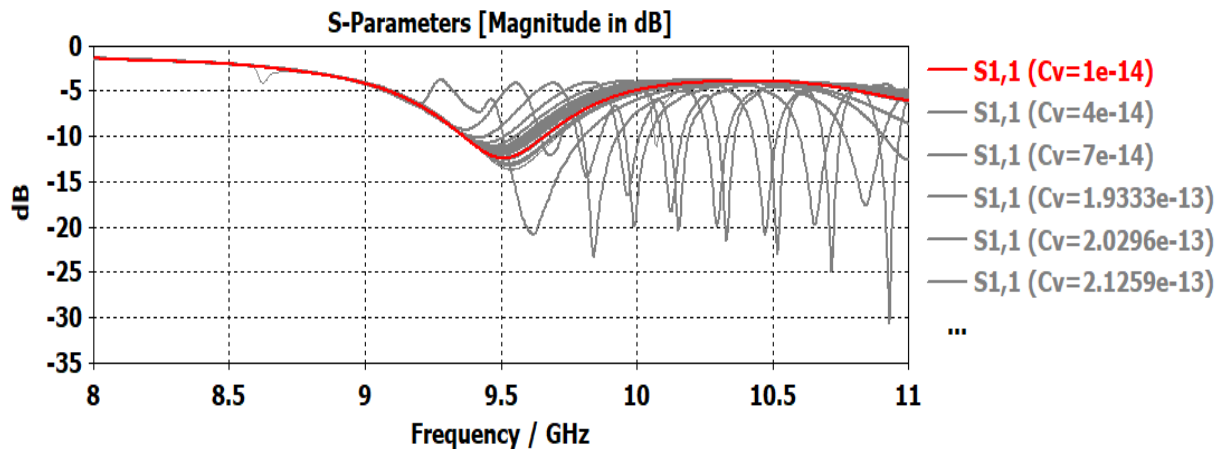


Figure III.21: S₁₁ pour Cv=0.01pF.

- $Cv2=0.22222 \text{ pF}$

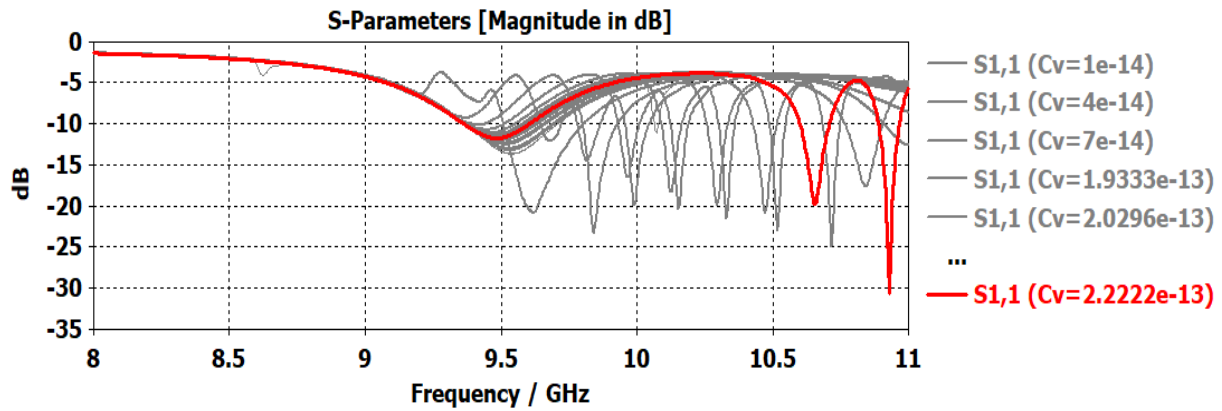


Figure III.22: S_{11} pour $Cv=0.22\text{pF}$.

La figure suivante illustre la variation du VSWR en fonction des changements de la capacité de la diode. Lorsque la capacité de la diode change, elle modifie les caractéristiques électriques du circuit. Par conséquent, le VSWR changera également. On peut observer qu'à chaque valeur de capacité, un VSWR inférieur à 2 indiquant une adaptation efficace entre l'antenne et la ligne de transmission, a été obtenu aux fréquences de résonance présentées précédemment, indiquant une adaptation efficace à ces fréquences.

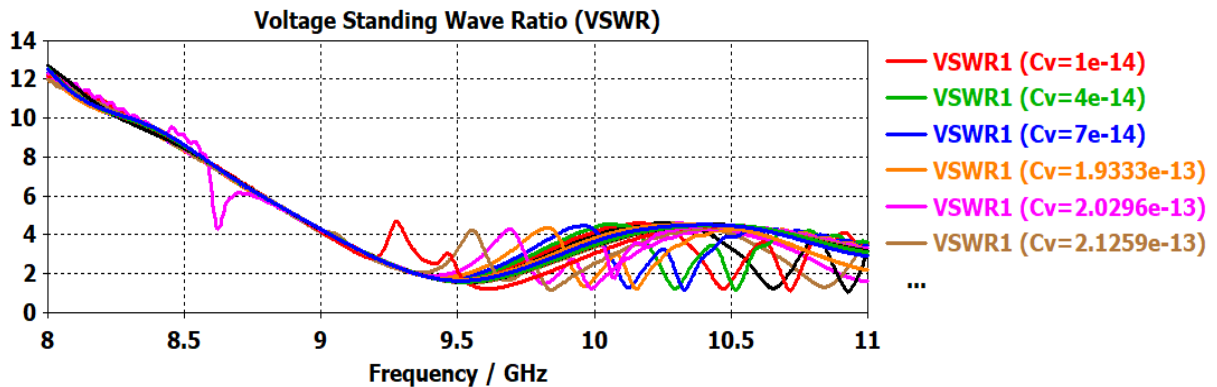


Figure III.23: La variation du VSWR de l'antenne reconfigurable pour différentes valeurs de la capacité.

Il est clair d'après la figure III.24 que la valeur du gain à la fréquence souhaitée de 9,5 GHz varie de 2,5 à 3,2 dBi pour chaque ajustement de la capacité de la diode (de 0,01 pF à 0,8 pF).

La variation de la capacité de la diode modifie la fréquence de résonance de l'antenne, ce qui peut affecter son impédance et, par conséquent, son efficacité à recevoir ou à transmettre des

signaux à différentes fréquences. Cela influence le gain de l'antenne, qui dépend de l'efficacité de l'antenne à capter ou à rayonner l'énergie du signal.

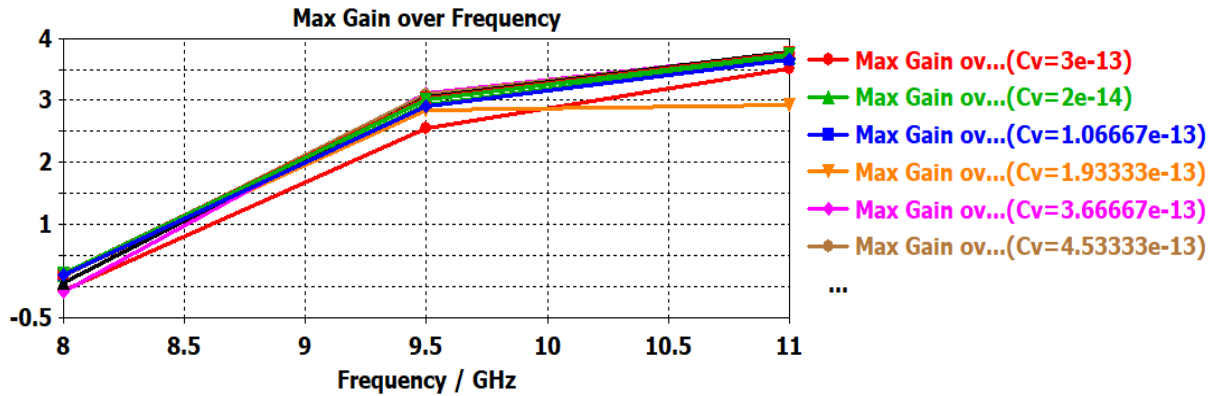


Figure III.24: La variation de gain de l'antenne reconfigurable pour différentes valeurs de la capacité.

Cette partie a été présentée lors de la conférence internationale ICAECCT'23 (International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies), qui a eu lieu à Mascara les 25 et 26 octobre 2023.

Ces résultats montrent que le gain est un peu faible par rapport notre application ; Cela nous a conduit à envisager une augmentation dans la prochaine partie par la conception des réseaux d'antennes.

III.4.3 Réseaux d'antennes reconfigurables

Pour la conception de nos réseaux d'antennes, nous utilisons les mêmes dimensions mentionnées précédemment.

a. Réseau d'antennes à deux éléments

La figure III.25 illustre la conception de réseau d'antennes à deux éléments en parallèle

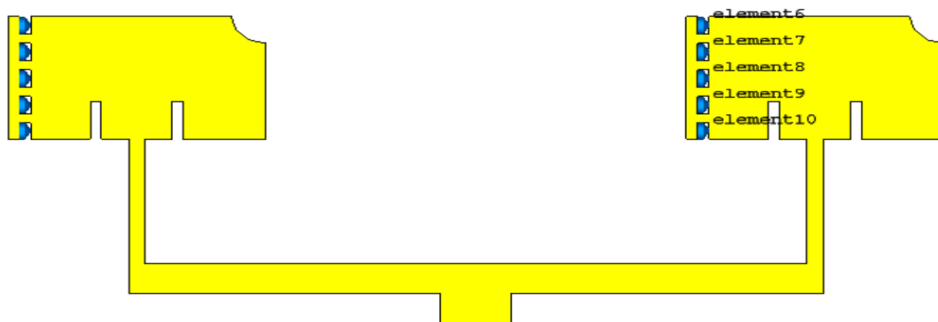


Figure III. 25: Structure de réseau de deux éléments en parallèle.

Les figures III.26, III.27, III.28, III.29 et III.30 présentent les résultats de simulation de réseau d'antennes à deux éléments en parallèle avant l'intégration des diodes varicaps.

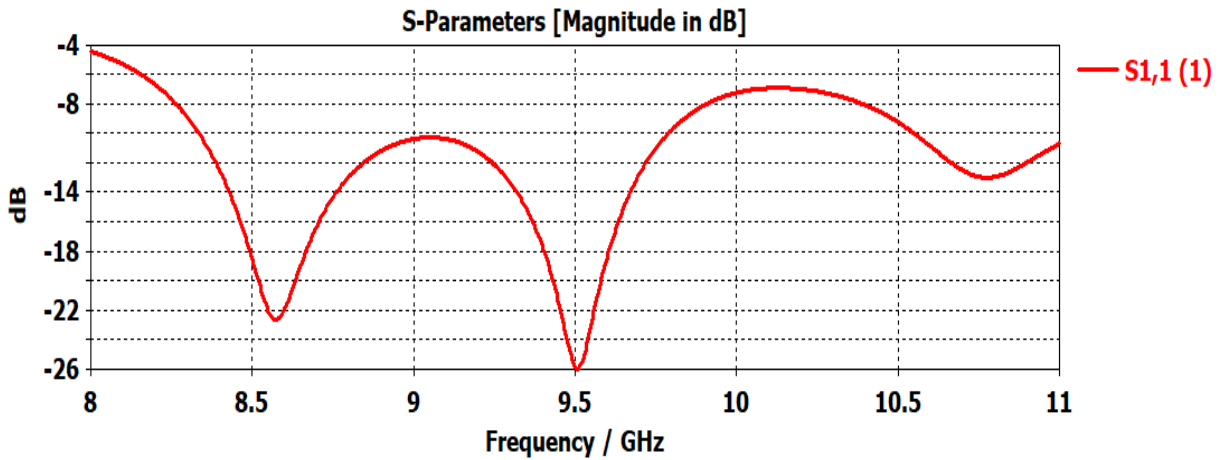


Figure III.26: Le coefficient de réflexion de réseau de deux éléments en parallèle.

La Figure III.26 montre le coefficient de réflexion S_{11} multi-bande, avec des valeurs de -25,84 dB à la fréquence de résonance de 9,5 GHz et de -22,55 dB à 8,6 GHz, ce qui constitue un résultat satisfaisant pour notre étude.

D'après la figure suivante, le VSWR est de 1,1, une valeur inférieure à 2, ce qui indique que l'antenne est bien adaptée à la fréquence de résonance de 9,5 GHz.

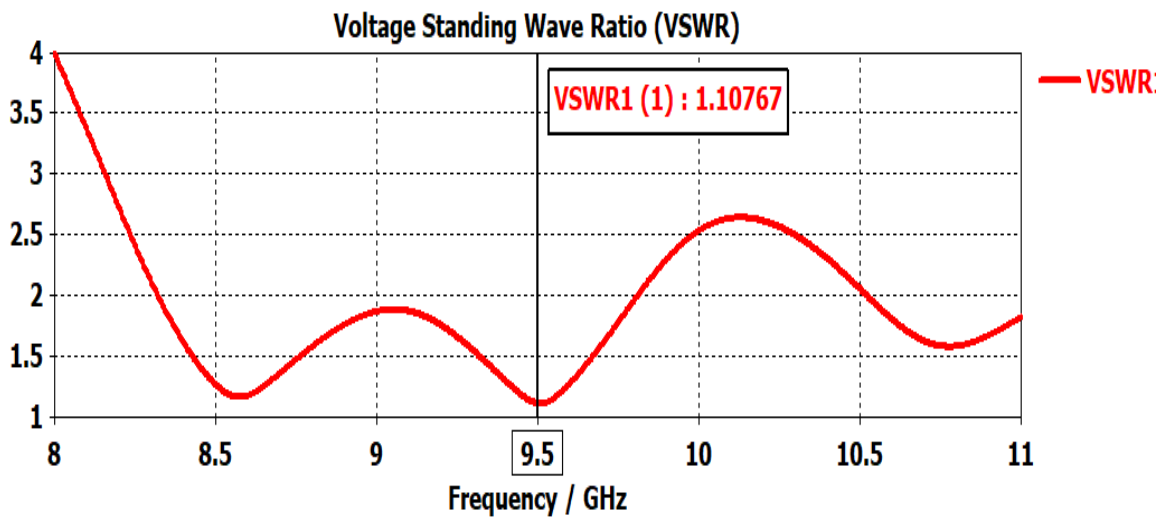


Figure III.27: VSWR de réseau de deux éléments en parallèle.

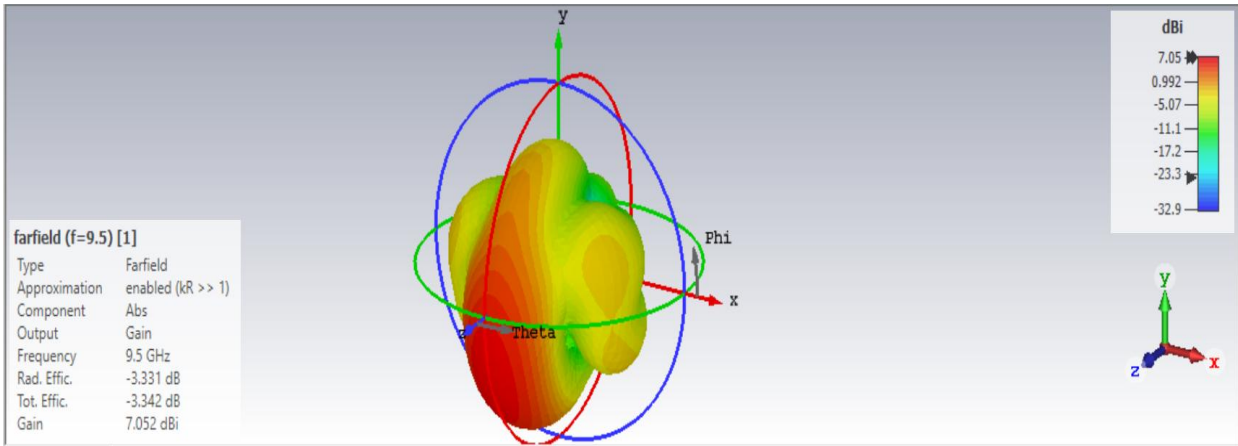


Figure III.28: Diagramme de rayonnement de réseau de deux éléments en parallèle 3D.

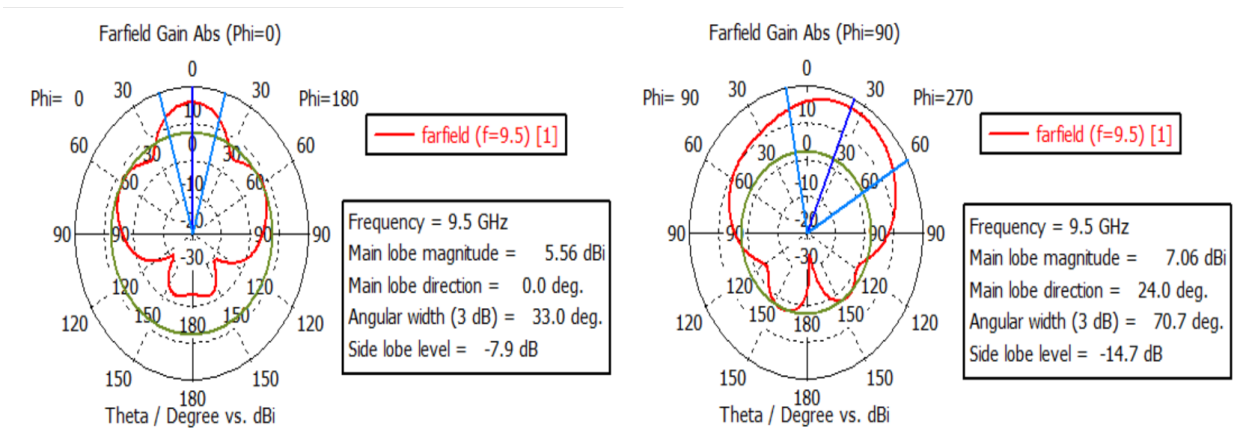


Figure III.29: Le diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) de réseau de deux éléments en parallèle à 9.5 GHz en 2D.

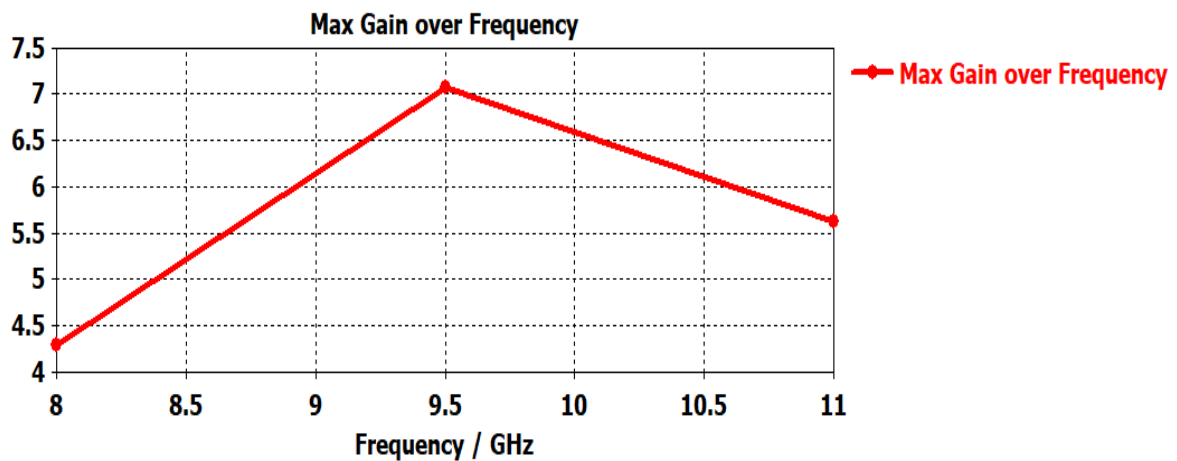


Figure III.30: Le gain de réseau de deux éléments en parallèle à 9.5 GHz.

Les résultats obtenus montrent que le paramètre S_{11} du réseau proposé diffère de celui de l'antenne individuelle. Toutefois, ces différences ne posent aucun problème, car elles restent dans la plage acceptable. Le diagramme de rayonnement du réseau étudié présente des différences notables par rapport à celui de l'antenne unique initiale. Ce diagramme est peu directionnel, avec une ouverture à -3 dB de 33 degrés à $\phi = 0^\circ$ et de 70,7 degrés à $\phi = 90^\circ$, et un gain de 7,05 dBi à 9,5 GHz. Une analyse approfondie montre que le réseau devient plus directif et que le gain augmente à mesure que le nombre d'éléments dans le réseau augmente.

Après l'ajout des diodes, nous avons réalisé une étude paramétrique de la capacité afin d'analyser l'impact de sa variation sur les fréquences et les coefficients de réflexion. La Figure III.31 illustre le dépointage de la fréquence pour chaque valeur de la capacité.

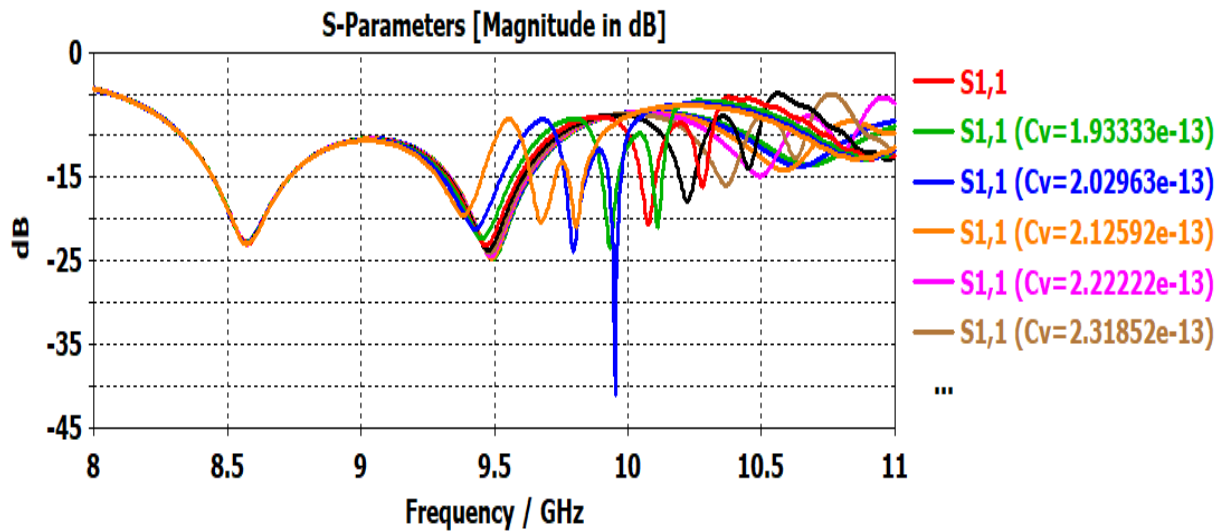


Figure III.31: S_{11} de réseau de deux éléments en parallèle pour différentes valeurs de la capacité.

Cette figure montre la variation du S_{11} en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de capacité variable (C_v). Les courbes révèlent que les fréquences de résonance changent en fonction de C_v , indiquant la capacité de l'antenne à se reconfigurer en fréquence. À mesure que C_v augmente, les fréquences de résonance se déplacent vers des valeurs plus basses. Cette flexibilité permet d'optimiser l'antenne pour différentes fréquences, ce qui est particulièrement avantageux pour les applications nécessitant une adaptation à des conditions de fonctionnement variables, comme les communications satellitaires.

