

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE ET IDENTIFICATION DES AMÉLIORATIONS D'ANTENNE À MICRO-
BANDE DANS UN RÉSEAU PHASÉ MINIATURISÉ

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
AZEDDINE BELHOUL

DÉCEMBRE 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Direction de recherche :

Adam W. Skorek

Directeur de recherche

Jury d'évaluation

Messaoud Ahmed Ouameur

Évaluateur

Ahmed Lakhssassi

Évaluateur

Résumé

Ce mémoire présente une approche visant à proposer des améliorations afin d'optimiser un réseau d'antennes micro-ruban à double élément fonctionnant dans les ondes millimétriques, en utilisant le logiciel de simulation de champ électromagnétique CST Studio Suite.

Dans ce travail, nous avons modélisé des conceptions d'un réseau d'antennes patch micro-ruban double bande de 1×2 éléments intégrés avec une structure de bande interdite électromagnétique (EBG) pour les applications 5G à ondes millimétriques. Le réseau d'antennes fonctionne à 28 GHz et 38 GHz. Ce réseau est composé de deux éléments d'antennes patch disposés côte à côte dans un plan de masse d'une taille de 11 mm * 6.8 mm * 0.4 mm et un substrat diélectrique d'un matériau de Rogers RT5880 d'une taille de 11 mm * 6.8 mm * 0.26 mm. Une attention particulière est accordée aux implications de la distance entre les éléments d'antennes avec une analyse qui examine l'impact de la variation de l'écart entre eux, en testant des distances de 2 mm, 1.1 mm et 0.6 mm, tout en cherchant les matériaux optimaux pour notre conception.

Les deux éléments d'antennes patch carrées de 3.1 mm \times 3.1 mm, évoluent depuis un simple patch carré jusqu'à une antenne patch à fente optimisée avec mise à la terre complète. Cette évolution permet de passer d'un réseau d'antennes fonctionnant sur une seule bande de fréquence à une double bande de fréquence à 28 GHz et 38 GHz.

La conception EBG inclut un réseau de cellules dites type champignon 3×6 , cette structure est d'une taille de 12 mm * 7.8 mm * 0.32 mm. Nous avons modélisé une forme des cellules qui ont donné des résultats meilleurs qu'une cellule rectangulaire, une comparaison est faite durant notre étude.

Le processus de modélisation du réseau d'antennes intègre une structure EBG, avec pour objectif d'optimiser ses performances pour la technologie 5G et les bandes d'ondes millimétriques. Les améliorations ont ciblé aussi la réduction de la taille et de l'épaisseur de l'antenne tout en maintenant une isolation efficace entre les éléments d'antenne. Parallèlement, l'effort est concentré sur l'amélioration de la portée, du rayonnement et du gain.

La simulation de la structure complète de nos modèles révèle une perte de réflexion inférieure à -10 dB et un paramètre d'isolation maintenu à moins de -20 dB et des gains qui sont supérieurs à 8 dBi aux deux fréquences 28GHz et 38Ghz.

Notre modelé présente des avantages notables en termes d'économie de matériaux grâce à sa forme simple et taille réduite simplifiant ainsi le processus de fabrication. Cette caractéristique se révèle aussi être un atout majeur pour les applications où l'espace est une contrainte.

Enfin, une comparaison des résultats obtenus avec le modèle de référence nous a permis d'évaluer la performance de ce model modélisé.

Avant-propos

L'élaboration de ce mémoire a été une aventure intellectuelle passionnante, motivée par un intérêt pour le domaine des télécommunications. Mon choix de ce sujet découle de ma fascination pour les avancées technologiques dans le domaine des communications sans fil, en particulier pour les applications 5G.

Dans cette quête de compréhension approfondie, j'ai été guidé par le désir d'explorer les intrications des antennes à bande interdite électromagnétique (EBG) et d'optimiser leurs performances dans le contexte des ondes millimétriques. Ce mémoire vise à contribuer à des propositions des améliorations des réseaux d'antennes miniaturisées, en mettant l'accent sur la conception de réseaux patch micro-ruban double bande.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le Professeur Adam Skorek, mon enseignant et directeur de recherche, dont les conseils éclairés et l'expertise ont été des sources inestimables tout au long de ce parcours de recherche. Ses orientations précieuses ont grandement enrichi mes perspectives et ont contribué de manière significative durant la réalisation de ce travail.

Puisse les pages qui suivent refléter l'engagement, la rigueur et la passion investis dans cette exploration scientifique.