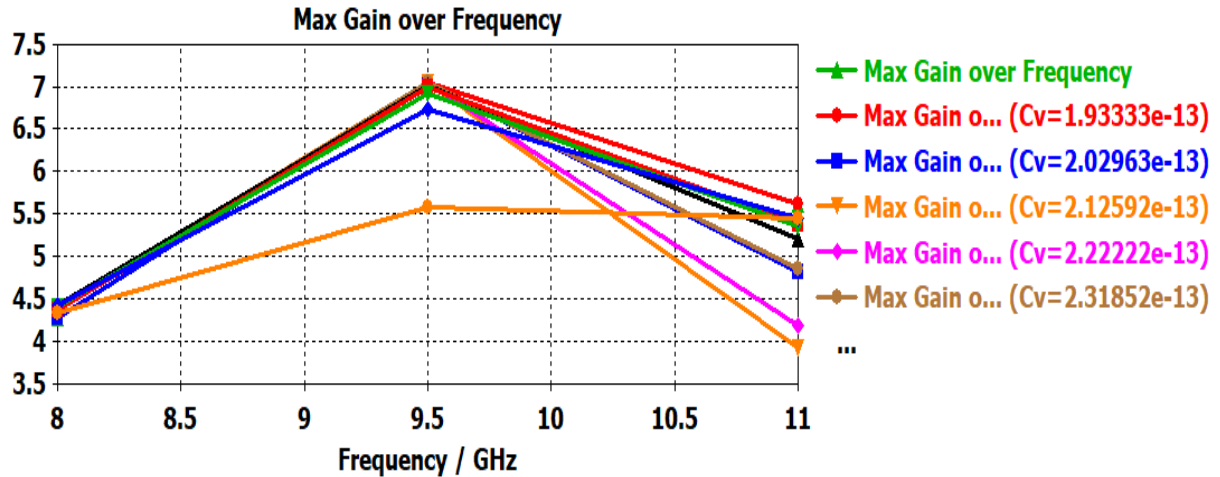


Figure III.32: Gain de réseau de deux éléments en parallèle pour différentes valeurs de la capacité.

Cette figure présente la variation du gain maximal de l'antenne en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de capacité variable (C_v). Chaque courbe représente une configuration spécifique de C_v , indiquant que la capacité influence non seulement la fréquence de résonance mais aussi le gain de l'antenne. Une augmentation de C_v semble légèrement déplacer le point de gain maximal et modifier l'intensité du gain. Cette variation du gain en fonction de la fréquence et de la capacité démontre la capacité de l'antenne à optimiser ses performances dans différentes configurations, ce qui est crucial pour notre application.

Après avoir conçu et étudié le réseau d'antennes à deux éléments, nous avons constaté des améliorations significatives en termes de gain et d'adaptation par rapport à l'antenne simple. Cependant, bien que ce réseau à deux éléments ait offert des résultats prometteurs, certaines limitations subsistent. Afin de surmonter ces défis et d'explorer davantage les capacités des réseaux d'antennes reconfigurables, nous proposons d'étendre notre conception à un réseau comprenant quatre éléments.

b. Réseau d'antennes à quatre éléments

La conception de réseau d'antennes à quatre éléments en parallèle est présentée dans la figure ci-dessous.

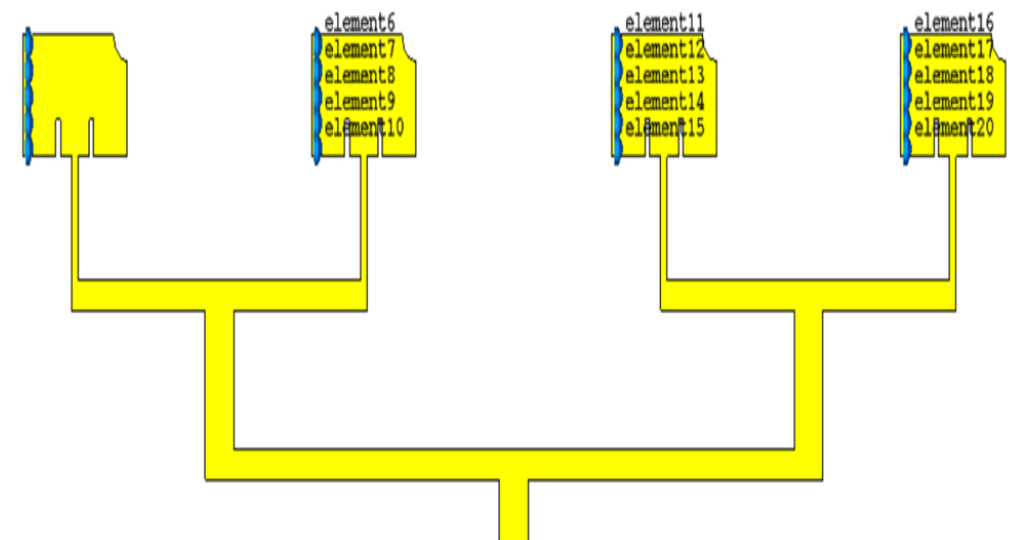


Figure III.33: Structure de réseau à quatre éléments en parallèle.

La Figure III.34 montre qu'en augmentant le nombre d'antennes dans le même réseau, une adaptation très satisfaisante à 9,5 GHz a été obtenue, avec un excellent coefficient de réflexion S_{11} de -41,22 dB, en comparaison avec les résultats précédents.

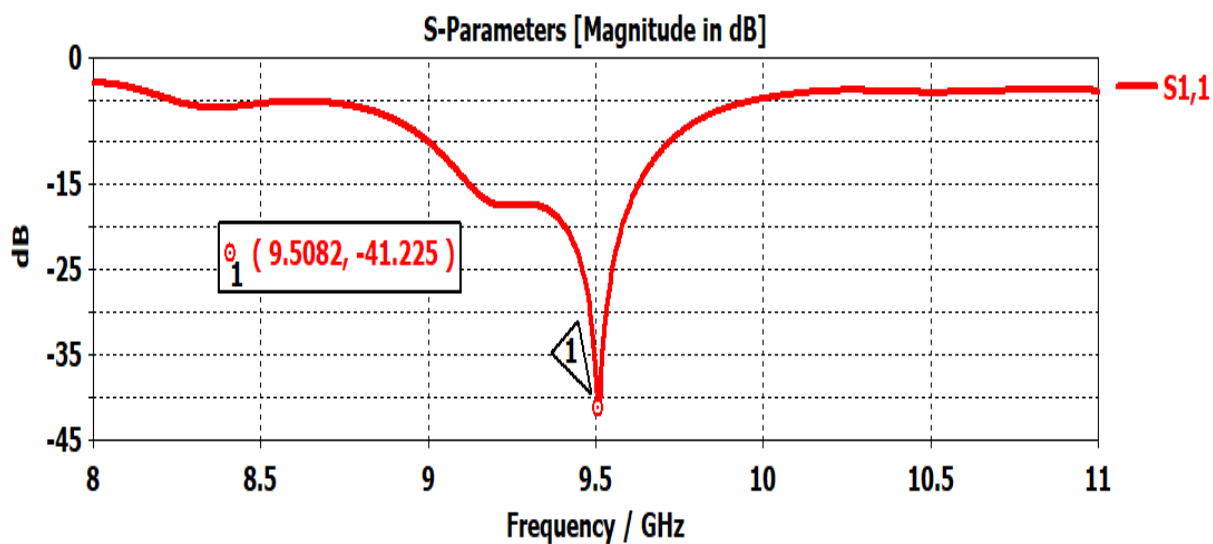


Figure III.34: Le coefficient de réflexion de réseau à quatre éléments en parallèle.

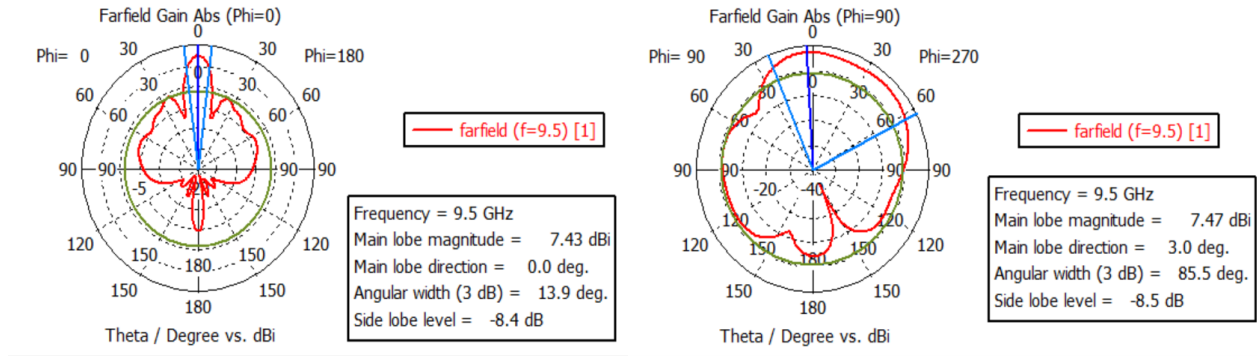


Figure III.35: Le diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) de réseau de quatre éléments en parallèle à 9.5 GHz en 2D.

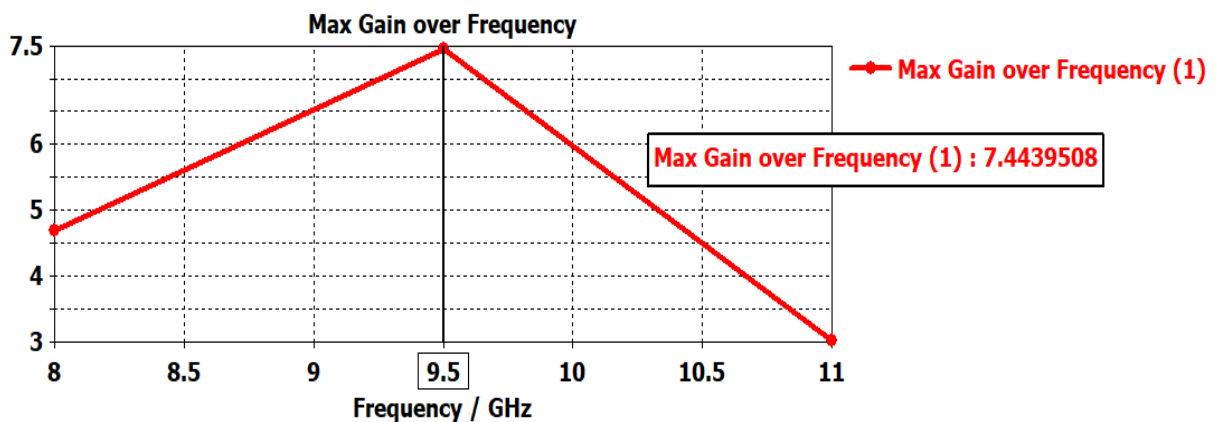


Figure III.36: Le gain de réseau de quatre éléments en parallèle à 9.5 GHz.

Lors de l'examen d'un réseau composé de quatre éléments, une meilleure adaptation et un gain supérieur à ceux du réseau d'antennes à deux éléments en parallèle sont observés, ce qui indique que ce dernier est plus performant. À mesure que le nombre d'éléments dans le réseau augmente, le gain s'améliore, ce qui conduit à une meilleure directivité et une réception/transmission des signaux plus efficace. Le diagramme de rayonnement du réseau étudié présente des différences notables par rapport au réseau d'antennes précédent. Ce diagramme est directionnel, avec une largeur de faisceau de 13,9 degrés à $\phi = 0^\circ$ et de 85,5 degrés à $\phi = 90^\circ$ pour une fréquence de résonance de 9,5 GHz.

Nous avons ensuite lancé une étude de la variation de la capacité afin d'observer l'impact de son changement sur les fréquences et le coefficient de réflexion. La Figure III.37 montre

comment la fréquence varie en fonction de chaque valeur de la capacité.

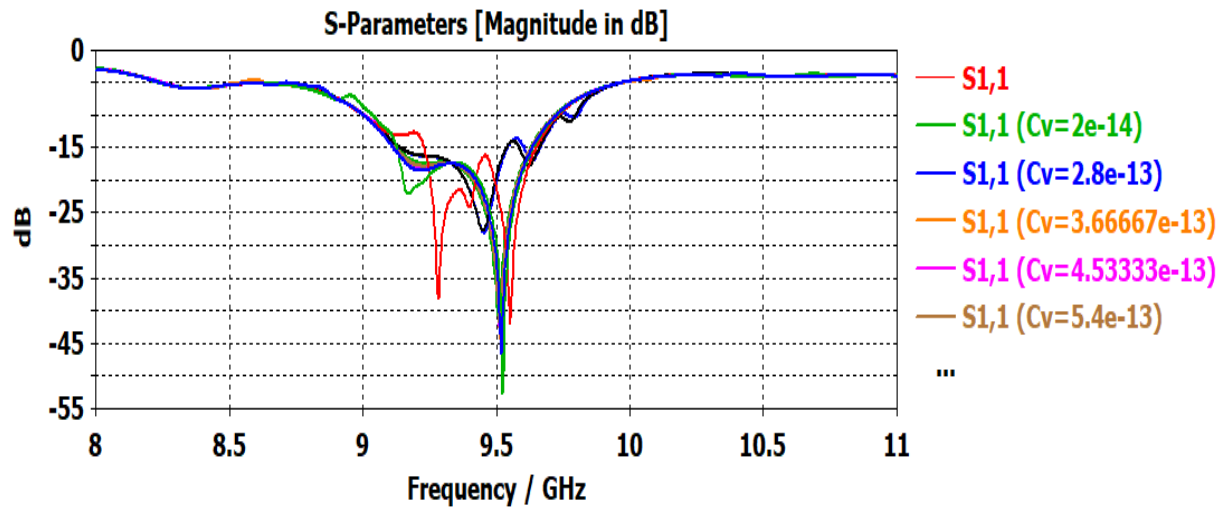


Figure III. 37: S_{11} pour différentes valeurs de la capacité dans le réseau à quatre éléments.

Il est évident dans la figure ci-dessus que chaque valeur de capacité permet d'obtenir de bonnes adaptations à des fréquences distinctes de la bande X, illustrant ainsi le concept de reconfigurabilité en fréquence.

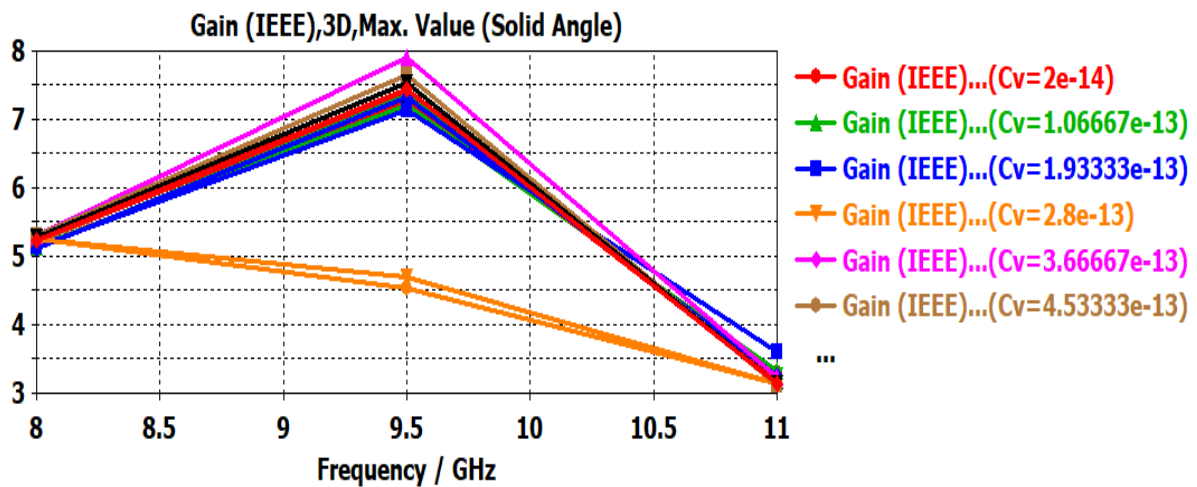


Figure III.38: La variation du gain de réseau de quatre éléments en parallèle pour différentes valeurs de la capacité.

La figure III.38 montre la variation du gain de réseau d'antennes à quatre éléments en parallèle en fonction de la capacité des diodes. On observe une augmentation du gain par rapport aux résultats précédents, surtout à la valeur $C_v = 3.66 \text{ e-}13$ Farad, où un gain très élevé à 8 dBi a été obtenue.

III.5 La reconfigurabilité hybride à l'aide du Graphène et des diodes PIN

Dans cette phase, nous étudierons la reconfigurabilité en fréquence pour les applications satellitaires multi-bandes (bandes X, Ku et Ka), en utilisant deux techniques de reconfigurabilité distinctes : les diodes PIN et le Graphène. Cette étude vise à comparer l'efficacité de ces techniques pour atteindre un ajustement dynamique de la fréquence, essentiel pour optimiser les systèmes de communication par satellite afin de répondre à diverses exigences opérationnelles et d'améliorer les performances globales du système.

Cette étude a été présentée lors de la conférence ICAIRES'22 (International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems), qui était indexée dans Springer et publiée dans [16].

III.5.1 Conception de l'antenne

La géométrie de l'antenne proposée est illustrée à la figure III.39, et ses paramètres sont détaillés dans le tableau III.6. L'antenne se compose d'un patch carré avec une fente, conçue pour fonctionner à 10,4 GHz. Elle est imprimée sur un substrat FR-4, qui a une permittivité relative $\epsilon_r = 4,3$ et une épaisseur de 1,6 mm. Cette configuration est choisie pour optimiser les performances de l'antenne en termes d'adaptation d'impédance et de caractéristiques de rayonnement à la fréquence cible.

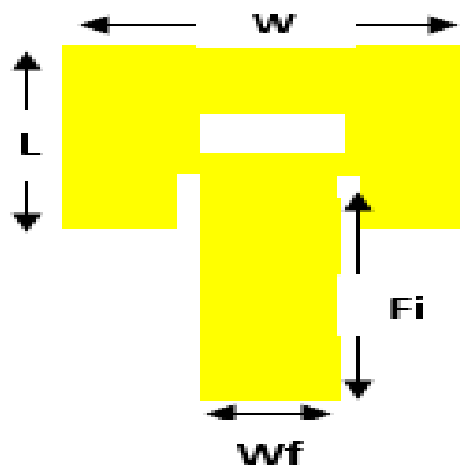


Figure III.39: Structure d'antenne

Paramètres	Dimensions (mm)
Largeur de patch (W)	8.854
Longueur de patch (L)	6.211
Epaisseur de patch (t)	0.035
Largeur de substrat (W_g)	18.454
Longueur de substrat (L_g)	15.811
Epaisseur de substrat (h)	1.6
Longueur d'alimentation (F_i)	2.21
Largeur d'alimentation (W_f)	3.137

Tableau III.6: Les dimensions de l'antenne à 10.4 GHz.

L'antenne a été simulée en utilisant les paramètres de la diode MA4AGBLP912. Les valeurs d'inductance (L), de capacité (C) et de résistance (R) sont présentées dans le Tableau III.7.

Etat ON	L=7.95pH	C=28Ff	R=4 Ω
Etat OFF	L=7.95pH	C=28Ff	R=10K Ω

Tableau III.7: Les paramètres de la diode MA4AGBLP912 pour les deux états.

III.5.2 Conception de l'antenne à l'aide de Graphène

L'antenne à patch avec du graphène est conçue avec CST et illustrée à la Figure III.40.

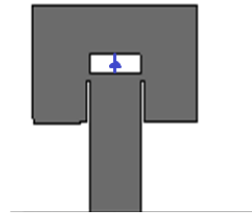


Figure III.40:L'antenne en Graphène

Le coefficient de réflexion S_{11} et le diagramme de rayonnement sont présentés respectivement dans les Figures III.41 et III.42.

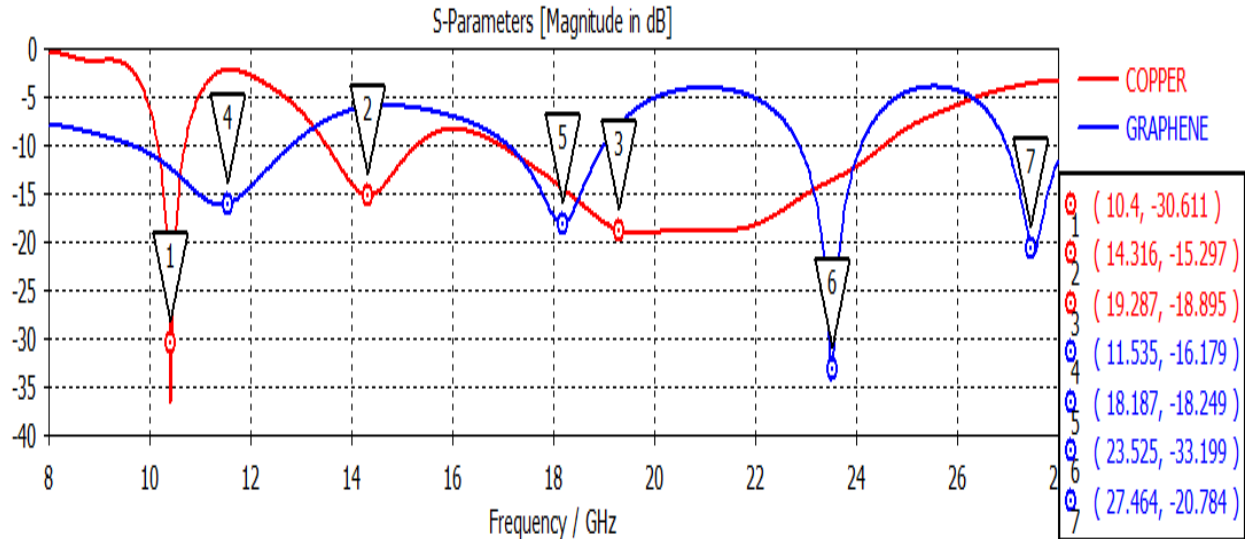


Figure III.41: Comparaison du coefficient de réflexion entre l'antenne à patch en cuivre et en Graphène.

La comparaison présentée dans la Figure III.41 montre que pour les mêmes dimensions de l'antenne à patch métallique, la résonance de l'antenne à base de Graphène se déplace vers des fréquences plus élevées. Ce changement de matériau permet d'obtenir des résonances aux fréquences $f_4 = 14,316$ GHz correspondant à la bande X avec une adaptation de $-16,179$ dB, $f_5 = 18$ GHz selon la bande Ku avec $S_{11} = -18,895$ dB et $f_6 = 23,525$ GHz, $f_7 = 27,464$ GHz, qui fonctionnent dans la bande Ka avec des S_{11} respectivement de -33.199 et -20.784 dB.

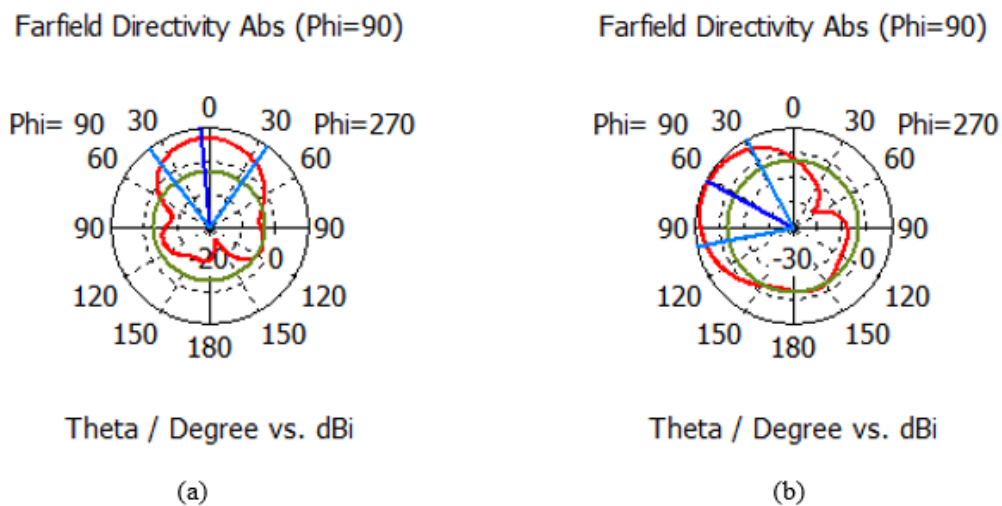


Figure III.42: Les diagrammes de rayonnement à 10,4 GHz pour le cuivre (a) et le Graphène (b).

À cette fréquence, nous présentons le diagramme de rayonnement dans le champ lointain en 2D dans les deux plans $\phi=90^\circ$ et 270° . Le gain total réalisé maximum est d'environ 6,71 dBi pour le cuivre et 8,61 dBi pour le Graphène.

III.5.3 Reconfigurabilité par l'utilisation de diodes PIN

Pour réaliser la simulation, nous proposerons l'utilisation d'une diode PIN (avec les paramètres RLC mentionnés ci-dessus), ce qui donne deux cas possibles (ON-OFF).

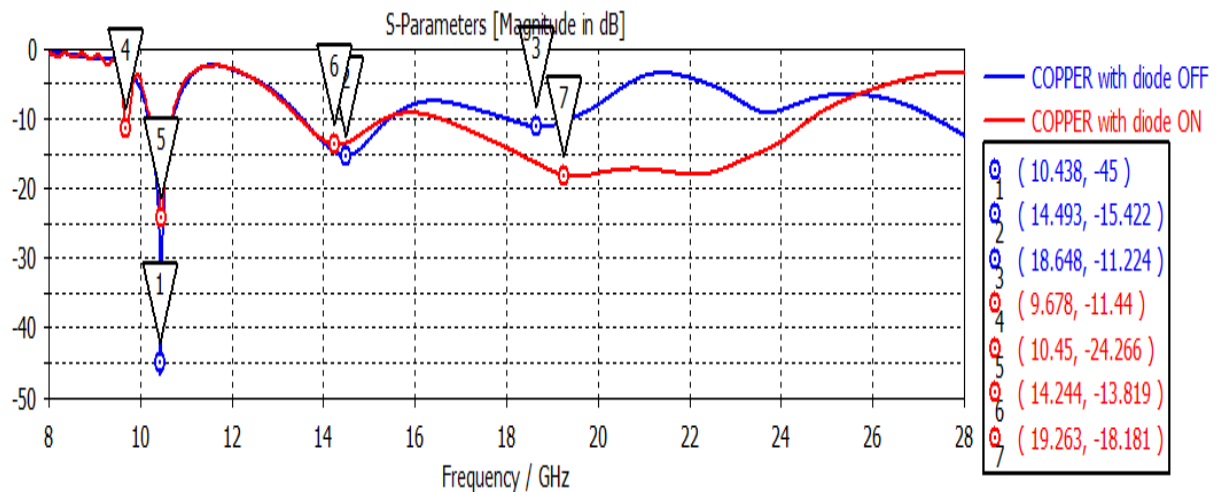


Figure III.43: Coefficient de réflexion de l'antenne en cuivre avec la diode PIN

Cette illustration montre le coefficient de réflexion de l'antenne en cuivre utilisant la reconfigurabilité par diode PIN. La résonance de la diode PIN en position ON est décalée vers une fréquence plus basse, $f_4 = 9,678$ GHz avec $S_{11} = -11,44$ dB. En revanche, lorsque la diode est en position OFF, l'adaptation est optimale avec $S_{11} = -45$ dB à $f_1 = 10,4$ GHz.

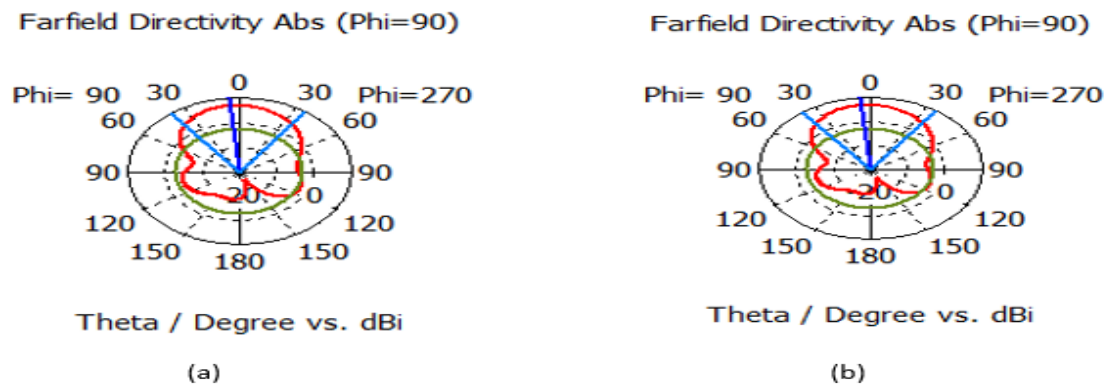


Figure III.44: Les diagrammes de rayonnement de l'antenne en cuivre à 10,4 GHz pour la diode PIN ON (a) et OFF (b).

À $f = 10,4$ GHz, nous montrons le diagramme de rayonnement dans l'espace lointain en 2D dans les deux plans $\phi = 90^\circ$ et 270° . Le gain maximal total réalisé est de 6,74 dBi lorsque la diode est en état passant (état ON) et de 6,85 dBi lorsque la diode est en état bloqué (état OFF).

Étant donné que chaque type de reconfigurabilité a produit des résultats différents, cela suscite notre intérêt pour l'exploration des effets d'une combinaison des deux. Cette approche nous amène à envisager l'association des diodes PIN et du graphène pour obtenir de nouvelles performances.

III.5.4 Reconfigurabilité en utilisant une diode PIN et du Graphène

Dans cette section, nous utiliserons simultanément les deux techniques de reconfigurabilité précédemment évoquées. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.45 et III.46.

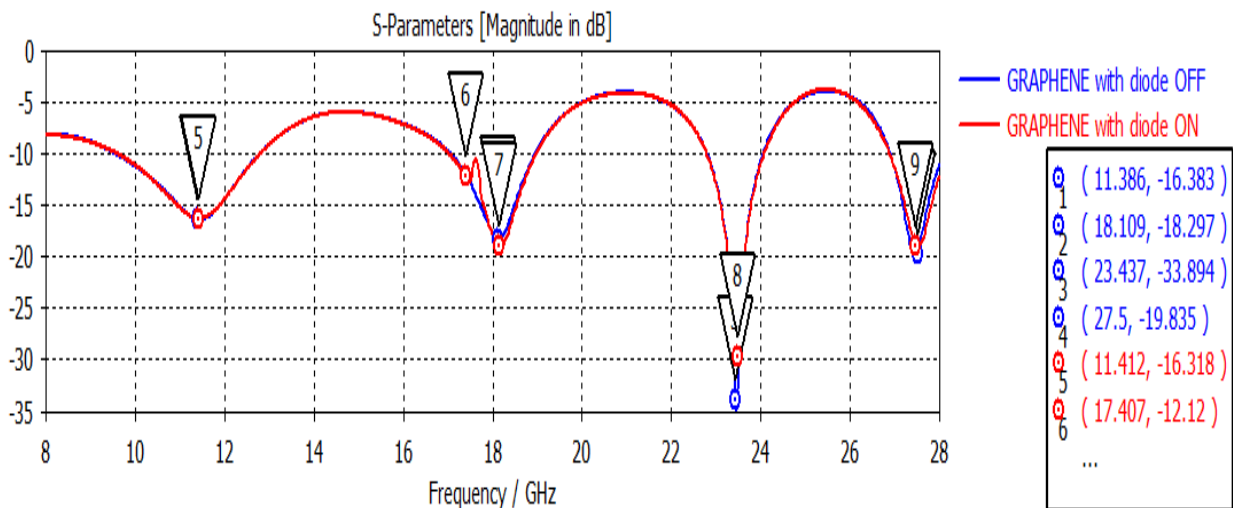


Figure III.45: Coefficient de réflexion de l'antenne en Graphène avec la diode PIN (ON-OFF).

Cette figure montre le coefficient de réflexion de l'antenne en Graphène avec la diode PIN (ON-OFF). En comparant les états ON et OFF, les fréquences de résonance obtenues sont les mêmes, à l'exception du fait que la diode passant offre une fréquence de résonance supplémentaire à $f=17,407$ GHz et un S11 de -12,12 dB. Cependant, lorsque l'on compare avec les résultats précédents (diode et cuivre), on peut observer l'influence du Graphène sur la reconfigurabilité.

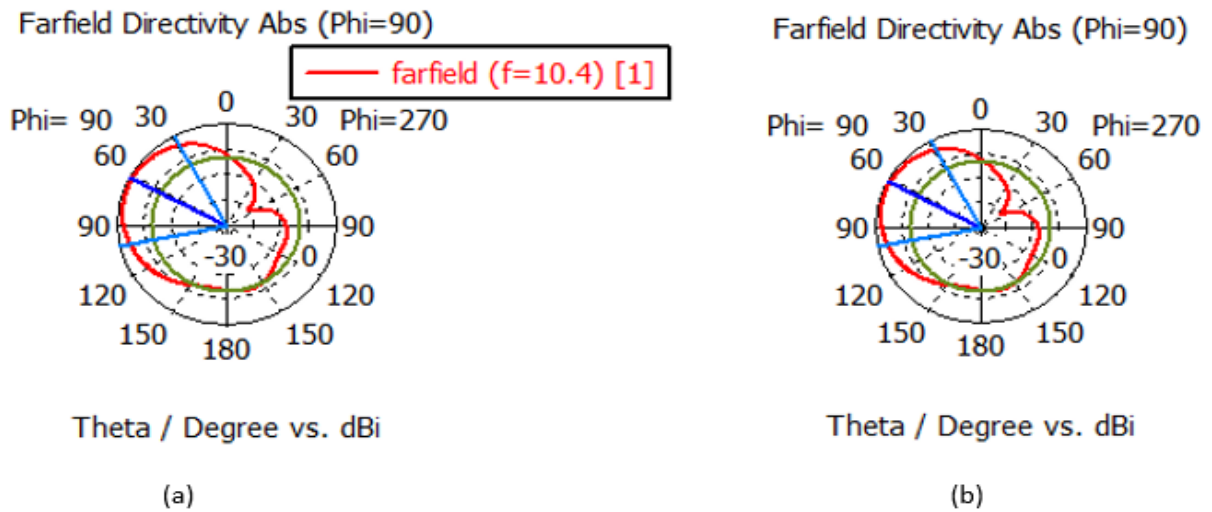


Figure III.46: Diagrammes de rayonnement de l'antenne en Graphène à 10,4 GHz pour la diode PIN ON (a), OFF (b).

À $f=10,4$ GHz, nous montrons le diagramme de rayonnement lointain en 2D dans les deux plans $\phi=90^\circ$ et 270° . Le gain total réalisé maximum est de 8,61 dBi pour les deux états (ON et OFF).

III.6 Conclusion

Ce chapitre a exploré différentes techniques d'optimisation des antennes reconfigurables, en utilisant le Graphène, les diodes varicaps et PIN. Nous avons montré comment ces matériaux et composants peuvent améliorer la flexibilité et la performance des systèmes de communication, notamment pour les applications satellitaires et les réseaux radio cognitifs. Les solutions hybrides combinant le Graphène et les diodes PIN ont offert des avantages notables en termes de reconfigurabilité. Ces optimisations ouvrent la voie à la réalisation d'antennes reconfigurables plus performantes, sujet que nous aborderons dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

**Conception et Réalisation des Antennes
Reconfigurables dans les Réseaux Radio Cognitifs
Destinés aux Détection de Feux de Forêts et
Radar satellitaire**

Table des matières

IV.1	Introduction	92
IV.2	Conception d'antennes pour la détection de feu de forêts dans la bande C	92
IV.2.1	Conception de l'antenne patch rectangulaire	92
IV.2.2	Réseau d'antennes à deux éléments	94
IV.2.3	Réseau d'antennes à quatre éléments	95
IV.2.4	Reconfiguration de réseau d'antennes.....	97
IV.3	Programmation et application des SMA en réseau radio cognitif pour les antennes reconfigurables.....	101
IV.3.1	Application NETBEANS	101
IV.3.2	Plateforme Jade	101
IV.3.3	Temps de convergence	103
IV.3.4	Taux de réussite de meilleur offre.....	104
IV.4	Réalisation de réseau d'antennes reconfigurable en fréquence avec les diodes PIN pour les applications Radar	105
IV.4.1	Conception de structure d'antenne.....	105
IV.4.2	Conception d'un réseau d'antennes à quatre éléments.....	108
IV.4.3	Reconfigurabilité de réseau d'antennes à quatre éléments.....	110
IV.4.4	Résultats expérimentaux	114
IV.5	Conclusion	117

IV.1 Introduction

Les avancées récentes dans le domaine des antennes reconfigurables ont permis d'ouvrir de nouvelles perspectives pour des applications critiques telles que la détection des feux de forêts et les radars satellitaires. L'utilisation de technologies telles que les réseaux d'antennes reconfigurables pour les systèmes radio cognitifs offre des solutions flexibles et efficaces pour répondre aux défis posés par ces applications.

Suite à l'optimisation globale et à la simulation des différentes techniques abordées dans le chapitre précédent, nous avons sélectionné, de manière rigoureuse, la conception et la méthodologie les plus appropriées pour valider et concrétiser nos prototypes. Dans ce chapitre, nous abordons la conception et la réalisation d'antennes pour la détection de feux de forêts dans la bande C, en détaillant plusieurs configurations de réseaux d'antennes et leurs capacités de reconfiguration. Nous examinerons également les techniques de programmation adaptées aux réseaux radio cognitifs, ainsi que la mise en œuvre expérimentale de réseaux d'antennes reconfigurables dédiées aux applications radar utilisant des diodes PIN.

IV.2 Conception d'antennes pour la détection de feu de forêts dans la bande C

Dans cette section, nous analysons la conception d'antennes spécialement optimisées pour satisfaire les exigences de détection des incendies de forêt dans la bande C.

IV.2.1 Conception de l'antenne patch rectangulaire

L'antenne étudiée est un modèle de type patch rectangulaire, conçu pour opérer à une fréquence de 5,8 GHz. Elle est adaptée avec une impédance d'entrée de 50 Ohms et utilise un substrat FR-4 (LOSSY), caractérisé par une permittivité relative de $\epsilon_r = 4,3$ et une épaisseur de $h = 1,6$ mm. Le plan de masse, fabriqué à partir du même matériau que le patch (cuivre), présente une épaisseur identique de $t = 0,035$ mm.

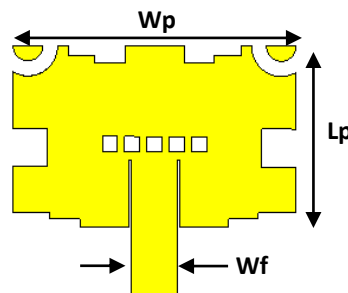


Figure IV.1: Structure d'antenne.

Paramètres	Dimensions (mm)
Largeur de patch (W_p)	15.88
Longueur de patch (L_p)	11.88
Hauteur de patch (t)	0.035
Largeur de substrat (W_g)	25.48
Longueur de substrat (L_g)	21.8
Hauteur de substrat (h)	1.6
Longueur d'alimentation (L_a)	4.80
Largeur d'alimentation (W_f)	3.11

Tableau IV.1 : les dimensions de l'antenne à 5.8 GHz.

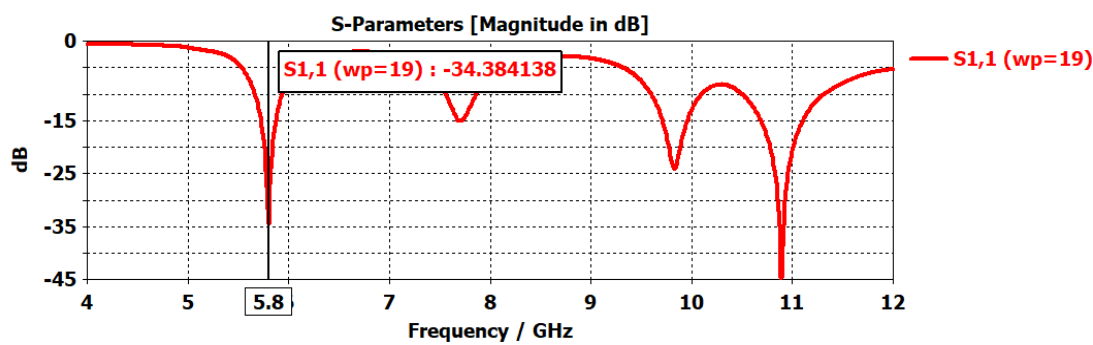


Figure IV.2: Coefficient de réflexion de l'antenne simulée.

L'analyse de la Figure IV.2 met en évidence une adaptation optimale de l'antenne à la fréquence de résonance cible de 5,8 GHz, comme en témoigne un coefficient de réflexion S_{11} de -34,38 dB. De plus, la présence de trois résonances présentant une adaptation satisfaisante confirme la capacité de l'antenne à fonctionner efficacement sur plusieurs bandes de fréquence.

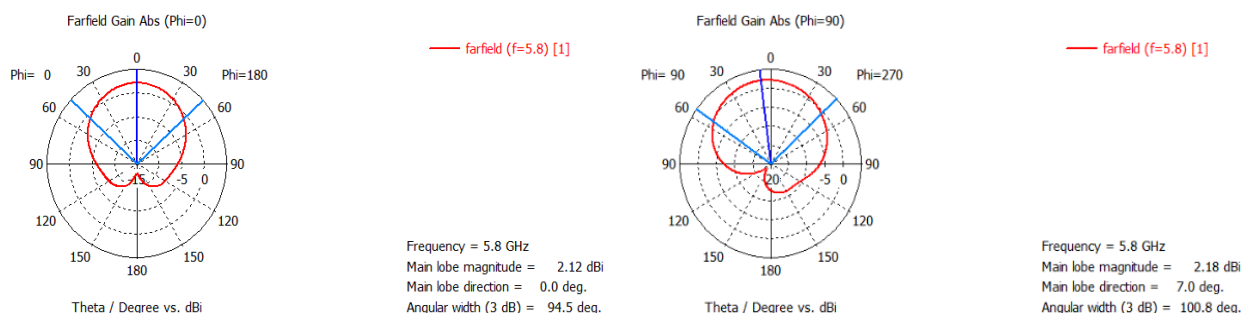


Figure IV.3: Diagramme de rayonnement ($\phi = 0^\circ$ et 90°) de l'antenne à 5.8 GHz en 2D.

Ces deux figures illustrent les diagrammes de rayonnement polaire pour une antenne opérant à 5,8 GHz, dans les plans $\Phi = 0^\circ$ et $\Phi = 90^\circ$. Dans le plan $\Phi = 0^\circ$, le lobe principal a un gain de 2,12 dBi avec une direction de 0° , et une largeur de faisceau de $94,5^\circ$, tandis que dans le plan $\Phi = 90^\circ$, le gain du lobe principal est de 2,18 dBi avec une direction légèrement décalée à 7° et une ouverture à -3 dB de $100,8^\circ$. Cette antenne présente un faisceau relativement large dans les deux plans, avec une légère asymétrie de directivité dans le plan $\Phi = 90^\circ$, indiquant une couverture plus étendue et un comportement quasi-isotrope, ce qui peut être avantageux pour notre application de détection de feu qui nécessite une large couverture plutôt qu'une focalisation directionnelle étroite.

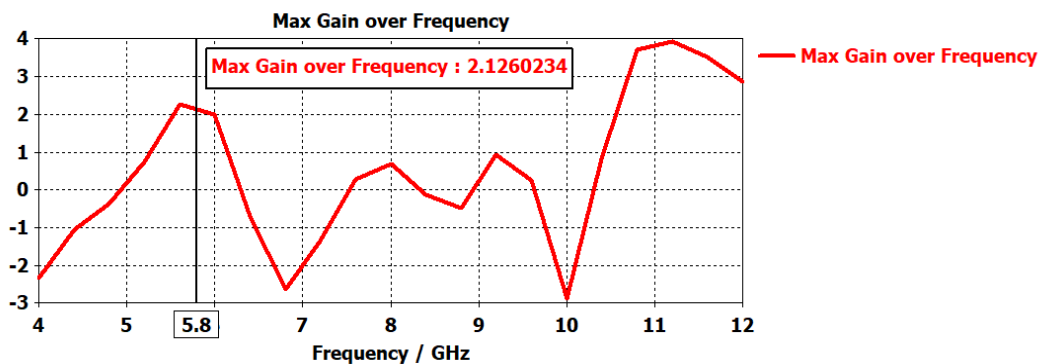


Figure IV.4: Le gain d'antenne.

Avec un gain de 2,12 dBi, bien que notable, les performances restent insuffisantes pour répondre pleinement aux exigences de notre application. Par conséquent, nous envisageons de passer à un réseau d'antennes afin d'améliorer les performances et de mieux répondre à nos besoins spécifiques.

IV.2.2 Réseau d'antennes à deux éléments

La configuration du réseau est conçue avec une alimentation d'entrée de 50Ω , une alimentation inter-antennes de 75Ω , et une alimentation individuelle pour chaque antenne de 100Ω .

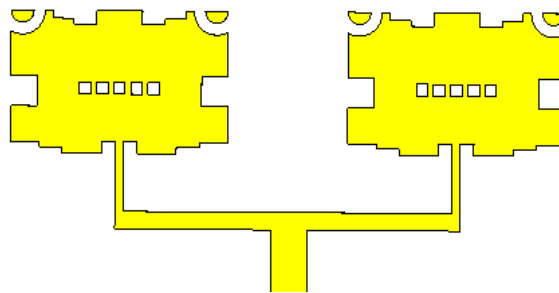


Figure IV.5: Structure de réseau d'antennes à deux éléments.

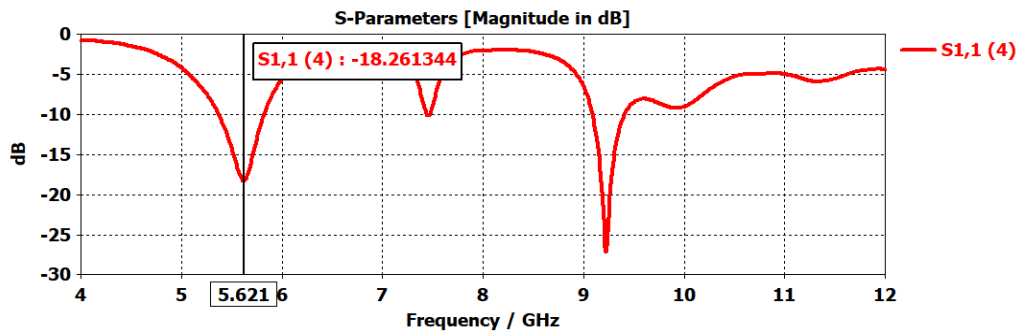


Figure IV.6: S_{11} de réseau d'antennes à deux éléments.

D'après les résultats du réseau à deux éléments, présentés dans la figure IV.6, il est constaté que même après avoir varié la distance entre les éléments de $0,4\lambda$ à $0,9\lambda$; la fréquence cible à 5,8 GHz n'a pas été atteinte. En conséquence, nous prévoyons de passer à un réseau hybride à quatre éléments afin d'atteindre les performances souhaitées.

IV.2.3 Réseau d'antennes à quatre éléments

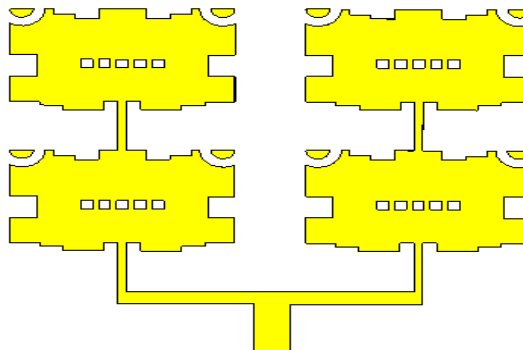


Figure IV.7: Structure de réseau d'antennes à quatre éléments.

Les résultats de cette conception sont illustrés ci-dessous

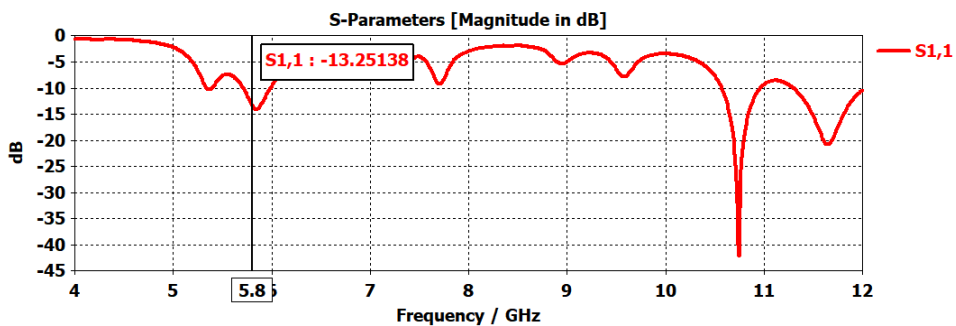


Figure IV.8: S_{11} de réseau d'antennes à quatre éléments.