Table des matières

Avant-propos	5
Table des matières	6
Liste des tableaux	10
Liste des figures.....	11
Liste des symbols	15
Introduction.....	18
1.1 Contexte général.....	18
1.2 Problématique.....	19
1.3 Objectifs de recherche	20
1.4 Méthodologie de recherche	21
1.5 Structure du rapport	22
Chapitre 2 - Théorie et outils de modélisation de l'antenne	24
2.1 Paramètres utilisés dans la caractérisation des antennes	24
2.1.1 Diagramme de rayonnement.....	24
2.1.2 Gain et directivité.....	26
2.1.3 Facteur d'efficacité et de qualité.....	27

2.1.4	Polarisation	29
2.1.5	Adaptation d'impédance.....	32
2.1.6	Perte de retour (Return Loss)	35
2.2	Antenne Microstrip	36
2.2.1	Choix du type d'antenne microstrip.....	38
2.2.2	Choix du substrat.....	39
2.2.3	Choix de la méthode d'alimentation	39
2.3	Les particularités du domaine micro-ondes.....	44
2.3.1	Paramètres S	45
2.3.2	La « perte de retour »	45
2.3.3	SWR (Standing Wave Ratio).....	45
2.4	Structure EBG	45
2.5	Description des outils utilisé pour le design de base	47
2.5.1	Le logiciel ANSYS HFSS	47
2.6	Description des outils utilisés pour apporter des améliorations	49
2.6.1	Studio micro-ondes de CST.....	49
Chapitre 3 - Analyse descriptive du système d'antenne micro-ruban avec une		
	structure EBG Ground.....	53
3.1	Travaux sur les méthodes de découplages et isolation entre les	
	antennes	53

3.2	Description physique du système réseau d'antennes avec EBG Ground	57
3.2.1	Conception de la cellule unitaire EBG	57
3.2.2	Conception de la couche EBG	59
3.2.3	Conception du système en complet.....	61
3.3	L'état actuel de design et ces performances	62
3.3.1	L'approche de découplage.....	62
3.3.2	Les performances du système.....	62
3.3.3	Les résultats du paramètre S.....	63
3.3.4	Les diagrammes de rayonnement du système	63
3.3.5	Les résultats de la polarisation	64
3.4	Stratégie d'amélioration du design	65
3.4.1	Facteurs à optimiser	65
3.4.2	Étapes de conception de l'antenne	67
Chapitre 4 - Modélisation numérique		69
4.1	Modélisation avec logiciel.....	69
4.2	Proposition des modifications	74
4.2.1	Conception de cellule unitaire EBG	74
4.2.2	Résultats et discussions.....	76
4.3	Analyse comparative.....	79

4.4 Comparaison entre le réseau d'antennes de référence et le réseau d'antenne modélisée.....	83
Bibliographie	88
Annexe A – Licences logiciels utilisés	93
Annexe B – Recherche bibliographique	100

Liste des tableaux

Tableau 1 Les dimensions des différentes couches de l'antenne proposé dans l'article1 avec le sol EBG [1].....	61
Tableau 2 Les performances du design proposé dans l'article [1].	63
Tableau 3 Dimension du réseau d'antennes double bande proposé.	73
Tableau 4 Les dimensions des différentes couches constituant la structure EBG.	76
Tableau 5 Comparaison le modèle modélisé avec ceux de la littérature [1] [20] [35].....	84
Tableau 6 les résultats comparatifs des Paramètres S11, S12 et les fréquences centrales de l'antenne modelé avec celui de référence.....	86

Liste des figures

Figure 2.1 Système de coordonnées pour l'analyse d'antenne [45].	25
Figure 2.2 Différents types des diagrammes de rayonnements [44].	26
Figure 2.3 Trois types de polarisations, (a) linéaire, (b) circulaire et (c) elliptique [44].	30
Figure 2.4 Polarisation de l'onde électromagnétique [44].	31
Figure 2.5 Patch rectangulaire et son équivalent modèle de transmission [44].	33
Figure 2.6 Dimensions du patch [44].	35
Figure 2.7 Structure basique d'une antenne micro-ruban [44].	37
Figure 2.8 Rayonnement d'antenne patch micro-ruban [44].	37
Figure 2.9 Exemple d'antenne Réseau patch 4x4 [44].	38
Figure 2.10 Formes d'antenne micro-ruban, (a) carré, (b) rectangulaire, (c) dipôle, (d) circulaire, (e) anneau triangulaire(f) et (g) elliptique [44].	38
Figure 2.11 Antenne patch micro-ruban avec alimentation latérale	40
Figure 2.12 Antenne patch micro-ruban rectangulaire [44].	42
Figure 2.13 Alimentation de ligne coaxiale [44].	42
Figure 2.14 Méthode d'alimentation par couplage de proximité [44].	43
Figure 2.15 Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture [44].	44
Figure 2.16 Type de champignon EBG [7].	46
Figure 2.17 L'interface du logiciel ANSYS HFSS [46].	48
Figure 2.18 L'interface du logiciel CST STUDIO SUITE 2023 version étudiante	50