Le réseau d'antennes à quatre éléments présente une adaptation optimale à la fréquence de résonance de 5,8 GHz, avec un coefficient de réflexion de -13,25 dB.

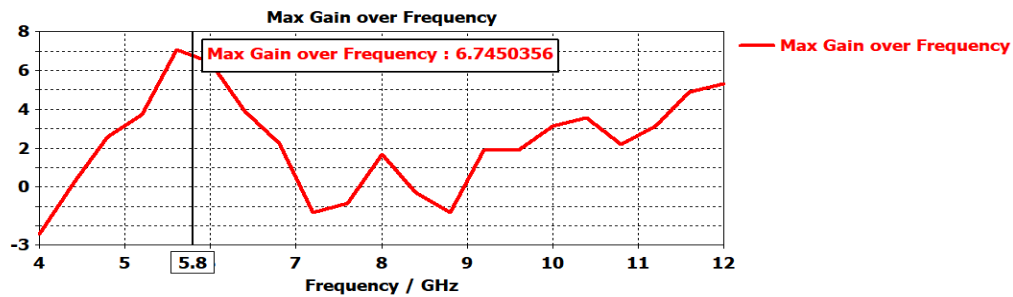


Figure IV.9: Le gain de réseau d'antennes à quatre éléments.

A la fréquence de 5,8 GHz, le réseau d'antennes affiche un gain de 6,74 dBi. Cette performance notable souligne l'excellente adéquation du réseau à notre application, répondant de manière optimale aux exigences spécifiques de notre cas d'utilisation.

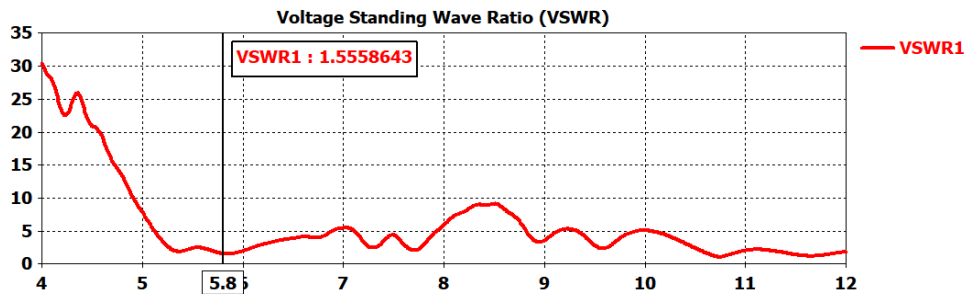


Figure IV.10: VSWR de réseau d'antennes à quatre éléments.

La bonne adaptation de l'antenne à la fréquence de 5,8 GHz est confirmée par un taux d'onde stationnaire (TOS) de 1,55, bien en dessous du seuil critique de 2, ce qui témoigne d'une adéquation satisfaisante aux exigences de performance.

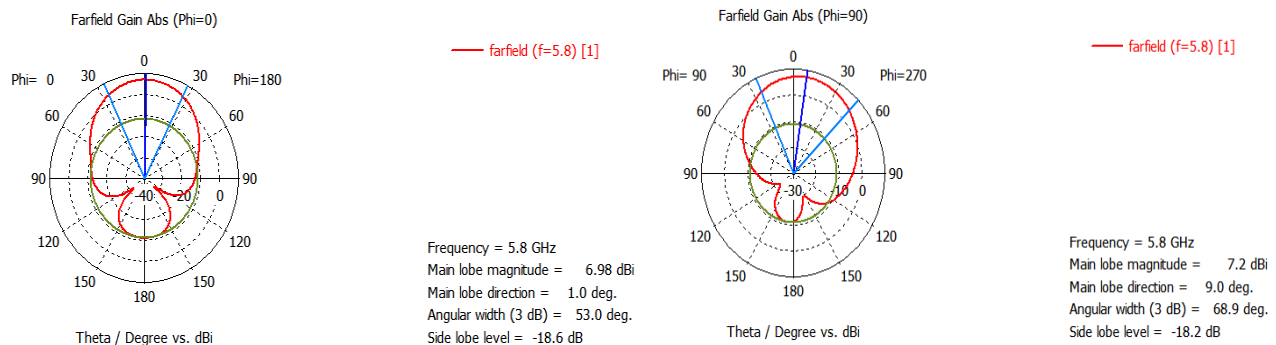


Figure IV.11: Diagramme de rayonnement (phi = 0 ° et 90 °) du réseau à quatre éléments en 2D.

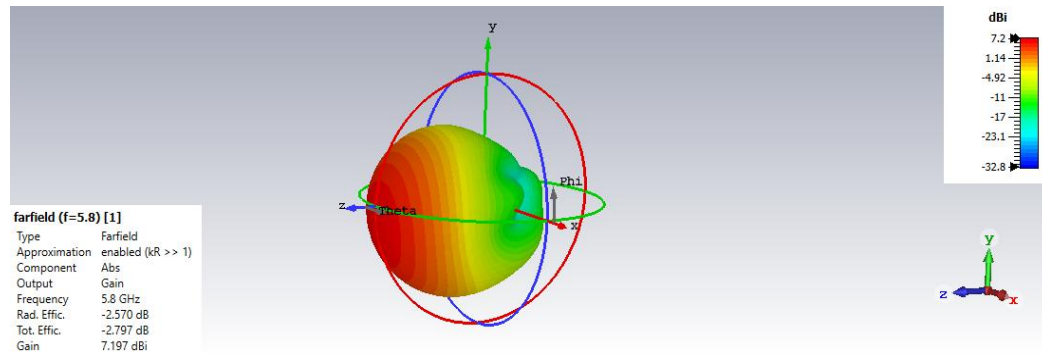


Figure IV.12: Diagramme de rayonnement du réseau à quatre éléments en 3D.

D'après les figures IV.11 et IV.12, les diagrammes révèlent un gain significativement élevé pour le lobe principal dans les deux plans, atteignant environ 7 dBi, ce qui indique une forte directivité de l'antenne. Le lobe principal est presque centré dans le plan $\Phi=0^\circ$, tandis qu'il est légèrement décalé à 9° dans le plan $\Phi=90^\circ$. La largeur angulaire est plus étroite dans le plan $\Phi=0^\circ$ ($53,0^\circ$) par rapport au plan $\Phi=90^\circ$ ($68,9^\circ$), suggérant une directivité plus élevée dans le premier plan. Les niveaux des lobes secondaires sont bien atténués, à environ -18 dB dans les deux plans, ce qui montre une performance directionnelle efficace. Ces caractéristiques font de l'antenne un choix adapté pour des applications où une directivité élevée est nécessaire.

IV.2.4 Reconfiguration de réseau d'antennes

Pour reconfigurer notre réseau d'antennes, nous allons insérer deux diodes PIN reliant l'extrémité du patch aux rectangles métalliques. La modélisation des diodes PIN peut être réalisée par deux méthodes :

- ✓ Cas idéal : Pour cette structure nous utilisons cette approche dont les diodes en état OFF sont représentées par un vide, tandis qu'en état ON, elles sont modélisées par un élément métallique en cuivre de dimensions $0,4 \times 1,1$ mm.
- ✓ Circuit équivalent : La diode est représentée dans ses deux états (OFF et ON) à l'aide d'un circuit équivalent. Les diodes PIN utilisées sont de type BAR64-02V, dont les caractéristiques seront exploitées dans la section suivante.

Les fentes (slots) intégrées dans le plan de masse de l'antenne patch jouent un rôle crucial pour prévenir les courts-circuits lors de l'intégration des diodes. Bien que les diodes soient indispensables au contrôle des états de résonance, leur placement direct sur le plan de masse peut entraîner des courts-circuits entre les éléments métalliques de l'antenne, compromettant ainsi la

stabilité des résonances. L'ajout de fentes dans le plan de masse interrompt la continuité métallique, empêchant tout contact direct entre les différentes parties conductrices de l'antenne. Cette configuration minimise les risques de courts-circuits tout en permettant aux diodes de contrôler efficacement les états de résonance sans affecter la stabilité globale de l'antenne [1].

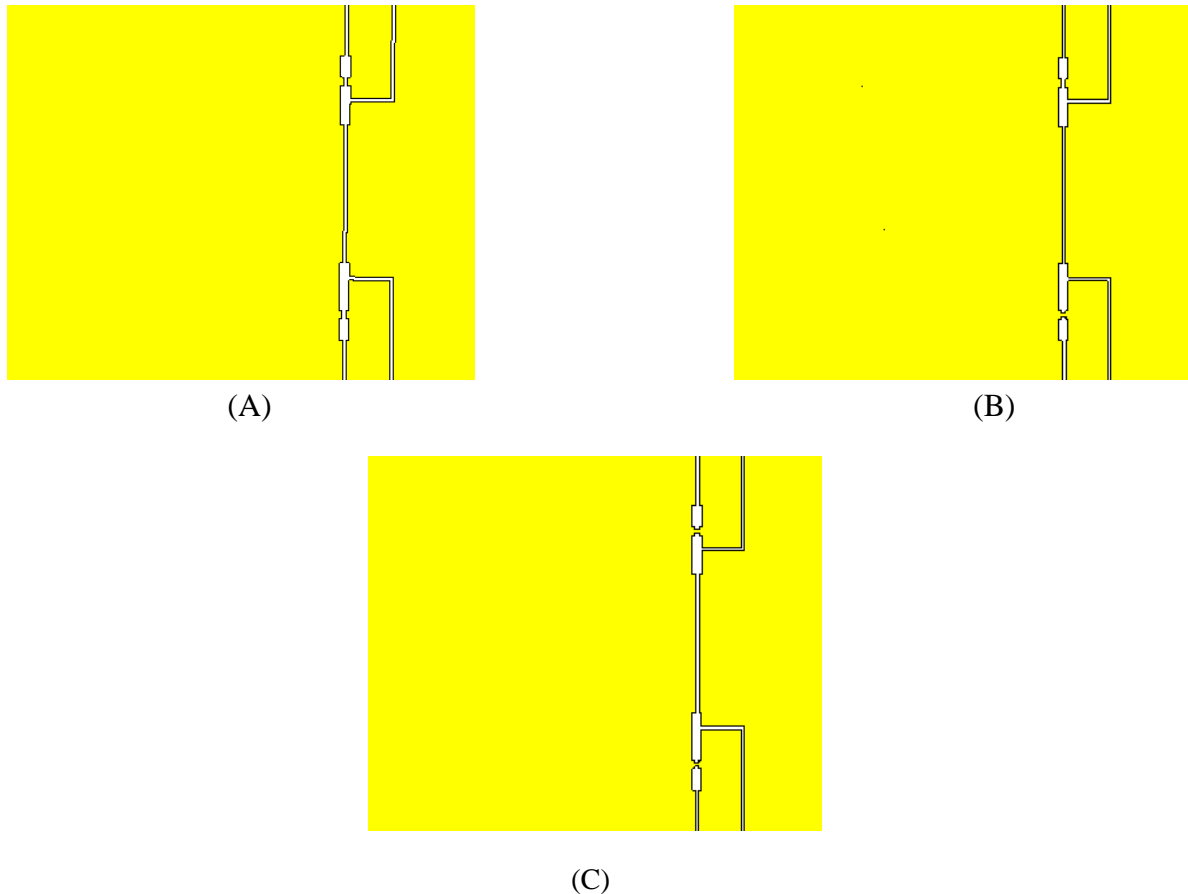


Figure IV.13: Le plan de masse du réseau d'antenne reconfigurable. (A) : L'état OFF-OFF, (B) : L'état OFF-ON, (C) : L'état ON-ON.

Les résultats des simulations réalisées à la fréquence de 5,8 GHz pour les trois configurations étudiées sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	S₁₁ (dB)	Gain (dBi)	VSWR
OFF-OFF	-20.05	6.39	1.22
OFF-ON	-19.89	6.36	1.22
ON-ON	-19.83	6.37	1.22

Tableau IV.2 : Résultats des simulations pour les trois configurations.

Dans cette section, nous présenterons la conception de notre réseau d'antennes reconfigurables ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. Les mesures ont été effectuées au laboratoire de télécommunications du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).



Figure IV.14: Test du réseau d'antennes reconfigurables à quatre éléments.

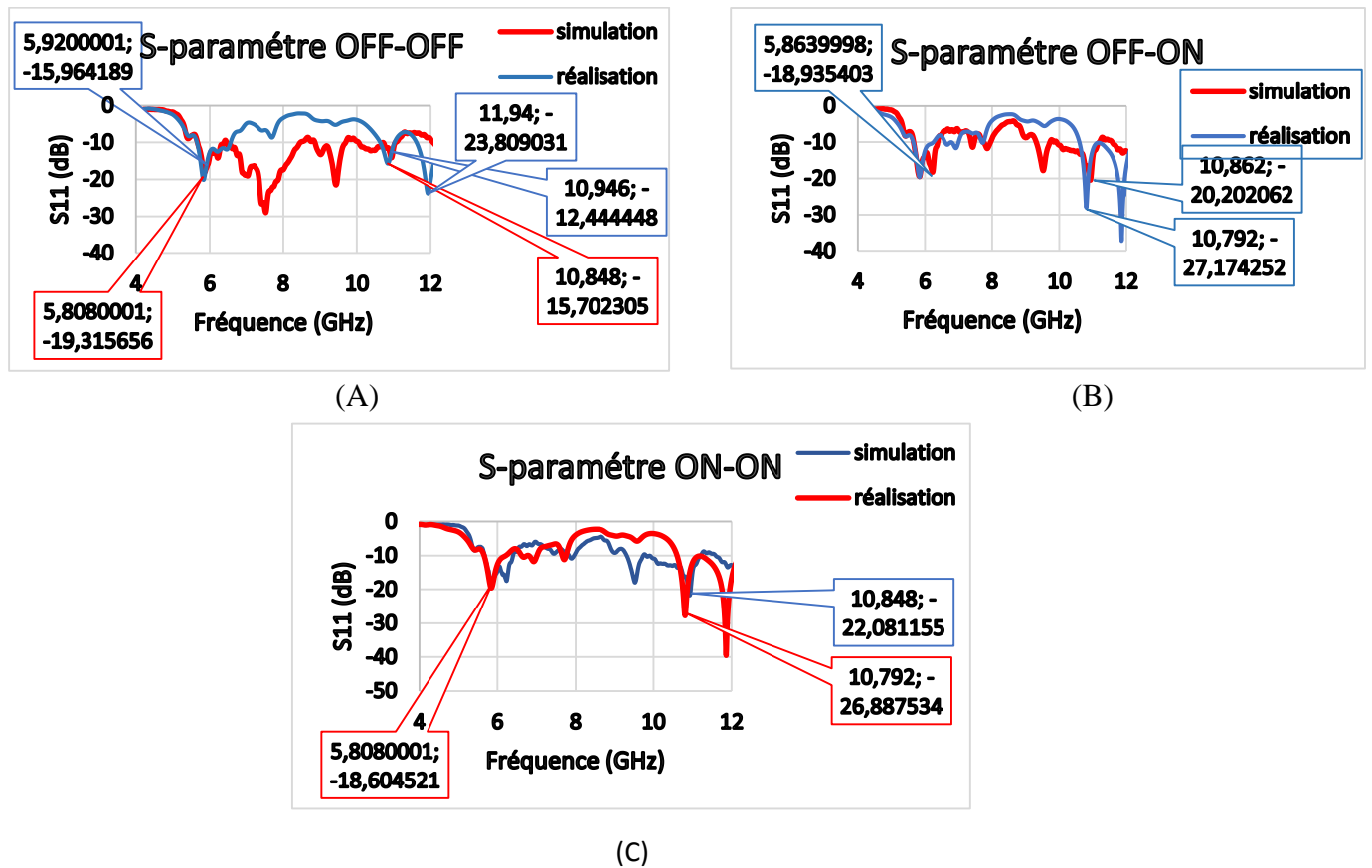


Figure IV.15: Comparaison entre la simulation et les mesures du coefficient de réflexion du réseau d'antennes reconfigurable. (A): L'état OFF-OFF, (B) : L'état OFF-ON, (C) : L'état ON-ON.

L'analyse des paramètres S_{11} pour les trois états de reconfigurabilité (OFF-OFF, OFF-ON et ON-ON) confirme la capacité de l'antenne à modifier ses fréquences de résonance et son adaptation d'impédance. En état OFF-OFF, les fréquences de résonances sont observés à 5,92 GHz avec -15,96 dB, à 10,84 GHz avec -15,70 dB, et à 11,94 GHz avec -23,80 dB. En état OFF-ON, les creux sont légèrement décalés avec des valeurs de -18,93 dB à 5,86 GHz, -27,17 dB à 10,79 GHz, et -20,20 dB à 10,86 GHz, traduisant une amélioration de l'adaptation sur certaines fréquences. L'état ON-ON montre des performances similaires avec des résonances à 5,80 GHz (-18,60 dB), 10,79 GHz (-26,88 dB), et 10,84 GHz (-22,08 dB). La comparaison entre simulation et réalisation révèle un bon alignement des tendances, bien que de légers écarts en fréquence et en profondeur de S_{11} soient notés, probablement dus aux tolérances de fabrication et aux pertes additionnelles en mesure. Ces résultats valident le modèle théorique et confirment l'efficacité de l'antenne reconfigurable pour des applications en réseaux cognitifs et en communications satellitaires, avec une bonne stabilité des performances malgré les changements d'état.

Pour une comparaison plus claire et concise des résultats, nous avons regroupé les données dans une seule figure, permettant une visualisation directe pour les trois configurations : OFF-OFF, OFF-ON et ON-ON.

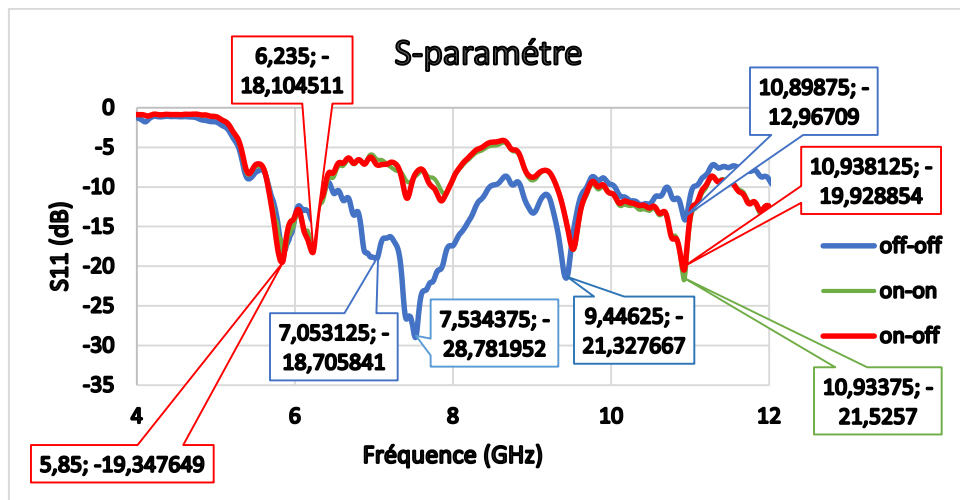


Figure IV.16: Comparaison du coefficient de réflexion mesuré du réseau d'antennes reconfigurable dans les trois cas.

Les variations des courbes en fonction des configurations démontrent la capacité du réseau à adapter son comportement en réflexion selon les besoins. Par exemple, la configuration off-off présente une meilleure adaptation aux fréquences autour de 7 GHz et 10 GHz, tandis que la

configuration on-off montre des performances distinctes près de 6 GHz et 11 GHz, suggérant une utilité spécifique pour des applications multi-bandes ou adaptatives. Ces résultats mettent en évidence la flexibilité du réseau pour répondre à divers scénarios d'exploitation, rendant ce type de conception idéal pour des systèmes à large bande et des radars.

IV.3 Programmation et application des SMA en réseau radio cognitif pour les antennes reconfigurables

IV.3.1 Application NETBEANS

NetBeans est un environnement de développement intégré (IDE) open-source, initialement développé par Sun Microsystems, et distribué sous les licences CDDL (Common Development and Distribution License) et GPLv2 depuis juin 2000. Bien qu'il soit conçu à l'origine pour le langage Java, NetBeans offre également un support étendu pour d'autres langages de programmation tels que C, C++, JavaScript, XML, PHP et HTML. Cet IDE complet intègre l'ensemble des outils essentiels attendus d'un environnement de développement moderne, facilitant ainsi le développement d'applications multi-plateformes [2].

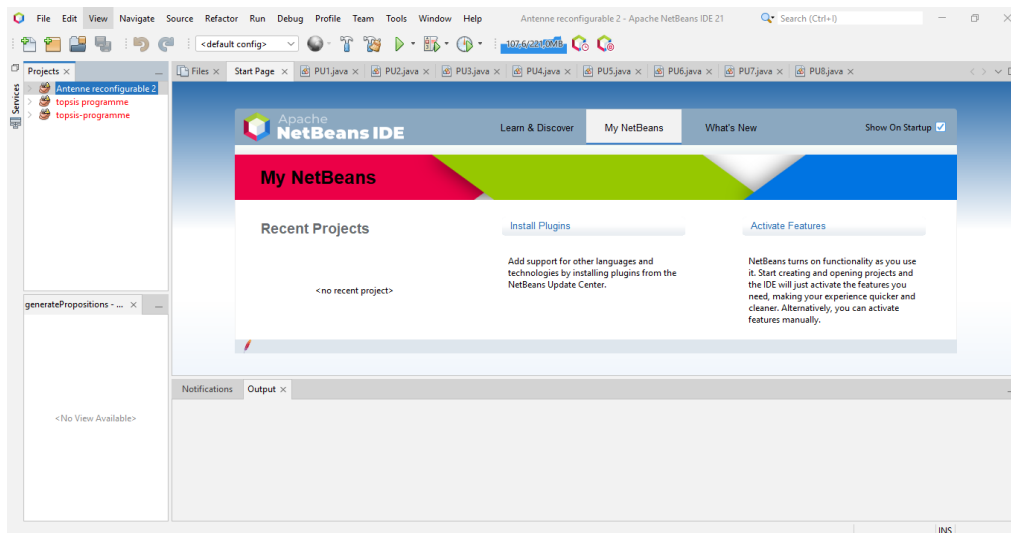


Figure IV.17: Netbeans IDE 21.

IV.3.2 Plateforme Jade

JADE (Java Agent Development Framework) est une plateforme multi-agents (MAS) en Java, développée par TILAB (Groupe de recherche de Gruppo Telecom, Italie), pour la création de systèmes multi-agents conformes à la norme FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents). Elle se compose d'un environnement d'exécution, d'une bibliothèque de classes Java pour la gestion

des agents, et d'outils graphiques pour la supervision. Chaque instance, appelée conteneur, peut héberger plusieurs agents. Un conteneur principal (main-container) gère les agents AMS (Agent Management System) et DF (Directory Facilitator), essentiels pour le fonctionnement et le suivi des applications multi-agents [3].

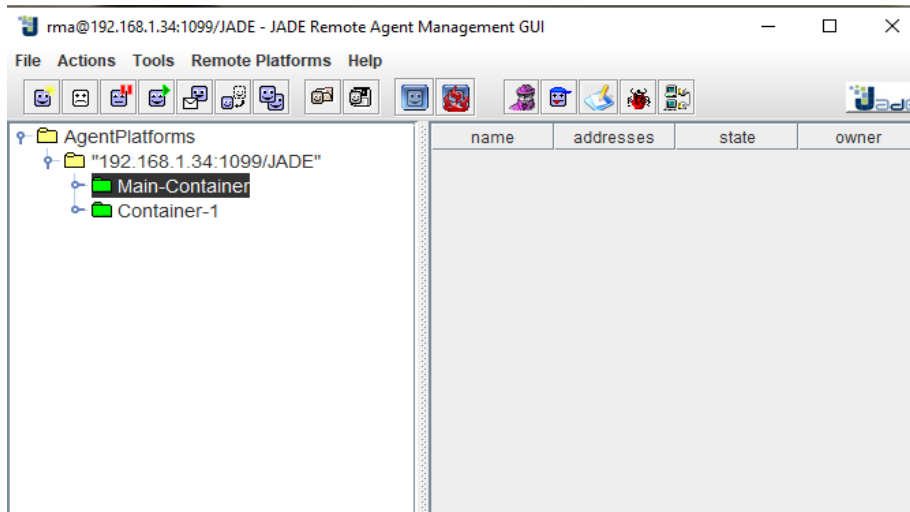


Figure IV.18: Plateforme JADE.

Dans cette section, nous proposons une simulation de la communication et de la négociation entre les agents primaires (Primary Users, PU) et un agent secondaire (Secondary User, SU) dans un réseau cognitif. Cette simulation vise à identifier le PU le plus favorable et fiable pour répondre aux besoins du SU. La communication se déroulera selon les étapes suivantes :

- ✓ **Détection des PUs :** Le SU déterminera le nombre de PUs détectés, c'est-à-dire le nombre de zones non fonctionnelles identifiées dans la bande C (4 à 8 GHz). Par exemple, en choisissant cinq zones (5 PUs), il faudra attribuer des sous-bandes distinctes, comprises entre 4 et 8 GHz, à chaque PU.

- ✓ **Affectation des bandes :** Chaque PU se verra attribuer une petite bande spécifique dans la plage de 4 à 8 GHz pour éviter les interférences et optimiser la communication.

- ✓ **Introduction des diodes PIN :** Le nombre de diodes PIN à insérer sera déterminé, permettant au SU de trouver le PU qui correspond à ses exigences, notamment une fréquence de 5,8 GHz avec différents scénarios d'utilisation des diodes.

Cette simulation permettra de choisir le PU le plus adapté aux besoins du SU, assurant une communication efficace dans le réseau cognitif.

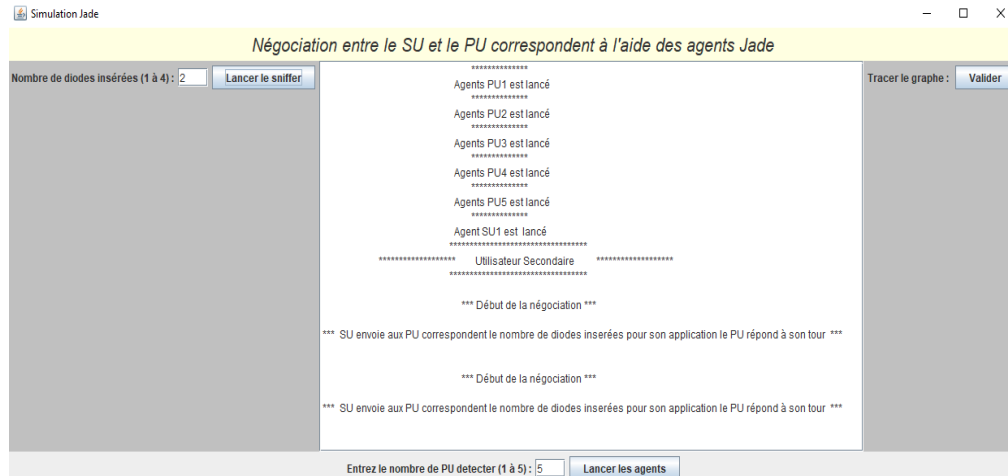


Figure IV.19: Simulation JADE.

Lorsqu'un utilisateur souhaite surveiller un agent ou un groupe d'agents, il utilise un agent Sniffer. Cet outil permet de capturer et d'afficher chaque message entrant ou sortant de ce groupe directement sur l'interface du sniffer. Grâce à cette fonctionnalité, l'utilisateur peut visualiser en temps réel les échanges et enregistrer tous les messages pour une analyse approfondie ultérieure.

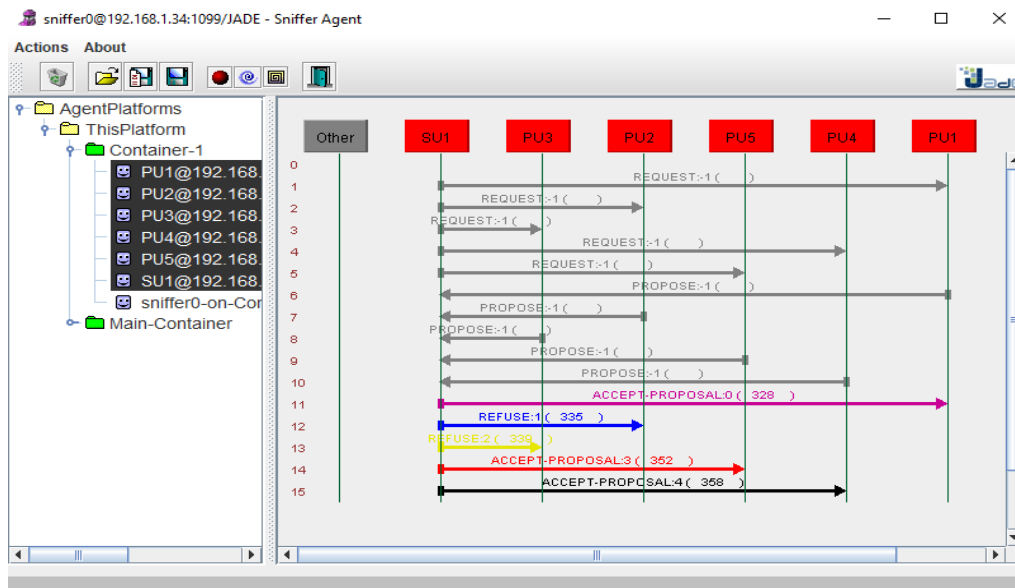


Figure IV.20: Interface Agent Sniffer.

IV.3.3 Temps de convergence

Cette étude vise à analyser le temps de convergence moyen d'un SU lors de la communication avec différents PU dans une bande de fréquence donnée. Les résultats, présentés dans le graphique ci-dessous, illustrent la variation du temps de convergence en fonction des PU :

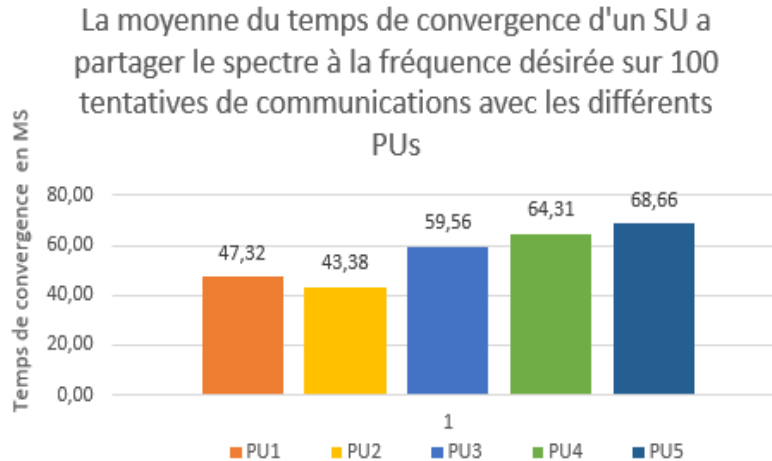


Figure IV.21 La moyenne du temps de convergence d'un SU a partager le spectre à la fréquence désirée sur 100 tentatives de communications avec les différents PUs.

Les temps de convergence varient de manière significative entre les différents PUs. PU2 présente le temps de convergence le plus court, à 43,38 ms, ce qui pourrait suggérer une meilleure compatibilité ou un niveau d'interférences réduit avec le SU. En revanche, PU5 affiche le temps de convergence le plus long, à 68,66 ms, indiquant potentiellement des défis plus importants pour le SU en termes de partage du spectre, probablement dus à des interférences accrues ou à une compatibilité moindre.

IV.3.4 Taux de réussite de la meilleure offre

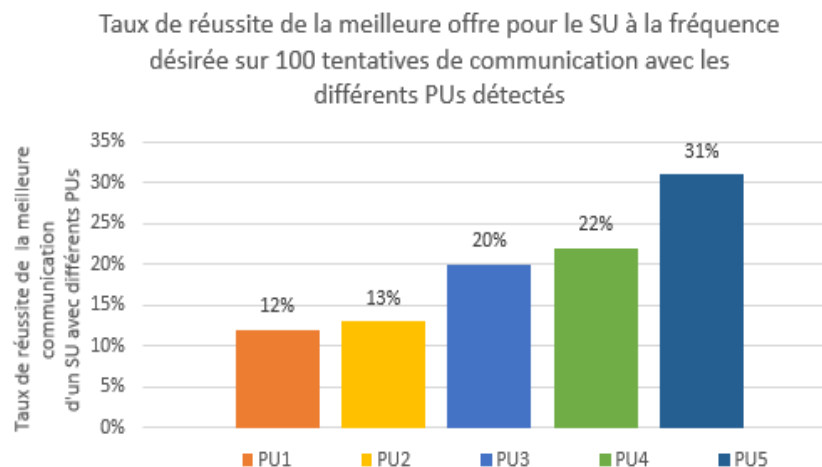


Figure IV.22: Taux de réussite de la meilleure offre pour le SU à la fréquence désirée sur 100 tentatives de communication avec les différents PUs détectés.

D'après la figure IV.22, PU5 affiche le taux de réussite le plus élevé, à 31 %, ce qui pourrait indiquer une meilleure compatibilité ou des interférences réduites avec le SU. À l'inverse, PU1 présente le taux de réussite le plus bas, à 12 %, suggérant des défis plus importants pour le SU en matière de partage de la fréquence, potentiellement en raison d'interférences plus élevées ou d'une compatibilité moindre.

IV.4 Réalisation de réseau d'antennes reconfigurable en fréquence avec les diodes PIN pour les applications Radar

IV.4.1 Conception de structure d'antenne

La conception de l'antenne utilisée dans cette étude est la même que celle présentée dans notre travail précédent, détaillé au chapitre 3 et publié en [4]. Elle résonne à 9 GHz et possède une structure de patch rectangulaire fabriquée avec le même matériau en cuivre, comportant 5 fentes rectangulaires, comme illustré à la figure IV.23. Cependant, dans cette étude, nous avons choisi de remplacer le substrat FR4 par le Rogers RT5880, qui a une constante diélectrique de $\epsilon_r = 2,2$ et une épaisseur de $h = 0,8$ mm, afin d'améliorer les performances de l'antenne. En conséquence, les dimensions de l'antenne ont été ajustées, et ces modifications sont présentées dans le tableau suivant.

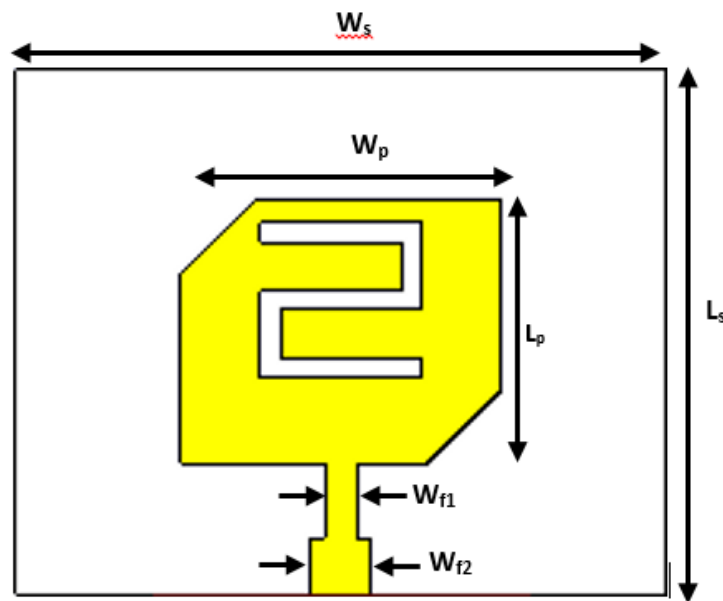


Figure IV.23: Structure d'antenne.

Paramètres	Dimensions (mm)
Largeur de substrat (W_s)	26.34
Longueur de substrat (L_s)	21.5712
Largeur de patch (W_p)	13
Longueur de patch (L_p)	10.7856
Largeur d'alimentation (W_{f1})	1.2658
Largeur d'alimentation (W_{f2})	2.46

Tableau IV.3: Les dimensions de l'antenne avec le Rogers.

Le coefficient de réflexion simulée (S_{11}) est présenté à la figure IV.24. Ces résultats démontrent que l'antenne atteint une résonance efficace à plusieurs fréquences, la résonance principale se situant aux alentours de la fréquence cible de 9 GHz. Une baisse notable du paramètre S_{11} est observée à environ 8,97 GHz, où le S_{11} atteint -21,319 dB, indiquant un appariement d'impédance efficace et une réflexion de puissance minimale. De plus, la résonance la plus marquée se produit à 9,71 GHz, caractérisée par une valeur de S_{11} de -28,309 dB, ce qui témoigne d'un appariement d'impédance optimal. Une autre résonance est détectée à 14,17 GHz, avec une valeur de S_{11} de -12,572 dB, soulignant le potentiel de l'antenne pour une opération multi-bande. La multi résonance de cette antenne, suggère que l'antenne peut fonctionner efficacement sur une large gamme de fréquences.

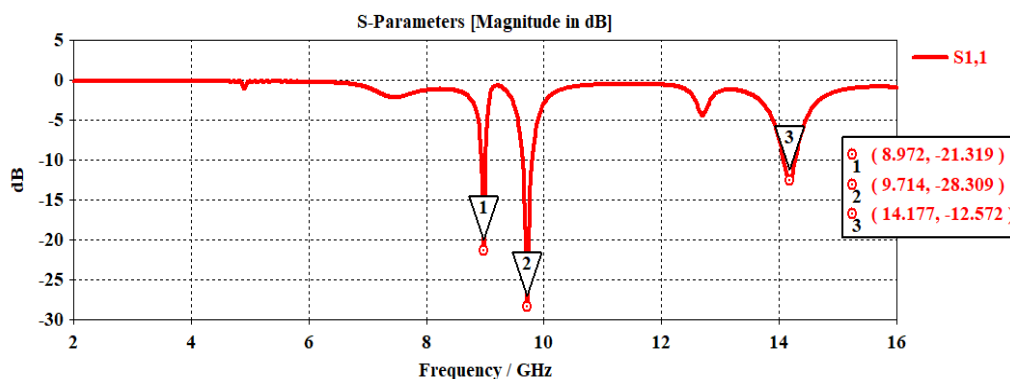


Figure IV.24: Le coefficient de réflexion de l'antenne avec le Roger.

La figure IV.25 illustre le gain maximal en fonction de la fréquence pour l'antenne. Les résultats de gain démontrent que l'antenne offre des performances constantes à travers plusieurs fréquences

de résonance, avec des gains d'environ 6,71 dBi à 8,97 GHz, 7,30 dBi à 9,71 GHz et 6,69 dBi à 14,17 GHz. Ce gain constant, en particulier autour de la fréquence d'exploitation principale de 9 GHz, indique que l'antenne peut diriger efficacement la puissance rayonnée, garantissant une transmission et une réception efficaces pour les applications de communication par satellite.

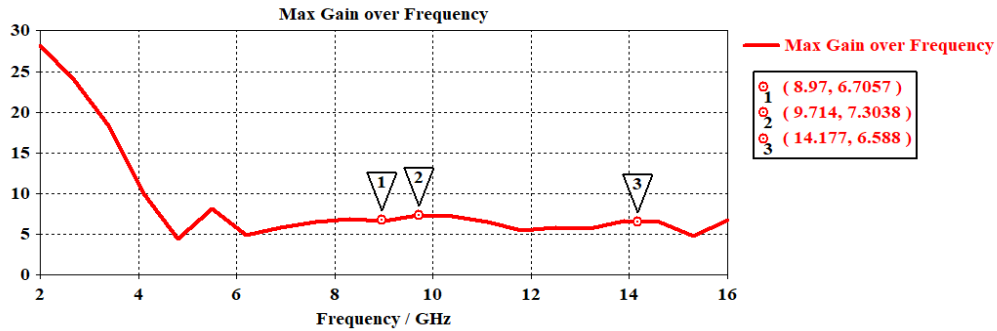


Figure IV.25: Le gain de l'antenne avec le Roger.

Les résultats de gain et des S_{11} montrent des améliorations significatives des performances de l'antenne lorsqu'on utilise le substrat Rogers RT5880 par rapport au substrat traditionnel FR4 [4].

Avec le substrat Rogers RT5880, l'antenne atteint des valeurs de gain plus élevées et plus constantes, spécifiquement 6,71 dBi à 8,97 GHz, 7,30 dBi à 9,71 GHz et 6,69 dBi à 14,17 GHz, ce qui indique une meilleure efficacité et des capacités directionnelles accrues sur les fréquences d'exploitation. Ces gains sont généralement supérieurs à ceux observés avec le FR4, connu pour ses pertes diélectriques plus élevées, qui peuvent entraîner une réduction du gain et une radiation moins efficace.

En outre, la perte de retour avec le Rogers RT5880 présente des creux plus prononcés aux fréquences de résonance, avec des valeurs de S_{11} atteignant -21,319 dB à 8,97 GHz et -28,309 dB à 9,71 GHz. Ces valeurs reflètent un meilleur appariement d'impédance et une réduction de la réflexion de puissance comparée au FR4. L'utilisation du Rogers RT5880, avec son constant diélectrique inférieur ($\epsilon_r = 2,2$) et ses caractéristiques de faible perte, améliore considérablement la capacité de l'antenne à fonctionner efficacement sur une large gamme de fréquences, tout en maintenant de bonnes caractéristiques de gain et de perte de retour.

IV.4.2 Conception d'un réseau d'antennes à quatre éléments

S'appuyant sur les améliorations de performance observées avec l'antenne à élément unique utilisant le substrat Rogers RT5880, cette étude étend la conception à une configuration de réseau d'antennes à quatre éléments.

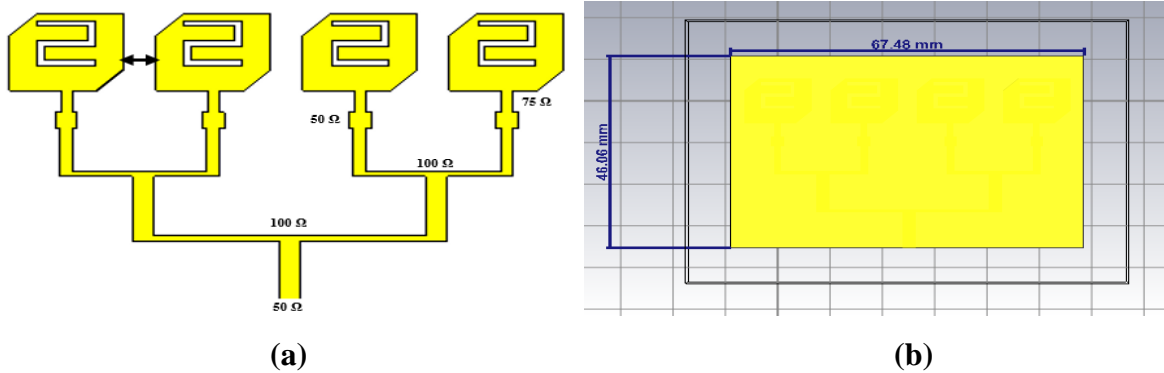


Figure IV.26: Structure de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger ; (a) : Patch, (b) : plan de masse.

La figure IV.27 présente les résultats de S_{11} du réseau d'antennes, indiquant que le réseau à quatre éléments est capable de fonctionner sur plusieurs bandes de fréquence, avec un appariement d'impédance solide à plusieurs fréquences de résonance, notamment à 9 GHz et 9,826 GHz. La perte de retour substantielle à 9,826 GHz témoigne d'une efficacité opérationnelle excellente et d'une réflexion de puissance minimale, rendant le réseau particulièrement adapté aux applications de communication par satellite à haute performance. Ces résultats mettent en évidence les performances supérieures du réseau par rapport aux conceptions à élément unique.

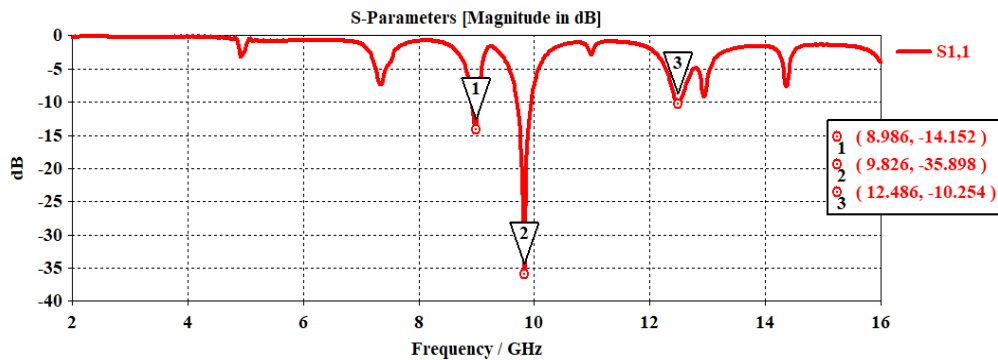


Figure IV.27: Coefficient de réflexion de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger.

La figure IV.28 montre les résultats du VSWR pour le réseau d'antennes à quatre éléments, démontrant un bon appariement d'impédance aux fréquences de résonance, avec une performance

particulièrement excellente à 9,826 GHz (VSWR = 1,0326). Les valeurs de VSWR à 8,896 GHz et 12,486 GHz se situent également dans la plage acceptable pour une opération efficace de l'antenne. Ces résultats, combinés à l'analyse de S_{11} , confirment que le réseau est bien adapté aux applications de communication par satellite multi-bande, offrant des performances optimales dans la plage de 9 à 16 GHz.

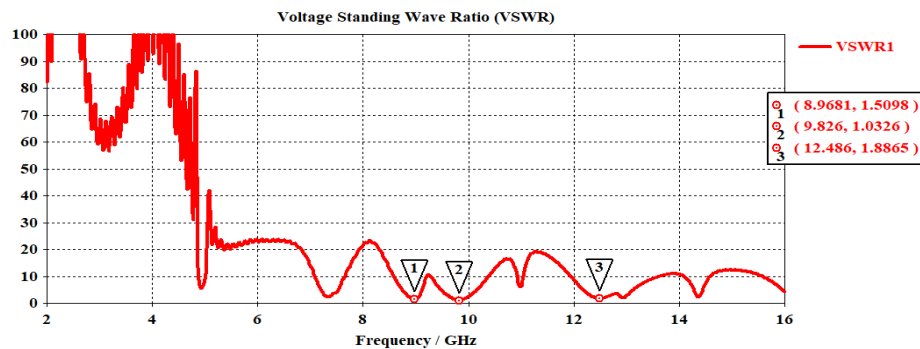


Figure IV.28: VSWR de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger.

La figure IV.29 illustre le gain maximal en fonction de la fréquence ; le réseau d'antennes à quatre éléments offre un avantage clair en termes de gain par rapport à l'antenne à élément unique, avec une amélioration moyenne du gain de 3 à 5 dBi à toutes les fréquences de résonance. À 9,826 GHz, où le réseau démontre un appariement d'impédance optimal, un gain de 11,751 dBi confirme ses performances excellentes. Le gain reste élevé sur toute la plage de fréquences, en particulier à 12,486 GHz, où il atteint un pic de 12,151 dBi. Cela fait du réseau un choix supérieur pour les applications multi-bandes à haut gain, notamment en communications par satellite.

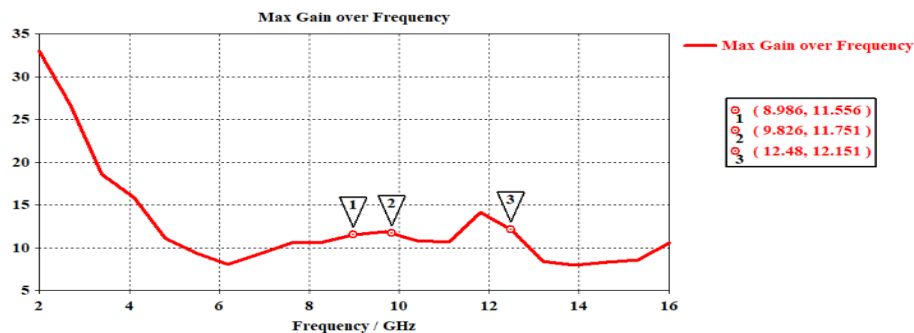


Figure IV.29: Gain de réseau d'antennes à quatre éléments en Roger.