Figure 3.1 (a) Modèle de simulation de la cellule EBG. (b) Vue de dessus de la cellule EBG [1].	58
Figure 3.2 Réalisation du la cellule EBG sur le logiciel CST Suite Studio.....	59
Figure 3.3 (a) Pile de couches et (b) vue de dessus et vue latérale du réseau d'antennes proposé avec le sol EBG [1].	60
Figure 3.4 Réalisation de la couche EBG du réseau d'antennes proposé sur le logiciel CST Suite Studio.	60
Figure 3.5 Simulation du Paramètres-S avec et sans EBG broyé conjointement avec mesurées Paramètres-S avec EBG Ground conçu. (a) une réflexion. (b) Isolement [1].	63
Figure 3.6 Diagramme de rayonnement simulé avec et sans sol EBG dans le plan E tandis que (a) le port 1 est excité ; (b) le port 2 est excité ; (c) les ports 1 et 2 sont excités ; et dans le plan H pendant que (d) le port 1 est excité ; (e) le port 2 est excité ; et (f) les ports 1 et 2 sont excités [1].	64
Figure 3.7 Diagramme de rayonnement mesuré pendant que l'antenne 1 est excitée avec l'antenne 2 terminée avec une charge adaptée à 26 GHz [1]......	65
Figure 4.1 Antenne patch sans emplacement b) avec un slot c) avec deux slots.	70
Figure 4.2 Coefficients de réflexion (S11) de l'antenne patch.	70
Figure 4.3 Antenne 1 x 2 éléments sans et avec la structure EBG.....	71
Figure 4.4 Coefficient de réflexion et de transmission d'un réseau 1 x 2.	72
Figure 4.5 a) Structure EBG b) Vue latérale de la structure EBG et de son modèle de circuit équivalent.	73
Figure 4.6 Cellule unitaire de la structure EBG.	74
Figure 4.7 Phase de réflexion de la cellule de l'unité EBG.	75
Figure 4.8 Réseau d'antennes de 1 × 2 avec EBG a) Vue de dessus b) Empilement de couches.....	75
Figure 4.9 Paramètre de réflexion et d'isolation du réseau d'antennes double bande avec EBG.....	76
Figure 4.10 Isolement par rapport à la variation de distance inter-éléments.....	77

Figure 4.11 Variations du gain du réseau d'antennes double bande avec EBG en fonction des distances inter-éléments.....	78
Figure 4.12 Diagramme de rayonnement lorsque le port 1 est actif a) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 28 GHz b) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 38Ghz	78
Figure 4.13 Diagramme de rayonnement lorsque le port 2 est actif a) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 28 GHz b) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 38Ghz	79
Figure 4.14 Paramètres de réflexion et d'isolation du réseau d'antennes double bande avec EBG en utilisant deux différents matériaux de substrat.....	80
Figure 4.15 Variations du gain du réseau d'antennes double bande avec EBG en utilisant deux différents matériaux de substrat.	81
Figure 4.16 Model réseau d'antennes double bande avec des cellules EBG rectangulaire.	81
Figure 4.17 Isolement dans le réseau d'antenne double bande par rapport à la forme de la cellule EBG.	82
Figure 4.18 Variations du gain du réseau d'antennes double bande par rapport à la forme de la cellule EBG.	83
Figure 1 L'interface de la base de données IEEEExplore [55].	102
Figure 2 L'interface de la base de données OBSCO [37].	103
Figure 3 Les différentes bases de données qui appartiennent à OBSCO [37].	104
Figure 4 L'interface de la base de données Scopus [49].	105
Figure 5 L'interface du moteur de recherche Google Scholar [56].	106
Figure 6 L'interface de la base de données ProQuest [57].	107
Figure 7 L'interface de la base de données « Dissertations & Theses @ Université du Quebec a Trois-Rivieres » [57].	107
Figure 8 L'interface de logiciel de gestion bibliographique EndNote [39].	109
Figure 9 L'interface du logiciel bibliographique Zotero.	112
Figure 10 Les métriques sur la base de données Scopus [58].	115
Figure 11 Les métriques PlumX sur Scopus [58].	115

Figure 12 Les métriques sur IEEE Xplore [55].....	116
Figure 13 Facteur d'impact de la revue de référence sur Web of Science [54]	118

Liste des symbols

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	5th Generation mobile network
ANSYS	Analysis Systems
CRDN	Coupled Resonator Decoupling Networks
CST	Computer Simulation Technologie
DGS	Defective Ground Structures
DRA	Dielectric Resonator Antenna
EBG	Electromagnetic Band Gap
EDA	Event-Driven Architecture
EM	Electromagnetic (électromagnétique)
EN	EndNote
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
FI	Facteur d'Impact
FWCI	Field-Weighted Citation Impact
GS	Google Scholar
GSM	Global System for Mobile Communications
HFSS	High Frequency Structure Simulator
IoT	Internet of Things (Internet des objets)
JCR	Journal Citation Reports
MC	Multi-ports Conjugués
MCR	Mutual Coupling Reduction

MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MPA	Micro-ruban Patch Antenna
MWS	MICROWAVE STUDIO
OAM	Orbital Angular Momentum
PCB	Printed Circuit Board
PEC	Perfect Electric Conductor
QoS	Quality of Service (qualité de service)
RAN	Radio Access Network (réseau d'accès radio)
RFID	Radio Frequency Identification
RRM	Radio Resource Management
SAR	Specific Absorption Rate
SWR	Standing Wave Ratio
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
UWB	Ultra-WideBand
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WLAN	Wireless Local Area Network (réseau local sans fil)
<i>B</i>	Susceptance
<i>D</i>	Directivité
<i>E</i>	Champ électrique
<i>E_x</i>	Composante du champ électrique dans la direction x
<i>E_y</i>	Composante du champ électrique dans la direction y
<i>G</i>	Gain