Les diagrammes de rayonnement à 9 GHz montrent une performance satisfaisante avec un gain maximal de 11,5 dBi dans les deux plans. En $\Phi=0$, la direction principale est légèrement

décalée (1°), avec une largeur angulaire de $25,4^\circ$ et des lobes secondaires à -12 dB, traduisant une directivité modérée. En $\text{Phi}=90$, la directivité est accrue avec une largeur angulaire réduite à $8,4^\circ$ et des lobes secondaires à $-21,3$ dB, indiquant un meilleur contrôle des rayonnements indésirables.

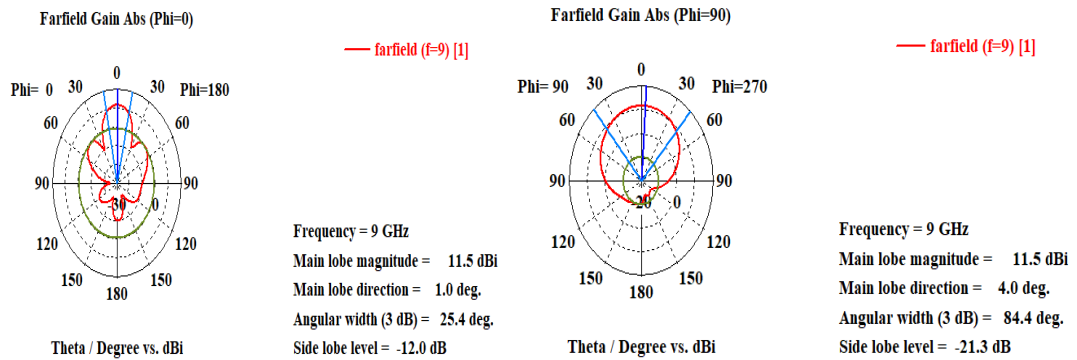


Figure IV.30: Diagramme de rayonnement ($\text{phi} = 0^\circ$ et 90°) du réseau à quatre éléments en Roger.

IV.4.3 Reconfigurabilité de réseau d'antennes à quatre éléments

Cette section explore la reconfigurabilité du réseau d'antennes grâce à l'intégration de deux diodes PIN. Dans notre travail, nous utiliserons la deuxième méthode de la reconfiguration par le circuit équivalent de la diode PIN BAR64-02V avec les paramètres suivants :

- **État ON :** 2.1Ω , 0.6 nH.
- **État OFF:** $3 \text{ K}\Omega$, 0.6 nH, 0.13 pF.

Pour mettre en œuvre l'approche proposée, certaines modifications doivent être apportées à la structure. Afin de polariser les diodes PIN pour les activer ou les désactiver, des fentes de $0,4$ mm de largeur sont introduites dans le plan de masse pour séparer les deux ports des interrupteurs et permettre une différence de tension entre eux. Toutefois, pour maintenir une séparation en courant continu et assurer une continuité en radiofréquence (RF) du plan de masse, des condensateurs RF montés en surface de 100 pF sont utilisés pour combler les fentes, offrant presque un court-circuit aux fréquences de fonctionnement. L'intégration des diodes PIN (D1 et D2) et les capacités (de 1 à 10) dans le plan de masse du réseau d'antennes est illustrée à la figure IV.31.

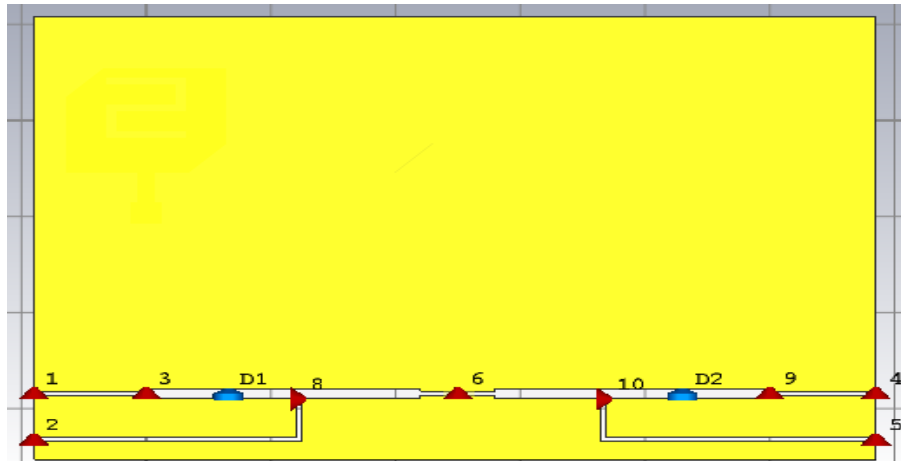


Figure IV.31: Plan de masse du réseau reconfigurable

Étant donné que deux diodes ont été insérées, il y a quatre états possibles. Cependant, les états ON-OFF et OFF-ON étant identiques, seuls trois états distincts ont été affichés. Les résultats des simulations correspondants sont présentés ci-dessous.

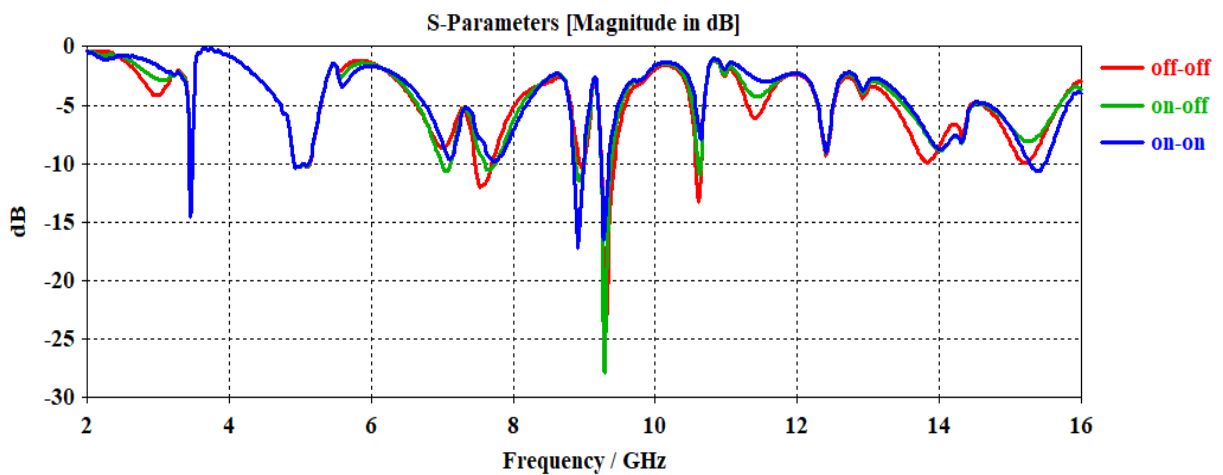


Figure IV.32: S_{11} du réseau reconfigurable avec les diodes PIN.

La figure IV.32 illustre le paramètre S_{11} en dB en fonction de la fréquence pour un réseau d'antennes reconfigurable dans trois configurations : OFF-OFF, ON-OFF et ON-ON. Chaque état représente une configuration unique des diodes PIN. Dans l'état off-off, tous les éléments sont désactivés, entraînant des résonances à 7.6, 9.2, 10.8 et 15 GHz, avec des niveaux de S_{11} dépassant -10 dB, ce qui indique une adaptation d'impédance relativement moins efficace. Dans l'état on-off, où certains éléments sont activés, la résonance principale reste proche de 9.2 GHz, mais les autres fréquences de résonance, notamment à 7 et 10.8 GHz, montrent une légère amélioration en termes

de S_{11} . Enfin, dans l'état on-on, où tous les éléments sont activés, on observe des résonances plus marquées avec des valeurs de S_{11} inférieures à -10 dB à environ 3.8, 8 et 12.5 GHz, ce qui témoigne d'une amélioration significative de l'adaptation d'impédance sur une bande de fréquences élargie. Cette capacité de l'antenne à ajuster ses caractéristiques électromagnétiques en fonction des états de ses composants permet d'adapter dynamiquement ses performances à différentes bandes de fréquences, ce qui est essentiel pour les applications en réseaux radio cognitifs et en communications satellitaires.

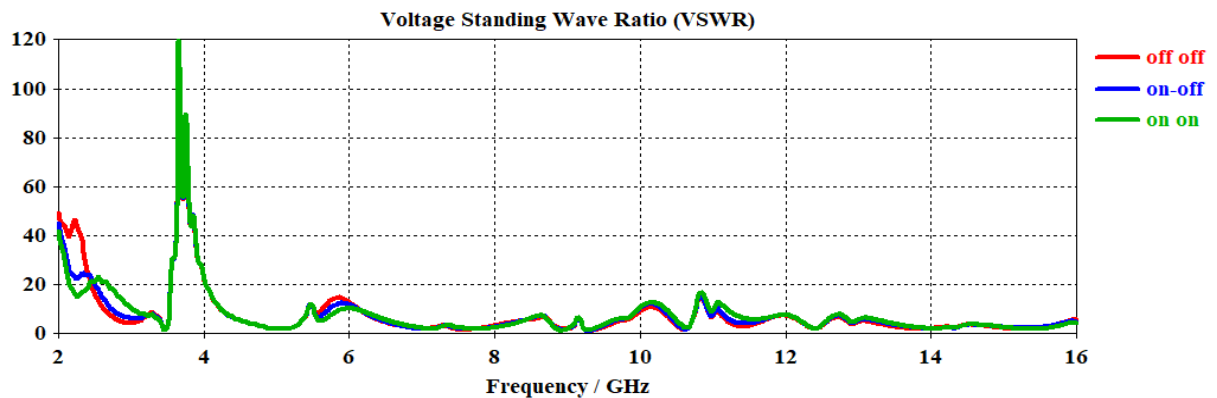


Figure IV.33: VSWR du réseau reconfigurable avec diodes PIN.

Cette figure illustre le VSWR en fonction de la fréquence pour un réseau d'antennes reconfigurable dans les trois états. Dans l'état OFF-OFF, le VSWR est élevé (jusqu'à 40) entre 2 et 4 GHz, ce qui indique une mauvaise adaptation d'impédance, mais il s'améliore au-delà de 8 GHz avec des valeurs proches de 2. L'état ON-OFF montre une amélioration dans la bande basse, bien que le VSWR reste élevé (20-30), tandis qu'au-delà de 8 GHz, les performances sont similaires à celles de l'état OFF-OFF. L'état ON-ON présente les meilleures performances globales, avec un VSWR inférieur à 2 sur les fréquences 3.8, 8 et 12.5 GHz, ce qui indique une adaptation d'impédance presque optimale et une réduction significative des pertes par réflexion.

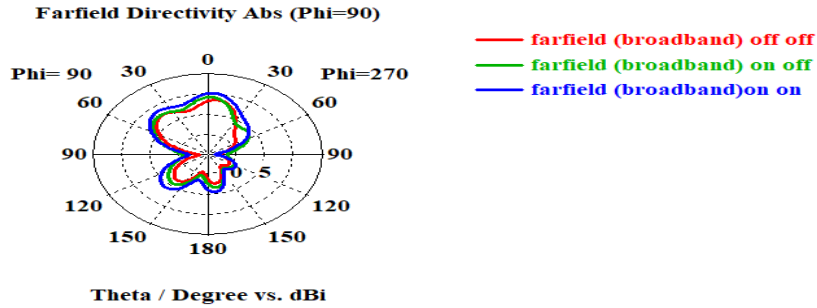


Figure IV.34: Diagramme de rayonnement en termes de directivité des trois états des diodes PIN dans le réseau reconfigurable.

Le diagramme polaire illustré dans la figure IV.34 montre la directivité en champ lointain ($\Phi = 90^\circ$) d'un réseau d'antennes reconfigurable dans les trois états.

Dans la configuration OFF-OFF, la directivité est relativement faible et présente une forme asymétrique, ce qui indique une répartition de puissance inégale et une directivité réduite. En revanche, l'état ON-OFF montre une amélioration significative, avec une symétrie accrue et une augmentation de la directivité, ce qui suggère une meilleure concentration de l'énergie rayonnée dans certaines directions. Enfin, l'état ON-ON affiche la meilleure directivité, avec un faisceau plus étroit et une intensité plus élevée, ce qui traduit une focalisation optimale de l'énergie rayonnée.

Ces variations illustrent la capacité du réseau d'antennes à adapter sa directivité en fonction des configurations des éléments reconfigurables, permettant ainsi une gestion dynamique du faisceau.

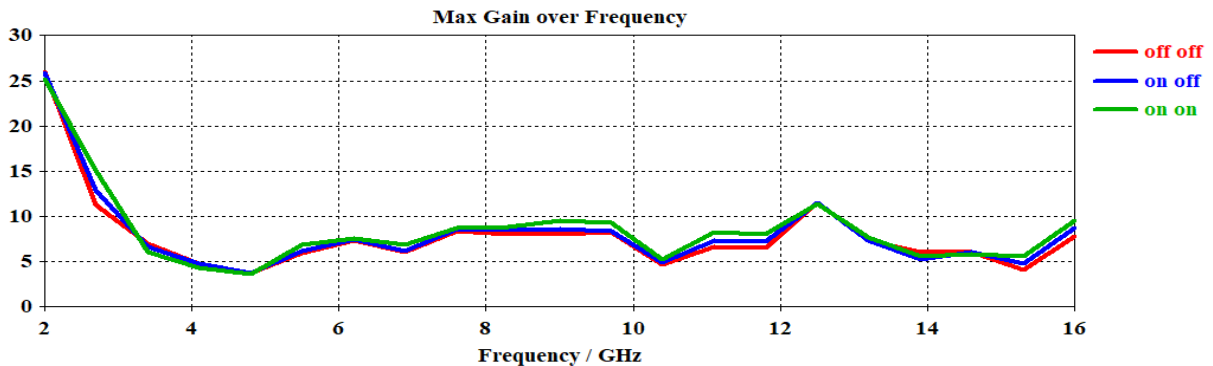


Figure IV.2: Gain du réseau reconfigurable pour les trois états des diodes PIN.

La figure IV.35 montre le gain maximal du réseau d'antennes reconfigurable en fonction de la fréquence pour les trois configurations. Dans l'état OFF-OFF, le gain maximal commence à 25 dBi à 2 GHz, mais diminue rapidement pour se stabiliser entre 5 et 10 dBi pour la gamme comprise

entre 4 et 16 GHz. L'état ON-OFF montre une légère amélioration dans la plage de 6 à 8 GHz, atteignant environ 6 dBi, ce qui indique une meilleure efficacité de rayonnement par rapport à l'état OFF-OFF. L'état ON-ON offre les meilleures performances globales, avec un gain plus stable et supérieur, atteignant près de 7 dBi dans la bande intermédiaire (6 à 8 GHz) et montrant une légère augmentation entre 10 et 12 GHz. Cette stabilité et ce gain élevé sur une large gamme de fréquences illustrent l'optimisation du réseau d'antennes dans l'état on-on, ce qui est essentiel pour les applications de communication par satellite, où une efficacité de rayonnement constante est cruciale pour garantir une couverture fiable et une qualité de signal élevée sur plusieurs bandes de fréquences.

IV.4.4 Résultats expérimentaux

Après la réalisation du réseau d'antennes, à la fois sur les faces supérieure et inférieure, par l'entreprise ALMITECH située à Kouba, Alger, en Algérie, nous avons procédé au montage du réseau. À cette fin, nous avons soudé des connecteurs de type SMA (SubMiniature version A) aux emplacements désignés pour l'excitation des antennes dans le laboratoire d'électronique à la Faculté de Technologie de l'université de Tlemcen. Ensuite, nous avons soudé les capacités et les diodes PIN au centre de développement des satellites (CDS) à Oran.

Les mesures du coefficient de réflexion des réseaux d'antennes ont été réalisées à l'aide de l'analyseur de réseau de type PNA (Perfect Network Analyser), disponible au laboratoire de Télécommunication au sein du département de télécommunication du centre de développement des technologies avancées (CDTA) à Alger.

Le prototype réalisé est illustré dans la figure ci-dessous.

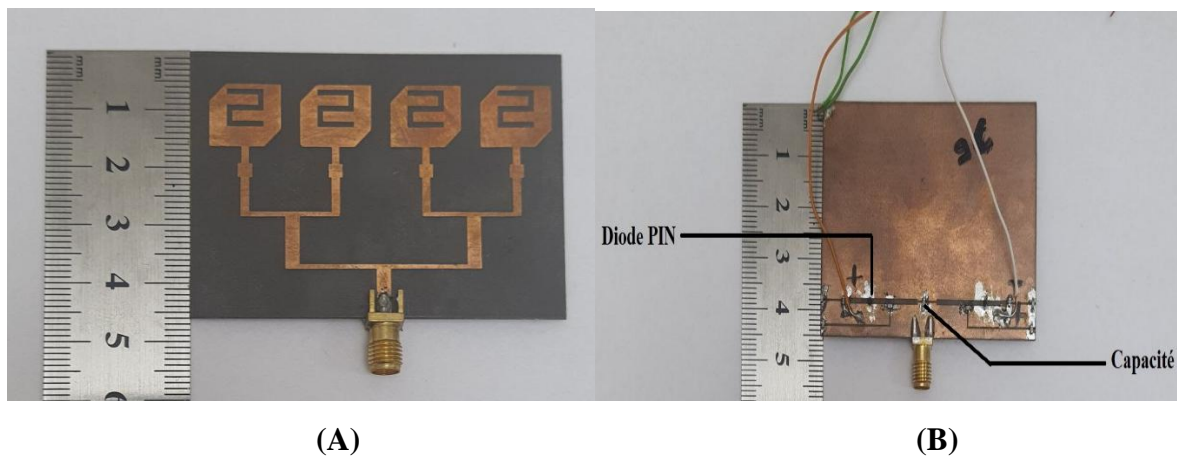
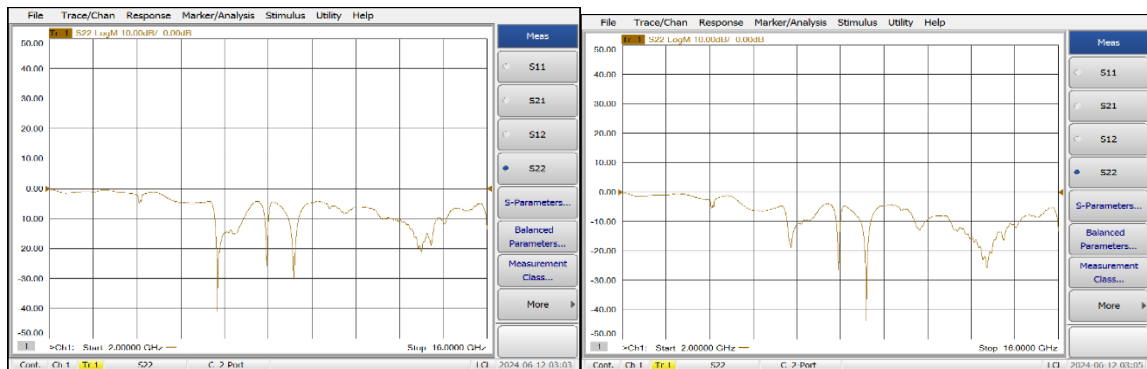


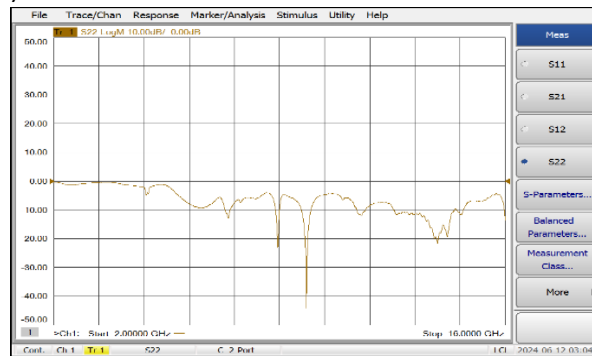
Figure IV.36: Prototype du réseau d'antennes reconfigurable : (A) : Patch ; (B) : plan de masse.

Les résultats des mesures de l'analyseur de réseau pour les trois états sont affichés dans la figure IV.37.



(A)

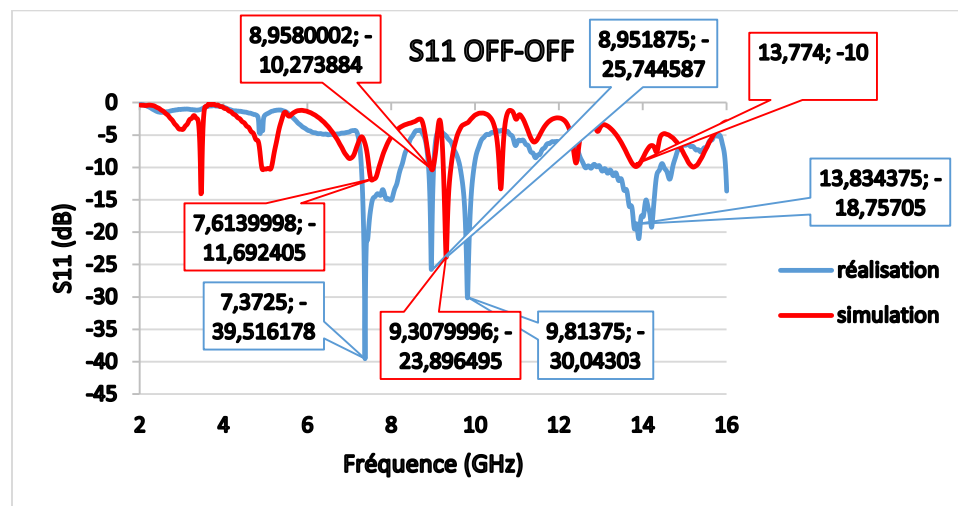
(B)



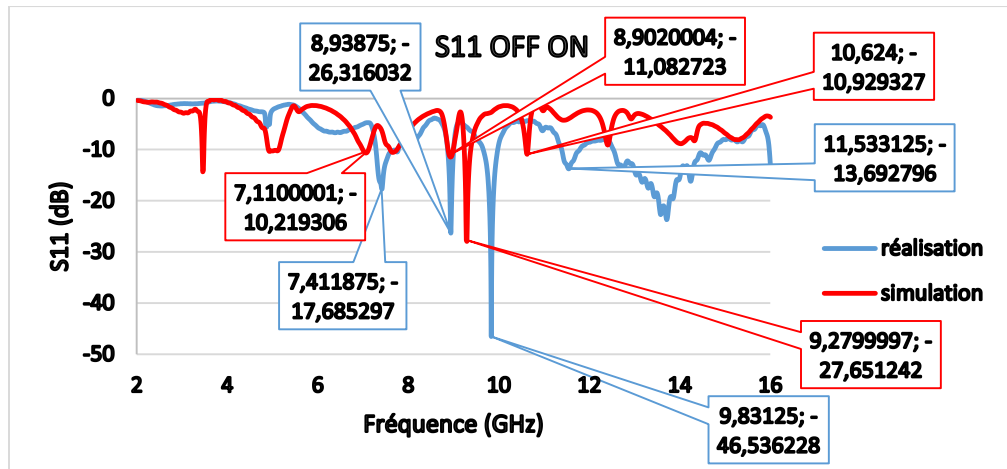
(C)

Figure IV.37: Coefficient de réflexion mesuré des trois cas : (A) : OFF-OFF ; (B) : OFF-ON ; (C) : ON-ON.