J_0	Fonction de Bessel du premier type d'ordre zéro
P_{in}	Puissance incidente
P_{rad}	Puissance rayonnée par l'antenne
P_{rec}	Puissance acceptée par l'antenne
Q_c	Facteur de qualité dû aux pertes de conduction
Q_d	Facteur de qualité dû aux pertes diélectriques
Q_{rad}	Facteur de qualité dû aux pertes de rayonnement
Q_{sw}	Facteur de qualité dû aux ondes de surface
Q_t	Facteur de qualité total
Z_L	Impédance de la charge
Z_S	Impédance de la source
β	Constante de phase
ϕ	Phase
σ	Conductivité des conducteurs
ω	Fréquence angulaire
η_0	Impédance caractéristique du vide
$\tan \delta$	Tangente de perte du substrat
γ	Constante de propagation
ρ	Densité de charge volumique

Introduction

1.1 Contexte général

Les antennes micro-ruban sont devenues l'une des techniques les plus populaires dans les systèmes de communication modernes, couvrant une large gamme de fréquences allant de quelques MHz à plusieurs GHz. Elles présentent des avantages significatifs tels que leur légèreté, leur profil bas, leur faible coût et leur facilité de montage sur des surfaces hôtes et d'intégration avec des circuits imprimés. Cependant, ces antennes souffrent également de plusieurs inconvénients, notamment une bande passante étroite, un gain faible et de mauvaises performances de rayonnement en raison de l'excitation des ondes de surface [2 - 3]. Les ondes de surface prononcées dans le matériau diélectrique aggravent les caractéristiques de rayonnement et augmentent le couplage mutuel entre les éléments d'un réseau.

Avec l'émergence des technologies de communication de cinquième génération (5G), les exigences en matière de performances des antennes ont considérablement évolué. La 5G vise à fournir des vitesses de données très élevées, une latence ultra-faible et une connectivité massive, ce qui nécessite des solutions d'antenne avancées capables de fonctionner efficacement dans la bande des ondes millimétriques. Dans ce contexte, les antennes micro-ruban doivent non seulement être miniaturisées pour s'adapter à des dispositifs de plus en plus compacts, mais elles doivent également offrir une large bande passante, un gain élevé et une isolation efficace entre les éléments du réseau pour minimiser les interférences et maximiser l'efficacité du rayonnement.

Pour répondre à ces défis, de nombreuses techniques ont été étudiées et appliquées pour atténuer les ondes de surface et réduire le couplage mutuel dans les réseaux d'antennes micro-ruban. Parmi ces techniques, on trouve l'utilisation de supports de cavité, le retrait partiel du substrat, les ondulations, les résonateurs à anneau fendu (SRR), les structures de sol défectueuses (DGS) et les structures à bande interdite électromagnétique (EBG) [1, 4, 6]. Les structures EBG, en particulier, sont faciles à appliquer et ont démontré des performances excellentes dans la conception d'antennes micro-ruban, en améliorant la bande passante et en supprimant efficacement les ondes de surface sans compromettre l'efficacité du rayonnement [5]. Ces structures sont également efficaces pour améliorer la portée, le gain, et le contrôle du diagramme de rayonnement, et pour assurer une faible interférence avec les éléments hyperfréquences adjacents.

1.2 Problématique

Pour un réseau d'antenne, l'installation de plusieurs antennes à proximité les unes des autres cause un couplage mutuel fort et une faible efficacité de rayonnement avec un taux d'interférence élevé. Une plus grande distance entre les éléments d'antenne conduit à un volume plus important. Par conséquent, réduire la distance et le couplage mutuel qui en résulte entre les éléments du réseau d'antennes comme moyen de miniaturisation du réseau est devenu un sujet de recherche très brûlant [1].

De nombreuses techniques ont été étudiées et appliquées pour atténuer les ondes de surface dans la conception d'antennes micro-ruban et le couplage mutuel dans un réseau comprenant un support de cavité, un retrait partiel du substrat, des ondulations, des résonateurs à anneau fendu (SRR), des structures de sol défectueuses (DGS) et des structures à bande interdite électromagnétique (EBG) [1, 4, 5 - 6]. Par rapport aux autres

méthodes, les structures EBG sont faciles à appliquer et elles ont montré des performances excellentes dans la conception des antennes micro-ruban sans perdre l'efficacité du rayonnement avec une bonne suppression des ondes de surface [5]. Ces structures s'avèrent efficaces pour l'amélioration de la bande passante, le contrôle du diagramme de rayonnement, assureraient une faible interférence avec les éléments hyperfréquences adjacents et agiraient comme un matériau de blindage entre l'antenne et l'utilisateur du dispositif de communication. Les structures EBG ont également été utilisées dans des réseaux pour atténuer les effets de couplage mutuel.

1.3 Objectifs de recherche

Ce projet est un réseau d'antennes micro-ruban miniaturisé amélioré projeté pour la bande d'ondes millimétriques des systèmes de communication sans fil de cinquième génération (5G) fonctionnant dans la bande de fréquences 5G New Radio (26500 MHz - 29500 MHz).

Nous allons améliorer notre antenne en utilisant le logiciel de simulation de champ électromagnétique CST Suite Studio et les objectifs sont les suivants :

- Modéliser un réseau d'antennes micro-ruban à double élément à ondes millimétriques.
- Étude bibliographique approfondie sur les antennes EBG qui proposent plusieurs structures, puis nous allons chercher à modéliser la structure qui démontre des performances satisfaisantes.

- Modéliser le design du réseau d'antenne avec la structure EBG afin qu'il soit amélioré et adapter aux fonctionnalités de performance 5G et à la bande d'onde millimétrique.
- Proposer des améliorations au niveau du design de l'antenne en réduisant à la fois sa taille et son épaisseur, tout en préservant une isolation efficace entre les éléments d'antenne. En parallèle, viser à améliorer la portée, le rayonnement, et le gain de l'antenne.
- L'objectif de rendre l'antenne plus petite et simple réside dans le fait que de nombreux dispositifs électroniques portables, tels que les smartphones, les montres intelligentes et les capteurs IoT, ont des espaces limités. Une antenne compacte facilite l'intégration de ces dispositifs dans des boîtiers restreints, contribuant ainsi à un design élégant. De plus, des antennes plus petites et simples sont généralement plus faciles à produire et moins coûteuses, ce qui est crucial pour la fabrication à grande échelle.
- Comparer les résultats d'antenne obtenus avec celui de l'article [1].

1.4 Méthodologie de recherche

La recherche dépend de la bande d'onde millimétrique et nous améliorerons l'antenne en utilisant CST Suite Studio, qui est le dispositif le plus utile pour concevoir les antennes.

CST suite studio est un logiciel d'analyse électromagnétiques 3D hautes performances dédiée à la conception, à l'analyse et à l'optimisation des composants et systèmes électromagnétiques. Il est particulièrement raisonnable pour une recherche et un développement productif pour les antennes, les filtres, les canaux, les liaisons de transmission, les connecteurs, les circuits imprimés et les résonateurs.

Pour répondre à notre objectif de recherche, nous suivrons la méthodologie suivante :

- Initier l'étude en examinant le modèle de réseau d'antenne présent dans l'article [1]. Ensuite, configurer un nouveau réseau d'antenne en appliquant la structure EBG sol comme méthode de découplage sur ce modèle. Explorer différentes formes de la structure EBG sol afin d'optimiser l'isolation entre les antennes et améliorer leurs performances.
- Identifier des solutions afin de pouvoir diminuer le nombre de couches constituant la structure du réseau d'antenne puis réduire sa taille. Cette démarche offre des critères avantageux dans les conceptions des antennes patch miniaturisées en optimisant l'espace, réduisant les coûts et simplifiant le processus de fabrication.
- Évaluer les modèles obtenus et exposer ensuite les structure les plus efficace.
- Comparer les résultats de l'antenne améliorée avec les résultats de l'article [1].

1.5 Structure du rapport

Ce rapport de mémoire se compose de quatre chapitres. Le premier chapitre est dédié à l'explication de la problématique de recherche, des objectifs et de la méthodologie suivie tout au long de ce travail.

Le second chapitre présente les théories et les outils informatiques nécessaires pour la conception des antennes en micro-ruban, ainsi que les améliorations apportées.

Ce travail s'inspire d'un réseau d'antennes microstrip développé par Xiumei Shen, Yujia Liu et Luyu Zhao dans leur article intitulé « A Miniaturized Microstrip Antenna Array at 5G », publié dans les IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters (Volume:

18, Issue: 8, août 2019). Le chapitre 3 offre une description de leur système : analyse physique, état actuel du design et performances.

Le chapitre 4 présente la modélisation numérique de l'antenne proposée dans le cadre de ce travail, ainsi qu'une analyse comparative des résultats obtenus par rapport au modèle de référence.

Nous terminons ce mémoire par les références utilisées tout au long de ma recherche, suivies des annexes. L'annexe A est consacrée aux licences logicielles employées durant ce travail, avec les détails de leur obtention. L'annexe B regroupe les principes et méthodes de la recherche bibliographique que j'ai utilisés pour mener à bien ma recherche et organiser mon mémoire, et que je considère essentiels pour démarrer correctement un travail de recherche.

Chapitre 2 - Théorie et outils de modélisation de l'antenne

Ce chapitre couvre les paramètres nécessaires pour analyser l'antenne conçue ainsi que les outils nécessaires pour obtenir des résultats préliminaires. Les paramètres d'une antenne sont essentiels pour déduire les potentiels de l'antenne en la comparant à des résultats moyens pré-conclus.

2.1 Paramètres utilisés dans la caractérisation des antennes

Les paramètres sont essentiels pour étudier tout type de système. La caractérisation de l'antenne dépend de nombreux paramètres qui aident à analyser sa capacité et sa facilité d'utilisation.

2.1.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est défini comme « une fonction mathématique ou une représentation graphique des propriétés de rayonnement de l'antenne en fonction des coordonnées spatiales » [45].

Nous ne prendrons pas trop de temps pour prouver les équations (2.1) (2.2) ci-dessus, elles ont été discutées en détail dans les références de ce rapport, nous voulons mentionner maintenant le fait que pour une antenne micro-ruban, le champ électrique E à l'intérieur le patch est normal au patch et au plan de masse, et le champ magnétique H est parallèle au

bord de la bande. La polarisation d'une antenne patch rectangulaire pour le mode dominant est linéaire et dirigée le long des dimensions du patch [45, 46 et 47].