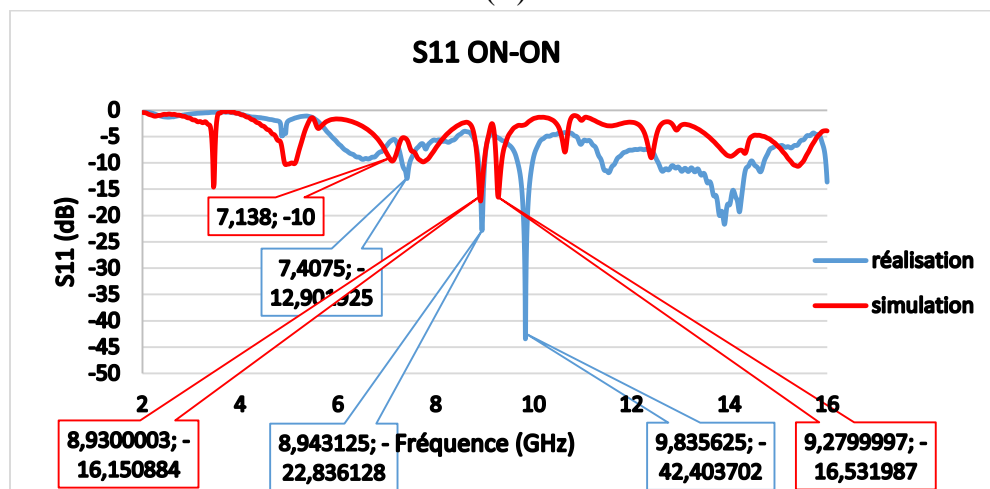
Maintenant, nous allons valider nos résultats de simulations en les comparant avec les mesures.



(A)



(B)



(C)

Figure IV.38: Comparaison entre les mesures et les simulations de différents cas du réseau reconfigurable.

Les résultats des paramètres S_{11} pour les configurations OFF-OFF, OFF-ON et ON-ON montrent une bonne concordance entre les simulations et les réalisations, confirmant la faisabilité de l'antenne reconfigurable. Les fréquences de résonance simulées, respectivement autour de 7.37 GHz, 8.95 GHz, 9.81 GHz, et 13.77 GHz pour l'état OFF-OFF, 7.11 GHz, 8.90 GHz, 10.62 GHz, et 11.53 GHz pour l'état OFF-ON, et 7.13 GHz, 8.93 GHz, 9.83 GHz pour l'état ON-ON, se retrouvent dans les réalisations avec de légers décalages attribués aux tolérances de fabrication, aux pertes dans les matériaux ou aux variations des conditions de mesure. Les profondeurs de S_{11} mesurées sont globalement en accord avec les simulations, bien que parfois légèrement atténuées en raison des pertes supplémentaires dans les connexions et les matériaux. Les résultats confirment la reconfigurabilité de l'antenne, les fréquences de résonance évoluant efficacement selon les états

de reconfiguration, validant ainsi son potentiel pour les applications satellitaires dans les bandes X et Ku, où une adaptation dynamique des fréquences est essentielle.

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de détailler la conception, la simulation, et la réalisation expérimentale des antennes reconfigurables destinées à des applications de détection de feux de forêts dans la bande C. Après avoir exploré et optimisé différentes techniques dans le chapitre précédent, nous avons sélectionné les configurations et les approches les plus adaptées pour répondre aux exigences de performance et de flexibilité du système. Les réseaux d'antennes à plusieurs éléments, ainsi que les techniques de reconfiguration basées sur les diodes PIN, ont été au cœur de cette étude, permettant de valider les concepts théoriques par des prototypes expérimentaux.

Nous avons également exploré l'utilisation des systèmes multi-agents dans un réseau radio cognitif pour améliorer la gestion des antennes reconfigurables. L'application des plateformes NETBEANS et JADE, ainsi que l'analyse des résultats expérimentaux, ont permis de confirmer l'efficacité de nos solutions proposées. Ce travail ouvre la voie à des solutions innovantes et performantes pour des systèmes de détection en temps réel, particulièrement dans des environnements dynamiques et critiques comme celui des feux de forêts et le radar satellitaire.

Conclusion Générale

Les avancées technologiques dans les systèmes de communication par satellite ont conduit à une quête incessante pour l'optimisation des performances et l'adaptabilité des antennes. L'intégration d'antennes reconfigurables dans les réseaux radio cognitifs représente une réponse novatrice à ces défis, en particulier dans le contexte des communications satellitaires. Ce type d'antenne, grâce à sa capacité à ajuster ses propriétés en temps réel, permet une gestion optimale des ressources spectrales et une adaptation aux variations environnementales.

Dans cette thèse, nous avons exploré de manière approfondie la conception, la réalisation et l'analyse des antennes reconfigurables dans les réseaux radio cognitifs destinées aux applications satellitaires. Nous avons d'abord exploré la technologie de la radio cognitive avec ces différents concepts et application, ensuite, nous avons présenté un état de l'art détaillé des antennes, en mettant l'accent sur les antennes patch et les réseaux d'antennes, tout en définissant les concepts fondamentaux des antennes reconfigurables. Une classification basée sur les mécanismes de reconfigurabilité, les matériaux employés et les applications ciblées a également été proposée pour offrir une vue structurée des technologies actuelles.

Les résultats obtenus ont démontré que l'intégration de technologies reconfigurables améliore considérablement les capacités des systèmes de communication par satellite. En particulier, les résultats expérimentaux des paramètres S_{11} qui dépasse même -40 Db pour les configurations OFF-OFF, OFF-ON et ON-ON montrent une excellente concordance entre les simulations et les réalisations, confirmant la faisabilité des antennes reconfigurables étudiées. Les fréquences de résonance simulées, respectivement autour de 7.37 GHz, 8.95 GHz, 9.81 GHz, et 13.77 GHz pour l'état OFF-OFF ; 7.11 GHz, 8.90 GHz, 10.62GHz, et 11.53 GHz pour l'état OFF-ON ; et 7.13GHz, 8.93GHz, 9.83GHz pour l'état ON-ON, se retrouvent dans les réalisations avec de légers décalages attribués aux tolérances de fabrication, aux pertes dans les matériaux ou aux variations des conditions de mesure. En outre, les valeurs de gain obtenues dépassant 10 dBi dans certaines configurations témoignent de la performance des conceptions étudiées, confirmant leur aptitude pour répondre aux exigences strictes des systèmes de communication par satellite.

Dans la continuité, nous avons intégré les antennes reconfigurables dans un scénario basé sur un système multi-agents (SMA). Ce système repose sur une plateforme de développement telle que JADE (Java Agent Development), permettant la simulation de comportements autonomes des antennes dans un environnement cognitif. Les agents intelligents ont été conçus pour gérer

dynamiquement le spectre radio, s'adapter aux variations de l'environnement et négocier efficacement l'accès au spectre entre utilisateurs primaires et secondaires. Les résultats obtenus démontrent que l'approche SMA permet d'optimiser considérablement la gestion du spectre, tout en garantissant une meilleure qualité de service.

Les simulations et réalisations ont confirmé la pertinence des approches proposées. Les résultats expérimentaux, validés par des mesures précises, montrent une réduction significative du temps de convergence de l'allocation du spectre et une amélioration notable des performances en termes de taux de réussite et de qualité de transmission. Ces avancées confirment que l'intégration des antennes reconfigurables dans un système autonome est essentielle pour répondre aux besoins croissants des systèmes de communication par satellite.

Pour l'avenir, plusieurs perspectives s'ouvrent à la suite de ce travail. Il serait intéressant d'étendre les concepts étudiés à des systèmes multi-antennes intégrés, avec une gestion adaptative basée sur des algorithmes d'intelligence artificielle. Par ailleurs, l'intégration de ces antennes reconfigurables dans des plateformes réelles, en tenant compte des contraintes liées aux applications mobiles et à l'Internet des objets, représente une opportunité de recherche prometteuse. Enfin, la prise en compte des aspects environnementaux, tels que l'utilisation de matériaux durables et la réduction de la consommation énergétique, constitue un axe crucial à explorer.

Cette thèse a contribué non seulement à l'enrichissement de nos connaissances dans le domaine des antennes reconfigurables et des réseaux radio cognitifs, mais également à proposer des solutions innovantes pour répondre aux besoins croissants des communications par satellite. Nous espérons que ces travaux seront une source d'inspiration pour les chercheurs et les ingénieurs souhaitant explorer davantage ce domaine passionnant et en constante évolution.

Liste des publications

Revues Internationales :

- 1) Taleb, R. D., Baba-Ahmed, M. Z., & Rabah, M. A. (2024). Reconfigurable graphene antenna for a network cognitive radio: A novel solution for X-band satellite communications. *Advances in Space Research*, 73(9), 4742-4750.
- 2) Baba-ahmed, M. Z., Rabah, M. A., Taleb, R. D., & Bousalah, F. (2024). Miniaturization Techniques for High-Performance Antenna Arrays in Cognitive Radio-Enabled IoT Devices. *Microwave Review*, 30(2).

Conférences Internationales :

- 1) Taleb, R. D., Baba-Ahmed, M. Z., Bousalah, F., & Rabah, M. A. (2022, November). Reconfigurable and ecological intelligent antenna for satellite communication. In *International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems* (pp. 183-188). Cham: Springer International Publishing.
- 2) Baba-Ahmed, M. Z., Rabah, M. A., Taleb, R. D., Belahcen, S. A., & Mesmoudi, M. (2023, November). Miniaturized antenna for cognitive communication in the IoT applications. In *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)* (Vol. 1, pp. 1-5). IEEE.
- 3) Taleb, R. D., Rabah, M. A., Bousalah, F., Baba-Ahmed, M. Z., & Benosman, H. (2024, July). New Design Of IoT-over-Satellite Antenna Based on Silicon Substrate. In *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC- URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)* (pp. 2797-2798). IEEE.
- 4) R.D. TALEB, M.Z. BABA-AHMED, M.A. RABAH, S. BENABBOU, M.I. SOUFI , Design and Performance Evaluation of X-Band Satellite Antenna with Frequency Reconfigurability Using Varactor Diode. *The 1 st International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies "ICAECCT'23"*.

Conférences nationales:

- 1) R.D. TALEB, M.Z. BABA-AHMED, M.A. RABAH, Overview of reconfigurable antennas for satellite applications. *Nationale conference on Telecommunication and thier Applications (CNTA'22)*.
- 2) R.D. TALEB, M.Z. BABA-AHMED, M.A. RABAH, Graphene-Enhanced Reconfigurable Antennas for Eco-Friendly Satellite Communication. *Materials Sciences And Engineering, (MSE'23)*.

Bibliographie

Chapitre I

- [1] Al-Safi, A. (2017). Architecture, Simulation, and Implementation of Commodity Computer Components in Software Defined Radio Systems (Doctoral dissertation, Western Michigan University).
- [2] Kafetzis, D., Vassilaras, S., Vardoulis, G., & Koutsopoulos, I. (2022). Software-defined networking meets software-defined radio in mobile ad hoc networks: state of the art and future directions. *IEEE Access*, 10, 9989-10014.
- [3] Kaidenko, M. M., & Roskoshnyi, D. V. (2019). Software defined radio in communications. In *Advances in Information and Communication Technologies: Processing and Control in Information and Communication Systems* (pp. 227-238). Springer International Publishing.
- [4] Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE personal communications*, 6(4), 13-18.
- [5] Capela, G. G. (2014). Development of a Software Defined Radio (SDR) for Cognitive Radio (CR) Communication Systems.
- [6] Eappen, G., & Shankar, T. (2020). A survey on soft computing techniques for spectrum sensing in a cognitive radio network. *SN Computer Science*, 1(6), 352.
- [7] Sudhahar, S., Pousia, S., Guruprasath, J., Dhanushragav, M., & Lakshminarasimman, S. (2023, December). Enhancement in 6G Intelligent Network Technologies using Cognitive Radio Network. In *2023 4th International Conference on Communication, Computing and Industry 6.0 (C216)* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Kassri, N., Ennouaary, A., Bah, S., & Baghdadi, H. (2021). A review on SDR, spectrum sensing, and CR-based IoT in cognitive radio networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6).
- [9] Manco, J., Dayoub, I., Nafkha, A., Alibakhshikenari, M., & Thameur, H. B. (2022). Spectrum sensing using Software Defined Radio for cognitive radio networks: A survey. *IEEE Access*, 10, 131887-131908.
- [10] Larbi, I., & Benmammam, B. (2014). N\`egociation de spectre dans les r\`eseaux de radio cognitive. arXiv preprint arXiv:1407.2217.
- [11] Bala, I., & Mijwil, M. M. Unlocking the Full Potential of Spectrum: A Comprehensive Review of Cognitive Radio Technology.
- [12] Jasim, M. A., Shakhathreh, H., Siasi, N., Sawalmeh, A. H., Aldabahi, A., & Al-Fuqaha, A. (2021). A survey on spectrum management for unmanned aerial vehicles (UAVs). *IEEE Access*, 10, 11443-11499.
- [13] Gupta, M. S., & Kumar, K. (2019). Progression on spectrum sensing for cognitive radio networks: A survey, classification, challenges and future research issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 143, 47-76.
- [14] Nurmi, J., & Perera, D. G. (2021, October). Intelligent cognitive radio architecture applying machine learning and reconfigurability. In *2021 IEEE Nordic circuits and systems conference (NorCAS)* (pp. 1-6). IEEE.

- [15] MZ Baba-ahmed (2015) « Études des Mécanismes d'Adaptation Autonome dans le Contexte de la Radio Cognitive » (Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen).
- [16] Mukherjee, T., & Nath, A. (2015). Cognitive Radio Network Architecture and Security Issues: A Comprehensive Study. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 5(6), 124-133.
- [17] Trigui, E. (2013). *Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive* (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Troyes).
- [18] Inonan, M., & Hussein, R. (2023). Melody: a platform-agnostic model for building and evaluating remote labs of software-defined radio technology. *IEEE Access*, 11, 127550-127566.
- [19] Cadena Munoz, E., Pedraza Martinez, L. F., & Ortiz Trivino, J. E. (2020). Detection of malicious primary user emulation based on a support vector machine for a mobile cognitive radio network using software-defined radio. *Electronics*, 9(8), 1282.
- [20] Kaur, A., & Kumar, K. (2022). A comprehensive survey on machine learning approaches for dynamic spectrum access in cognitive radio networks. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 34(1), 1-40.
- [21] Moawad, A. (2020). *Enhancement of spectrum sensing in cognitive radio: providing reliable spectral opportunities* (These de Doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest).
- [22] Idris, M. Y. I., Ahmedy, I., Soon, T. K., Yahuza, M., Tambuwal, A. B., & Ali, U. (2024). Cognitive radio and machine learning modalities for enhancing the smart transportation system: A systematic literature review. *ICT Express*.
- [23]
- [24] Islam, H., Das, S., Bose, T., & Ali, T. (2020). Diode based reconfigurable microwave filters for cognitive radio applications: A review. *IEEE Access*, 8, 185429-185444.
- [25] Zheng, R., Li, X., & Chen, Y. (2023). An Overview of Cognitive Radio Technology and Its Applications in Civil Aviation. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23. <https://doi.org/10.3390/s23136125>.
- [26] Talekar, S. (2023). Applications of Cognitive Radio Networks: A Review. *December 2022*. <https://doi.org/10.36548/jismac.2022.4.004>.
- [27] Nurelmadina, N., Hasan, M., Memon, I., Saeed, R., Ariffin, K., Ali, E., Mokhtar, R., Islam, S., Hossain, E., & Hassan, M. (2021). A Systematic Review on Cognitive Radio in Low Power Wide Area Network for Industrial IoT Applications. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su13010338>.
- [28] Nasser, A., Hassan, H., Chaaya, J., Mansour, A., & Yao, K. (2021). Spectrum Sensing for Cognitive Radio: Recent Advances and Future Challenge. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21. <https://doi.org/10.3390/s21072408>.
- [29] Benmammam, B., & Amraoui, A. (2014). Réseaux de radio cognitive: Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre. *arXiv preprint arXiv:1407.2705*.
- [30] Kaur, P., & Garg, R. (2020). AI in Cognitive Radio Networks. *Applications of Artificial Intelligence in Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2718-4.ch011>.
- [31] Al-Dulaimi, O., Al-Dulaimi, M., & Al-Dulaimi, A. (2022). Cognitive Radio Technologies and Applications in Dynamic Spectrum Access Method. *2022 IEEE 9th International Conference*

on *Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 9-14. <https://doi.org/10.1109/PICST57299.2022.10238684>.

[32] Zhu, D., & Pan, S. (2020). Broadband Cognitive Radio Enabled by Photonics. *Journal of Lightwave Technology*, 38, 3076-3088. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.2993021>.

[33] Wu, C., Wang, Y., & Yin, Z. (2018). Realizing railway cognitive radio: A reinforcement base-station multi-agent model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 1452-1467.

[34] Lohja, I., Demazeau, Y., & Verdier, C. (2020, June). A multi-agent system approach to dynamic ridesharing for older people. In *18èmes Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle, RJCIA'20* (pp. 52-59).

[35] Farrenkopf, T. (2017). *Applying semantic technologies to multi-agent models in the context of business simulations* (Doctoral dissertation).

[36] Sulis, E., Mariani, S., & Montagna, S. (2023). A survey on agents applications in healthcare: opportunities, challenges and trends. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 236, 107525.

[37] Obushnyi, S., Virovets, D., Hulak, H., & Zhurakovskiy, B. (2022). Autonomy of Economic Agents in Peer-to-Peer Systems. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems 2022*, 3288(1), 125-133.

[38] Baird, A., & Maruping, L. M. (2021). The Next Generation of Research on IS Use: A Theoretical Framework of Delegation to and from Agentic IS Artifacts. *MIS quarterly*, 45(1).

[39] Charbonnier, F., Morstyn, T., & McCulloch, M. D. (2022). Scalable multi-agent reinforcement learning for distributed control of residential energy flexibility. *Applied Energy*, 314, 118825.

[40] Lee, S. K., Kavva, P., & Lasser, S. C. (2021). Social interactions and relationships with an intelligent virtual agent. *International Journal of Human-Computer Studies*, 150, 102608.

[41] Garapati, S. S. (2022). *Idle time driven decision making by Always-On Agents* (Doctoral dissertation, International Institute of Information Technology, Hyderabad).

[42] Benmamar, B. (2015). Allocation de ressources dans un r {\e}seau de radio cognitive en utilisant JADE. *arXiv preprint arXiv:1507.01665*.

[43] Petrović, V. (2022). Application of virtual worlds in agent theory research and engineering education. *Универзитет у Београду*.

[44] Ma, T. Y. (2007). Dynamic travel behaviour modelling based on activity.

[45] Cheng, Y., Zhang, C., Zhang, Z., Meng, X., Hong, S., Li, W., ... & He, X. (2024). Exploring large language model based intelligent agents: Definitions, methods, and prospects. *arXiv preprint arXiv:2401.03428*.

[46] Saadi, A., Maamri, R., & Sahnoun, Z. (2020). Behavioral flexibility in Belief-Desire-Intention (BDI) architectures. *Multiagent and grid systems*, 16(4), 343-377.

[47] Taillandier, P., Therond, O., & Gaudou, B. (2012). Une architecture d'agent BDI basée sur la théorie des fonctions de croyance: application a la simulation du comportement des agriculteurs. In *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents* (pp. 107-116). Cépadués.

- [48] Lazarowska, A., & Žak, A. (2022). A Concept of Autonomous Multi-Agent Navigation System for Unmanned Surface Vessels. *Electronics*, 11(18), 2853.
- [49] Petrus, M., Nahodil, P., & Svato, V. (2001). Interactions in community of behaviour-based agents. In *Proceedings of the IASTED International Conference EUNITE* (Vol. 1).
- [50] Michel, F., Ferber, J., & Drogoul, A. (2018). Multi-agent systems and simulation: A survey from the agent community's perspective. In *Multi-Agent Systems* (pp. 17-66). CRC Press.
- [51] Chang, L., Shan, L., Jiang, C., & Dai, Y. (2021). Reinforcement based mobile robot path planning with improved dynamic window approach in unknown environment. *Autonomous robots*, 45, 51-76.
- [52] Franco, A. (2023). *Study on reinforcement-learning-based decision-making and planning in the context of non-deterministic scenarios* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- [53] Dulberg, Z., Dubey, R., Berwian, I. M., & Cohen, J. D. (2023). Having multiple selves helps learning agents explore and adapt in complex changing worlds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(28), e2221180120.
- [54] Priorelli, M., & Stoianov, I. P. (2024). Slow but flexible or fast but rigid? discrete and continuous processes compared. *Heliyon*, 10(20).
- [55] Amiri, M. M., Heydarizadeh, M., Zarifi, R., & Bagheri, H. R. (2024). A Literature Review on Bilateral Contracts in Electricity Markets; Perspectives and Challenges. *Research and Technology in the Electrical Industry*, 3(2), 340-350.
- [56] Du, Y., Leibo, J. Z., Islam, U., Willis, R., & Sunehag, P. (2023). A review of cooperation in multi-agent learning. *arXiv preprint arXiv:2312.05162*.
- [57] Dorri, A., Kanhere, S. S., & Jurdak, R. (2018). Multi-agent systems: A survey. *Ieee Access*, 6, 28573-28593.
- [58] Hedjeres, M. (2018). *Contribution à la conception et à la mise en oeuvre d'Architectures Orientées Services (SOA) dans un environnement coopératif MAeMSOS: une plateforme multi agents orientée Services pour la e-maintenance* (Thèse de Doctorat).
- [59] Diakonoff, H., Felizardo, R., Thomas, H., & Clément, C. (2022). Mise au point sur les possibilités d'usage de la blockchain en médecine légale. *La Revue de Médecine Légale*, 13(1), 23-29.
- [60] Benmammar, B. (2018). Etat de l'art sur les techniques d'Accès Dynamique au Spectre dans les Réseaux de Radio Cognitive.
- [61] NORA, Abderezzek. "Développement d'un Système de Stationnement Intelligent Basé Agents." 2022. Thèse de doctorat. University Center of Abdalhafid Boussouf-MILA

Chapitre II

- [1] Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- [2] Asadchy, V. S., Mirmoosa, M. S., Díaz-Rubio, A., Fan, S., & Tretyakov, S. A. (2020). *Tutorial on electromagnetic nonreciprocity and its origins*. *Proceedings of the IEEE*, 108(10), 1684-1727.

- [3] Mak, Chi Lun, et al. "Antenna for use in electronic communication systems." U.S. Patent No. 10,862,220. 8 Dec. 2020.
- [4] Ibrahim, H. H., Singh, M. S., Al-Bawri, S. S., & Islam, M. T. (2020). Synthesis, characterization and development of energy harvesting techniques incorporated with antennas: A review study. *Sensors*, 20(10), 2772.
- [5] Roohi, R., Attari, A. R., Majedi, M. S., & Lambot, S. (2024). Prediction of Antenna Reflection Coefficient in Presence of Multilayer Media: A Fast Spectral Domain Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- [6] Jarvis, R. E., Mattingly, R. G., & McDaniel, J. W. (2021). UHF-band radar cross section measurements with single-antenna reflection coefficient results. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-4.
- [7] Saeed, M. H. R. (2022). Design and simulation of rectangular microstrip patch antennas (45 GHz and 60 GHz) for V-band applications. *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(2), 100-104.
- [8] Prabowo, A. S., Pambudiyatno, N., & Harianto, B. B. (2021, March). Microstrip Antenna Design with Patch Rectangler for Primary Surveillance Radar (PSR) L-Band Application. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1845, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- [9] Le, T. T., Kim, Y. D., & Yun, T. Y. (2022). Bandwidth-enhanced compact circularly-polarized wearable antenna with a magneto-electric dipole. *IEEE Access*, 10, 123225-123232.
- [10] Chaouche, Y. B. (2019). *Conception d'Antennes Planaires Reconfigurables pour Opération Large Bande et Multi-Bande* (Thèse de Doctorat, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj (Algérie)).
- [11] Maeng, S. J., Kwon, H., Ozdemir, O., & Güvenç, I. (2023). Impact of 3D antenna radiation pattern in UAV air-to-ground path loss modeling and RSRP-based localization in rural area. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*.
- [12] Xiao, Y., Lu, W. J., Zhao, M. L., Liu, L., & Zhu, L. (2023). Triple-mode resonant backfire feed antenna with nearly equal E-/H-plane and inverse taper patterns. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70(6), 1946-1950.
- [13] Weng, W. C., Yang, F., & Elsherbeni, A. Z. (2022). *Electromagnetics and antenna optimization using Taguchi's method*. Springer Nature.
- [14] Liao, Q., Fonseca, N. J., Camacho, M., Palomares-Caballero, Á., Mesa, F., & Quevedo-Teruel, O. (2023). Ray-tracing model for generalized geodesic-lens multiple-beam antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(3), 2640-2651.
- [15] Joska, J. M. K. (2016). *Influence de la PIRE sur la transmission par satellite Géostationnaire*. Éditions universitaires européennes.
- [16] Mathivanan, S., & Rajeswari, A. (2022). Omnidirectional Microstrip MIMO Antenna for Intelligent Vehicle RADAR Communication. *Wireless Personal Communications*, 127(4), 3407-3421.
- [17] Aydin, E., & Aykac, R. E. (2023). The Effect of Antenna Spacing on Active S-Parameters in Planar Array Antennas. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 24, 29-36.