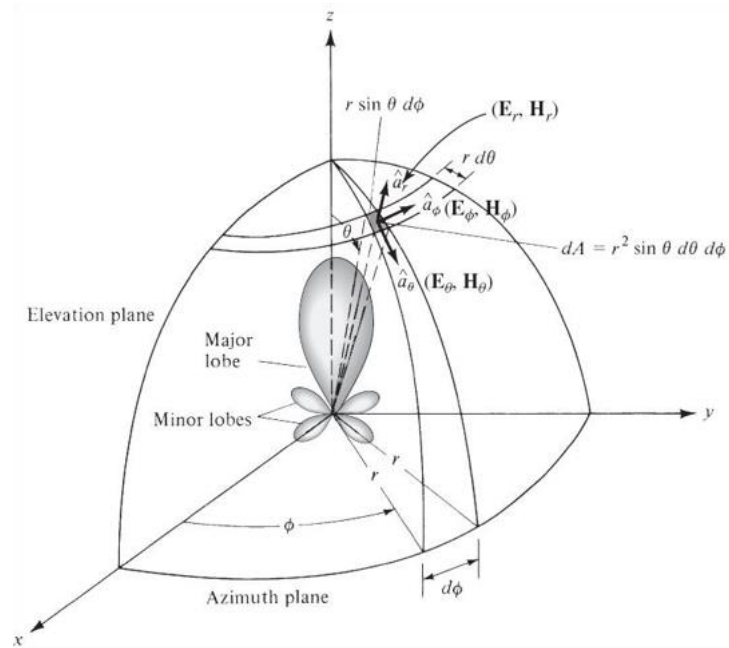


Figure 2.1 Système de coordonnées pour l'analyse d'antenne [45].

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_S \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{s} \quad (2.1)$$

$$= \frac{1}{2\eta^0} \iint (|E_\theta|^2 \times |E_\phi|^2) r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.2)$$

Prad = la puissance rayonnée par l'antenne

Parmi les plus connus modèles de diagramme de rayonnement d'antennes sont mis en évidence dans la Figure 2.1.

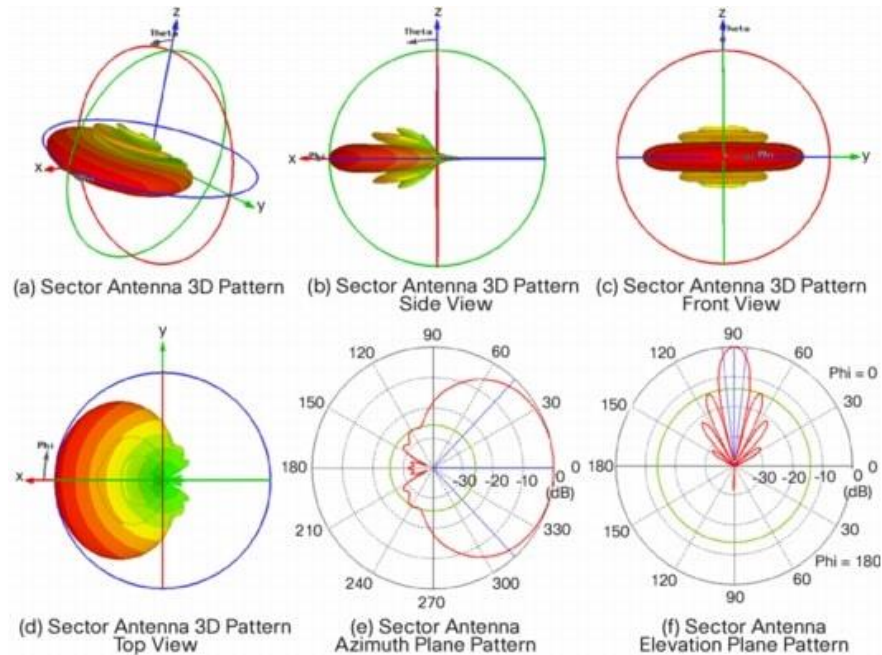


Figure 2.2 Différents types des diagrammes de rayonnements [44].

2.1.2 Gain et directivité

La directivité est la capacité d'une antenne à focaliser l'énergie dans une direction particulière. La définition de la directivité selon la norme IEEE 145-1983 : « La directivité d'une antenne dans une direction donnée est le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité du rayonnement moyennée dans toutes les directions ». Notez que l'intensité du rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π . La directivité est toujours supérieure à un [47].

$$D = \frac{\frac{1}{2} \operatorname{Re}(E\theta H' \varphi - E\varphi H' \theta)(\theta = 0)}{\operatorname{Prad}/4\pi} \quad (2.3)$$

Où:

Prad = la puissance rayonnée de l'antenne.

$$\eta_0 = 120\pi \text{ (}\Omega\text{)}$$

Une bonne approximation de l'équation (2.3) pour la directivité D d'une antenne patch rectangulaire est donnée par [8, et 1]. Notez que ($\theta=0$) dans cette approximation.

$$D \approx \frac{4(koW)^2}{\pi\eta^0 Grad} \quad (2.4)$$

Où :

Grad = la conductance de rayonnement du patch [45, 46, 47 et 49].