- [18] Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design. John Wiley & sons.
- [19] Abotalebi, S. (2023). Ultra-Wideband UHF/VHF Electrically Small Antennas and Ultra-Wideband S-Band and C-Band Compact Form-Factor Antennas (Master's thesis, New Mexico State University).
- [20] Krouka, W. (2021). Caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante: apport du brassage et mise en place d'une méthode sans contact (thèse de Doctorat, Université Gustave Eiffel).
- [21] Lynch, D. P., Tentzeris, M. M., Fusco, V., & Asimonis, S. D. (2024). Super realized gain antenna array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- [22] Andrews, S. S. (2023). Electromagnetic Waves. In *Light and Waves: A Conceptual Exploration of Physics* (pp. 273-305). Cham: Springer International Publishing.
- [23] Sarath, J. V., Bindu, P., Biju, K. S., & RANI, L. (2021). Review of Antennas used in FPV/WLAN Applications. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 14(1), 29-40.
- [24] Özdemir, Z. (2022). Kinematical modeling of circular and elliptical polarization of the polarized light via screw transformation. *Physica Scripta*, 97(2), 025502.
- [25] Aissaoui, D. (2019). *Etude et conception d'antennes fractales pour des applications ultra-large-bande* (These de doctorat).
- [26] Selvan, S., Zaman, M., Gobbi, R., & Wong, H. Y. (2018). Recent advances in the design and development of radio frequency-based energy harvester for powering wireless sensors: a review. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(16), 2110-2134.
- [27] Ramya, K., Dayal, P. S., & Raju, G. S. N. (2020). Comprehensive Background of Antennas for Modern & State of Art Applications. *Solid State Technology*, 63(5), 9331-9347.
- [28] Feng, H., Li, M., Zhang, Z., Fu, J., Zhang, Q., & Zhao, Y. (2023). Low-Profile Broadband Dual-Polarized Dipole Antenna for Base Station Applications. *Sensors*, 23(12), 5647.
- [29] Zhou, H., Geng, J., & Jin, R. (2022). A magnetic Yagi-Uda antenna with vertically polarized endfire radiation in millimeter-wave band applying higher order mode. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(10), 8941-8950.
- [30] Shah, S. I. H., Bashir, S., Ashfaq, M., Altaf, A., & Rmili, H. (2021). Lightweight and low-cost deployable origami antennas—A review. *IEEE Access*, 9, 86429-86448.
- [31] Reis, J. R., Ribeiro, C., & Caldeirinha, R. F. (2021). Compact 3D-printed reflector antenna for radar applications at K-band. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 15(8), 843-854.
- [32] Mishra, B., Singh, A. K., Satheesha, T. Y., Verma, R. K., & Singh, V. (2024). From Past to Present: A Comprehensive Review of Antenna Technology in Modern Wireless Communication. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 17(3).
- [33] Ullah, M. A., Keshavarz, R., Abolhasan, M., Lipman, J., Esselle, K. P., & Shariati, N. (2022). A review on antenna technologies for ambient RF energy harvesting and wireless power transfer: Designs, challenges and applications. *IEEE Access*, 10, 17231-17267.
- [34] Tadesse, A. D., Acharya, O. P., & Sahu, S. (2020). Application of metamaterials for performance enhancement of planar antennas: A review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(5), e22154.

- [35] Ghaderi, M. R., & Amiri, N. (2024). CubeSat Antenna Designs in the Last 2 Decades (2002–2023): A Survey. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 1-49.
- [36] OEPB, B. (2015). Design, Construction and Performance Analysis of Helical Antenna Operating at 5.8ghz. vol, 2, 29-38.
- [37] Gebhart, M., & Bauernfeind, T. (2020). Loop Antennas for Near-Field Communication. In *Compendium on Electromagnetic Analysis: From Electrostatics to Photonics: Fundamentals and Applications for Physicists and Engineers Volume 3 Antennas, Antenna Arrays and Microwave Devices* (pp. 245-298).
- [38] Al-Zahrani, A. Y., & Najim, M. (2024). Design and Implementation of a High Gain Hexagon Loop Antenna for 5G and WLAN Application. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 15620-15624.
- [39] Al-Shaikhli, W. (2020). *Numerical Analysis of Helical and Log-periodic Antennas for Short Pulse Applications*. University of Missouri-Kansas City.
- [40] Karmakar, A. (2021). Fractal antennas and arrays: A review and recent developments. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13(2), 173-197.
- [41] Husain, A., Nanda, M. N., Chowdary, M. S., & Sajid, M. (2022). Fractals: An eclectic survey, part II. *Fractal and Fractional*, 6(7), 379.
- [42] Karim, R., Iftikhar, A., Ijaz, B., & Mabrouk, I. B. (2019). The potentials, challenges, and future directions of on-chip-antennas for emerging wireless applications—A comprehensive survey. *IEEE Access*, 7, 173897-173934.
- [43] Elnady, S. M., Abd El-Hameed, A. S., & Ouf, E. G. (2024). Innovative K-band slot antenna array for radar applications. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 11(1), 34.
- [44] Srinath, S. Design and Electromagnetic Modeling of E-Plane Sectoral Horn Antenna For Ultra Wide Band Applications On WR-137 & WR-62 Waveguides. *International Journal of Engineering and Science Invention*, 3(7), 11-17.
- [45] Xu, R., Gao, S., Izquierdo, B. S., Gu, C., Reynaert, P., Standaert, A., ... & Li, D. (2020). A review of broadband low-cost and high-gain low-terahertz antennas for wireless communications applications. *Ieee Access*, 8, 57615-57629.
- [46] Parasuraman, S., Yogeewaran, S., & Ramesh, G. P. (2020, September). Design of Microstrip Patch Antenna with improved characteristics and its performance at 5.1 GHz for Wireless Applications. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 925, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- [47] Al-Khaffaf, D. A. J., & Alshimaysawe, I. A. (2021). Miniaturised tri-band microstrip patch antenna design for radio and millimetre waves of 5G devices. *Indones J Electr Eng Comput Sci*, 21, 1594-601.
- [48] H Patel, D., & D Makwana, G. (2021). A comprehensive review on multi-band microstrip patch antenna comprising 5G wireless communication. *International Journal of Computing and Digital System*.
- [49] Messoudene, M. (2016). *Modélisation par modèle équivalent amélioré des antennes périodiques et log-périodiques à base d'éléments rayonnants à encoche : Applications aux télécommunications sans fil* (Thèse de Doctorat).

- [50] Rana, M. S., Hossain, S., Rana, S. B., & Rahman, M. M. (2023). Microstrip patch antennas for various applications: a review. *Indonesian journal of Electrical Engineering and computer science*, 29(3), 1511-1519.
- [51] Sharma, A., & Jaglan, N. (2019). Design of Microstrip Patch Antenna for Practical Applications.
- [52] Kaur, A., & Malik, P. K. (2021). Multiband Elliptical Patch Fractal and Defected Ground Structures Microstrip Patch Antenna for Wireless Applications. *Progress In Electromagnetics Research B*, 91.
- [53] Sarkar, M., Singh, A., Gupta, S., & Hassaniien, A. E. (2020). Smart antenna design for high-speed moving vehicles with minimum return loss. *International Journal of Communication Systems*, 33(11), e4414.
- [54] Bansal, A., & Gupta, R. (2020). A review on microstrip patch antenna and feeding techniques. *International Journal of Information Technology*, 12(1), 149-154 .
- [55] Yusuf, S., Zakariyya, S. O., & Agbon, E. (2024). Exploring microstrip feeding techniques for 5G and beyond enhanced antenna performance. *International Journal of Applied and Advanced Engineering Research*.
- [56] Samat, A. A., Zaidel, D. N. K. A., Mat, D. A. A., Sharip, M. R. M., Zaidel, D. N. A., Muhamad, I. I., & Then, Y. L. (2020, October). Surface current distribution and performance analysis of different feeding techniques for microstrip patch antenna. In *2020 13th International UNIMAS Engineering Conference (EnCon)* (pp. 1-5). IEEE.
- [57] Nguyen, D. M., Au, N. D., & Seo, C. (2022). Aperture-coupled patch antenna with flat-top beam for microwave power transmission. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(10), 2130-2134.
- [58] Zhang, T., Li, L., Xie, M., Xia, H., Ma, X., & Cui, T. J. (2017). Low-cost aperture-coupled 60-GHz-phased array antenna package with compact matching network. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6355-6362.
- [59] Firdausi, A., Hendrantoro, G., Setijadi, E., & Alaydrus, M. (2023). Analysis and Improvement of Bandwidth and Gain of Millimeter-Wave Microstrip Franklin Antenna With Proximity-Coupled Feed. *IEEE Access*.
- [60] Sabeti, S. M., Zehforoosh, Y., & Mohammadi, P. (2024). A Low-Profile Stacked ME Dipole Antenna Loaded with High-Permittivity Dielectric for 5G Applications. *IEEE Access*.
- [61] Rocha, A., Mota, S., & Sousa, M. (2019). A Demonstrator for Impedance Matching Systems in Transmission Lines With Time and Frequency Simulation [Education Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 61(3), 92-103.
- [62] Hadžić, H., Verzotti, W., Blažević, Z., & Škiljo, M. (2015, September). 2.4 GHz microstrip patch antenna array with suppressed sidelobes. In *2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)* (pp. 96-100). IEEE.
- [63] Ahmad, H. J., & Mahmood, F. M. (2024). Single and Double Stub Tuner Impedance Matching of Microwave Circuits Using Mathcad Software. *Cihan University-Erbil Scientific Journal*, 8(2), 1-8.

- [64] Ma, Z., Chen, J., Li, C., & Jiang, Y. (2023). A monopole broadband circularly polarized antenna with coupled disc and folded microstrip stub lines. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2023(1), 30.
- [65] Adam, I., Yasin, M. N. M., Aziz, M. E. A., & MI, S. (2019). Rectifier for RF energy harvesting using stub matching. *Indonesia Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(3).
- [66] Karmakar, A. (2021). Fractal antennas and arrays: A review and recent developments. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13(2), 173-197.
- [67] Kanbaz, I., Yurduseven, O., & Matthaïou, M. (2024, March). Optimization of Super-Directive Linear Arrays with Differential Evolution for High Realized Gain. In *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). IEEE.
- [68] El Hassani, O., & Saadi, A. (2023). Towards a full design of a super-wide band slotted antenna array using graphene material for future 6G applications. *Results in Optics*, 11, 100427.
- [69] Maharjan, J., & Choi, D. Y. (2020). Four-element microstrip patch array antenna with corporate-series feed network for 5G communication. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2020(1), 8760297.
- [70] Wang, X., Kou, X., Li, H., Wang, F., Fang, D., Ma, Y., & Chen, X. (2022). AllSpark: Enabling long-range backscatter for vehicle-to-infrastructure communication. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(24), 25525-25537.
- [71] Kota, M. R., Abejide, A. E., Pandey, S., Aboderin, O., & Teixeira, A. (2020, July). Silicon nitride 60 GHz antenna for IoT applications. In *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)* (pp. 1-5). IEEE.
- [72] Pawar, S. (2017). A review on reconfigurable antenna analysis and switch technologies. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 3(4), 6-12.
- [73] Zhang, M., Xu, G., & Gao, R. (2024). Reconfigurable Antennas for Wireless Communication: Design Mechanism, State of the Art, Challenges, and Future Perspectives. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2024(1), 3046393.
- [74] Beneck, R. J., Das, A., Mackertich-Sengerdy, G., Chaky, R. J., Wu, Y., Soltani, S., & Werner, D. (2021). Reconfigurable antennas: A review of recent progress and future prospects for next generation. *Progress In Electromagnetics Research*, 171, 89-121.
- [75] Ahmad, I., Dildar, H., Khan, W. U. R., Ullah, S., Ullah, S., Albreem, M. A., ... & Uthansakul, P. (2021). Frequency reconfigurable antenna for multi standard wireless and mobile communication systems. *Computers, Materials & Continua*, 68(2), 2563-2578.
- [76] Shah, I. A., Hayat, S., Basir, A., Zada, M., Shah, S. A. A., & Ullah, S. (2019). Design and analysis of a hexa-band frequency reconfigurable antenna for wireless communication. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 98, 80-88.
- [77] Iqbal, A., Smida, A., Abdulrazak, L. F., Saraereh, O. A., Mallat, N. K., Elfergani, I., & Kim, S. (2019). Low-profile frequency reconfigurable antenna for heterogeneous wireless systems. *Electronics*, 8(9), 976.

- [78] Nguyen, T., Bui, C., Narbudowicz, A., & Nguyen-Trong, N. (2023). Frequency-Reconfigurable Antenna With Wide- and Narrowband Modes for Sub-6 GHz Cognitive Radio. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22, 64-68.
- [79] Subbaraj, S., & Thomas, S. B. (2023). Reconfigurable antennas and their practical applications—a review. *Radio Science*, 58(9), 1-13.
- [80] Kang, L., Li, H., Zhou, J., & Zheng, S. (2020). An OAM-mode reconfigurable array antenna with polarization agility. *IEEE Access*, 8, 40445-40452.
- [81] Alhamad, R., Almajali, E., & Mahmoud, S. (2023). Electrical reconfigurability in modern 4g, 4g/5g and 5g antennas: A critical review of polarization and frequency reconfigurable designs. *IEEE Access*, 11, 29215-29233.
- [82] Jaiswal, R. K., Dutta, R. K., Das, G., Ojha, A. K., & Srivastava, K. V. (2023). Circularly polarized three-element MIMO antenna with diversity and polarization reconfigurability techniques. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 162, 154566.
- [83] Nachouane, H. (2017). *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* (Thèse de Doctoral, Institut National des Postes et Télécommunications).
- [84] Isa, S. R., Jusoh, M., Sabapathy, T., Nebhen, J., Kamarudin, M. R., Osman, M. N., ... & Soh, P. J. (2022). Reconfigurable Pattern Patch Antenna for Mid-Band 5G: A Review. *Computers, Materials & Continua*, 70(2).
- [85] Iqbal, A., Smida, A., Mallat, N. K., Ghayoula, R., Elfergani, I., Rodriguez, J., & Kim, S. (2019). Frequency and pattern reconfigurable antenna for emerging wireless communication systems. *Electronics*, 8(4), 407.
- [86] Dubal, S., & Chaudhari, A. (2020, January). Mechanisms of reconfigurable antenna: A review. In *2020 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)* (pp. 576-580). IEEE.
- [87] Cano, H. P. Z., Zaharis, Z. D., Yioultsis, T. V., Kantartzis, N. V., & Lazaridis, P. I. (2022). Pattern reconfigurable antennas at millimeter-wave frequencies: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 10, 83029-83042.
- [88] Bikrat, M., Bri, S., Bravo, A. G., Manterola, A. M., Gonzalez-Atienza, M., & Amador, F. (2023). A Multi-Bandwidth Reconfigurable Patch Antenna for Devices in WLAN and UWB Technology Applications. *Applied Sciences*, 13(16), 9367.
- [89] MallikharjunaRao, S., SettyVennelaSrujana, T., & Bindu, G. B. (2022). Design and Analysis of Reconfigurable Antenna for Wide Band Applications. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2161, No. 1, p. 012073). IOP Publishing.
- [90] Jabber, A. A., & Thaher, R. H. (2020). Compact tri-band T-shaped frequency reconfigurable antenna for cognitive radio applications. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(1), 212-220.
- [91] Tripathi, S. K., & Tiwari, B. B. (2024). Design and analysis of multiband reconfigurable slot antenna for S, C, and X-band applications. *Journal of Integrated Science and Technology*, 12(3), 766-766.

- [92] Kang, L., Li, H., Tang, B., Wang, X., & Zhou, J. (2021). Quad-polarization-reconfigurable antenna with a compact and switchable feed. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(4), 548-552.
- [93] García, E., Andújar, A., & Anguera, J. (2024). Overview of Reconfigurable Antenna Systems for IoT Devices. *Electronics*, 13(20), 3988.
- [94] Deng, Z., Wang, Y., & Lai, C. (2023). Design and analysis of pattern reconfigurable antenna based on RF MEMS switches. *Electronics*, 12(14), 3109.
- [95] Han, S., Wang, Z., & Dong, Y. (2024). Miniaturized Circularly Polarized Reconfigurable Capacitance-Loaded Patch Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.
- [96] Karthika, K., & Kavitha, K. (2021). Reconfigurable antennas for advanced wireless communications: A review. *Wireless Personal Communications*, 120(4), 2711-2771.
- [97] Da Costa, I. F., Cerqueira, A., Spadoti, D. H., Da Silva, L. G., Ribeiro, J. A. J., & Barbin, S. E. (2017). Optically controlled reconfigurable antenna array for mm-wave applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2142-2145.
- [98] Nichols, M. W., Gonzalez, A., Alwan, E. A., & Volakis, J. L. (2023). An accordion-folding series-fed patch array with finite thickness: A folding technique for CubeSat arrays. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 65(3), 77-82.
- [99] Luo, C. W., Zhao, G., Jiao, Y. C., Chen, G. T., & Yan, Y. D. (2021). Wideband 1 bit reconfigurable transmitarray antenna based on polarization rotation element. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(5), 798-802.
- [100] Damgaci, Y., & Cetiner, B. A. (2013). A frequency reconfigurable antenna based on digital microfluidics. *Lab on a Chip*, 13(15), 2883-2887.
- [101] Tawk, Y., Costantine, J., & Christodoulou, C. G. (2010, July). A frequency reconfigurable rotatable microstrip antenna design. In *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 1-4). IEEE.
- [102] Mohanta, H. C., Kouzani, A., & Mandal, S. K. (2019). Reconfigurable antennas and their applications.
- [103] Shu, J., Peng, H. L., Zhang, Y. P., & Mao, J. F. (2018, October). A dual polarized pattern reconfigurable antenna array using liquid crystal phase shifter. In *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)* (pp. 1-2). IEEE.
- [104] Jin, Z., Rong, Y., Yu, J., & Wu, F. (2024). Design of a Compound Reconfigurable Terahertz Antenna Based on Graphene. *Plasmonics*, 19(2), 621-629.
- [105] Sirisha Mrunalini, L. N., & Arun, M. (2024). Reconfigurable fork shaped plasmonic graphene based nano-patch antenna for wireless network-on-chip application in THz band. *Optical and Quantum Electronics*, 56(2), 233.
- [106] Zhang, X., Cunjun, R., Dai, J., Ding, Y., Ullah, S., & Kosar Fahad, A. (2021). Design of a reconfigurable antenna based on graphene for terahertz communication. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 34(5), e2911.
- [107] Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I., M. Abdulkhaleq, A., & A. Abd-Alhameed, R. (2020). Reconfigurable antennas: Switching techniques—A survey. *Electronics*, 9(2), 336.

- [108] Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R. (2017, September). An adaptive reconfigurable antenna for cognitive radio system. In *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)* (pp. 1121-1125). IEEE.
- [109] Bahari, N., Yob, R. C., & Zahid, L. (2020, September). A Switchless Pentagon-shaped Reconfigurable Antenna for Radar Applications. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 932, No. 1, p. 012083). IOP Publishing.
- [110] Li, M., Zhang, Z., Tang, M. C., Zhu, L., & Liu, N. W. (2021). Bandwidth enhancement and size reduction of a low-profile polarization-reconfigurable antenna by utilizing multiple resonances. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(2), 1517-1522.

Chapitre III

- [1] Aram, M. G. (2022). *Antenna Design, Radiobiological Modelling, and Non-Invasive Monitoring for Microwave Hyperthermia*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
- [2] Moradi, K., Pourziad, A., & Nikmehr, S. (2021). A frequency reconfigurable microstrip antenna based on graphene in Terahertz Regime. *Optik*, 228, 166201.
- [3] Fakharian, M. M. (2022). A graphene-based multi-functional terahertz antenna. *Optik*, 251, 168431.
- [4] Kiani, N., Hamedani, F. T., Rezaei, P., Chashmi, M. J., & Danaie, M. (2020). Polarization controlling approach in reconfigurable microstrip graphene-based antenna. *Optik*, 203, 163942.
- [5] Shehu, A. A., & Yunusa, Z. (2019). Graphene-based microstrip patch antenna for x-band application. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 3(2), 57-65.
- [6] Taleb, R. D., Baba-Ahmed, M. Z., & Rabah, M. A. (2024). Reconfigurable graphene antenna for a network cognitive radio: A novel solution for X-band satellite communications. *Advances in Space Research*, 73(9), 4742-4750.
- [7] Marhoon, H. M., Abdulnabi, H. A., & Al-Aboosi, Y. Y. (2022). Designing and Analysing of a Modified Rectangular Microstrip Patch Antenna for Microwave Applications. *J. Commun.*, 17(8), 668-674.
- [8] Khan, M. A. K., Ullah, M. I., & Alim, M. A. (2021). High-gain and ultrawide-band graphene patch antenna with photonic crystal covering 96.48% of the terahertz band. *Optik*, 227, 166056.
- [9] Nie, Y., Kacica, C., Meyer, M. E., Green, R. D., & Biswas, P. (2018). Graphene synthesized as by-product of gas purification in long-term space missions and its lithium-ion battery application. *Advances in Space Research*, 62(5), 1015-1024.
- [10] Bunea, A. C., Neculoiu, D., Dragoman, M., Konstantinidis, G., & Deligeorgis, G. (2015, September). X band tunable slot antenna with graphene patch. In *2015 European Microwave Conference (EuMC)* (pp. 614-617). IEEE.
- [11] Sa'don, S. N. H., Jamaluddin, M. H., Kamarudin, M. R., Ahmad, F., Yamada, Y., Kamardin, K., & Idris, I. H. (2019). Analysis of graphene antenna properties for 5G applications. *Sensors*, 19(22), 4835.

- [12] Ghaffar, A., Li, X. J., Awan, W. A., & Hussain, N. (2020, August). A compact multiband multi-mode frequency reconfigurable antenna for portable devices. In *2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)* (pp. 1-4). IEEE.
- [13] Khan, T., Rahman, M., Akram, A., Amin, Y., & Tenhunen, H. (2019). A low-cost CPW-fed multiband frequency reconfigurable antenna for wireless applications. *Electronics*, 8(8), 900.
- [14] Ahmad, A., Lee, G. O., & Choi, D. Y. (2023). Design and performance evaluation of a Compact frequency-reconfigurable coplanar-waveguide-Fed slotted Patch Antenna for Multi-band Wireless Communication. *Electronics*, 12(18), 3889.
- [15] Taleb, R. D., Baba-Ahmed, M. Z., Bousalah, F., & Rabah, M. A. (2022, November). Reconfigurable and ecological intelligent antenna for satellite communication. In *International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems* (pp. 183-188). Cham: Springer International Publishing.

Chapitre IV

- [1] Mansoul, A., & Ghanem, F. (2018). Frequency reconfigurable antenna for cognitive radios with sequential UWB mode of perception and multiband mode of operation. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10(9), 1096-1102.
- [2] Jensen, C., & Scacchi, W. (2011). License update and migration processes in open source software projects. In *Open Source Systems: Grounding Research: 7th IFIP WG 2.13 International Conference, OSS 2011, Salvador, Brazil, October 6-7, 2011. Proceedings 7* (pp. 177-195). Springer Berlin Heidelberg.
- [3] Natal, B. P. G. (2024). A MQTT-based solution as an enabler of interoperability between MAS frameworks to manage a self-organized conveyor system (Doctoral dissertation).
- [4] Taleb, R. D., Baba-Ahmed, M. Z., & Rabah, M. A. (2024). Reconfigurable graphene antenna for a network cognitive radio: A novel solution for X-band satellite communications. *Advances in Space Research*, 73(9), 4742-4750.