Le gain directif (selon IEEE Std 145-1983) est « le rapport de l'intensité de rayonnement, dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement qui serait obtenue si la puissance acceptée par l'antenne était rayonnée de manière isotrope ». On peut obtenir un gain de directivité de l'antenne :

$$G = eD \quad (2.5)$$

e = le rendement de l'antenne.

Le gain est toujours inférieur à la directivité car l'efficacité est comprise entre 0 et 1. La directivité augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat h et de la largeur du patch W . Inversement, la largeur du faisceau devrait diminuer avec l'augmentation de h & W [47].

2.1.3 Facteur d'efficacité et de qualité

Pour une antenne patch micro-ruban, l'efficacité peut être définie comme la puissance rayonnée par l'élément micro-ruban divisée par la puissance reçue par l'entrée de l'élément. Les facteurs qui affectent l'efficacité de l'antenne et la rendent élevée ou faible sont la perte diélectrique, la perte du conducteur, la puissance réfléchie (Voltage Standing Wave Ratio

VSWR), la perte de polarisation croisée et la puissance dissipée dans toutes les charges de l'élément.

L'expression générale de l'efficacité de rayonnement peut être trouvée dans la plupart des livres d'antennes, y compris les références de cette recherche [45, 46, 47, 48 et 50] :

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{rec}} \quad (2.6)$$

P_{rad} = Puissance rayonnée par l'antenne.

P_{rec} = Puissance acceptée par l'antenne.

L'efficacité peut également être exprimée en termes de facteur de qualité Q comme suit : [45, 46 et 47].

$$e = \frac{1/Q_{rad}}{1/Q_t} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (2.7)$$

Q_t = facteur de qualité totale

Q_{rad} = facteur de qualité dû aux pertes de rayonnement (ondes spatiales).

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (4.8)$$

Q_c = facteur de qualité dû aux pertes de conduction (ohmique).

Q_d = facteur de qualité dû aux pertes diélectriques.

Q_{sw} = facteur de qualité dû aux ondes de surface.

La plupart des antennes micro-ruban ont une efficacité comprise entre 80 et 90 %. Pour une antenne très fine $h \ll \lambda_0$, $t \ll \ll \lambda_0$.

Il existe des formules approximatives pour calculer le facteur de qualité [45] :

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (2.9)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.10)$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega\epsilon r}{hGt/l} \quad (2.11)$$

$\tan \delta$ = la tangente de perte du substrat.

σ = conductivité des conducteurs.

Gt/l = la conductance totale par unité de longueur.

2.1.4 Polarisation

La polarisation d'une antenne est la polarisation de l'onde rayonnée par l'antenne. Une antenne de réception doit être dans la même polarisation que l'antenne d'émission sinon elle ne résonnera pas. La polarisation est une propriété de l'onde électromagnétique ; il décrit l'amplitude et la direction du vecteur champ électrique en fonction du temps, autrement dit « l'orientation du champ électrique pour une position donnée dans l'espace ». Un fil droit simple a une polarisation lorsqu'il est monté verticalement et une polarisation différente lorsqu'il est monté horizontalement (figure 2.4).

Le type de propagation de l'onde, déterminé par l'orientation du flux électrique dans le champ électromagnétique. La polarisation peut être classée comme linéaire, circulaire et elliptique. En polarisation linéaire, l'antenne rayonne de la puissance dans le plan de propagation, un seul plan, l'antenne est polarisée verticalement linéaire lorsque le champ

électrique est perpendiculaire à la surface de la terre, et horizontalement linéaire polarisée lorsque le champ électrique est parallèle à la surface de la terre.

L'antenne à polarisation circulaire rayonne de la puissance dans tous les plans de la direction de propagation (vertical, horizontal et entre eux). Le plan de propagation tourne en cercle faisant un cycle complet en une période d'onde. À partir des équations de Maxwell :

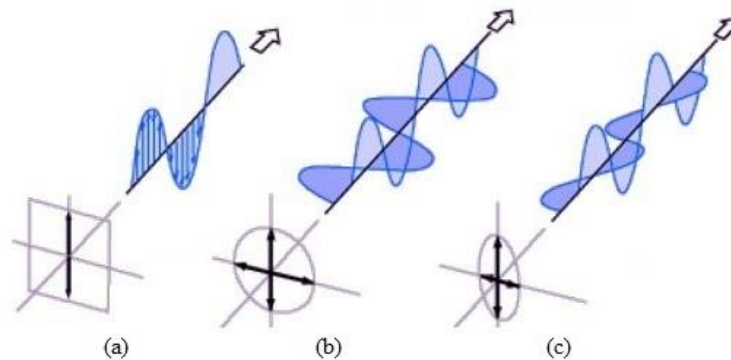


Figure 2.3 Trois types de polarisations, (a) linéaire, (b) circulaire et (c) elliptique [44].

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2.12)$$

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \quad (2.13)$$

$$\nabla \times E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.14)$$

$$\nabla \times H = 0 \quad (2.15)$$

Une solution bien connue de l'équation (2.34) est la suivante [45, 46, 50, 51 et 52] :

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = \nabla(\rho/\varepsilon) \quad (2.16)$$

Dans l'espace libre ($\rho=0$)

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (2.17)$$

L'équation (4.38) est connue sous le nom d'équation d'onde, et il existe de nombreuses solutions possibles [46]; une solution possible est :

$$E = E_0 e^{j\omega t + \gamma z} \hat{X} \quad (2.18)$$

$$E = E_0 e^{j\omega t + \gamma z} \hat{Y} \quad (2.19)$$

$$E = E_0 e^{j\omega t \pm \gamma x} \hat{Z} \quad (2.20)$$

Considérons maintenant la figure (2.4) ; l'onde électromagnétique rayonnée par une antenne a un champ électrique E à deux composantes E_x et E_y où :

$$E_x = |E_x| \cos(\omega t - \beta z) \quad (2.21)$$

$$E_y = |E_y| \cos(\omega t - \beta z + \varphi) \quad (2.22)$$

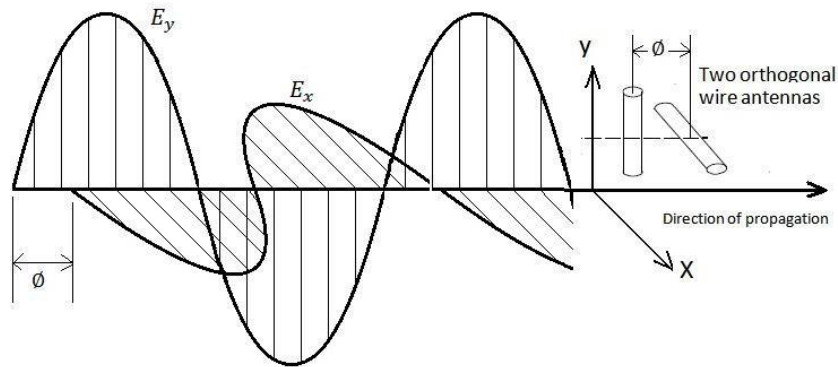


Figure 2.4 Polarisation de l'onde électromagnétique [44].

$|E_x|$ et $|E_y|$ sont l'amplitude des composantes du champ dans les directions x et y respectivement. Les équations (2.43) et (2.44) sont une autre solution possible de l'équation d'onde (2.39). Les composants $|E_x|$ et $|E_y|$ des équations (2.43) et (2.44) décrivent le type de polarisation de l'onde électromagnétique et de l'antenne ; lorsque $|E_{yx}|$ ou $|E_y|$ est nul, l'onde et l'antenne sont dites polarisées linéairement ; quand $|E_x| = |E_y| \neq 0$, l'antenne et l'onde sont polarisées circulairement ; quand $|E_x| \neq |E_y| \neq 0$ il est polarisé elliptiquement. La polarisation

linéaire est utilisée dans des applications telles que l'envoi TV. La polarisation circulaire est largement utilisée dans les communications par satellite, car la polarisation linéaire est médiocre et difficile à égaler dans la transmission par satellite en raison de ce qu'on appelle la rotation de Faraday par rapport à l'onde électromagnétique, ce qui signifie que « l'onde électromagnétique polarisée linéaire peut être tournée d'une quantité inconnue (en fonction de l'épaisseur et la température de l'ionosphère, ainsi que la fréquence ; la rotation est élevée aux basses fréquences et faible aux hautes fréquences) ».

2.1.5 Adaptation d'impédance

La théorie du transfert de puissance maximale stipule que pour le transfert de puissance maximale d'une source à impédance interne fixe vers la charge, l'impédance de la charge doit être la même que celle de la source. « La loi Jacobi ».

$$Z_S = Z_L^* \quad (2.23)$$

Z_S = impédance de la source.

Z_L = impédance de la charge.

(*) = indique le conjugué complexe.

La plupart des applications micro-ondes sont conçues avec une impédance d'entrée de 50 Ω , nous souhaitons donc adapter l'antenne à 50 Ω .

On peut commencer par représenter le patch par une admittance équivalente parallèle Y comme le montre la figure (2.2).

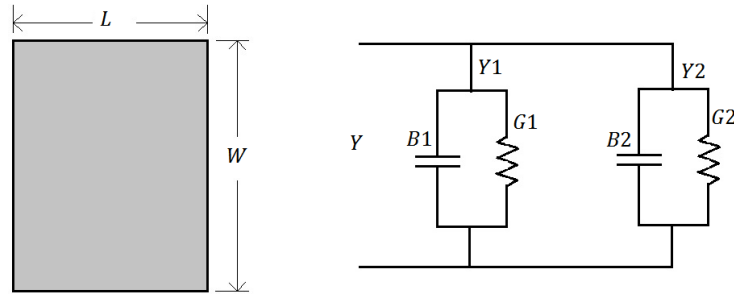


Figure 2.5 Patch rectangulaire et son équivalent modèle de transmission [44].

Où:

$$Y = \frac{1}{Z_L} = G + jB \quad (2.24)$$

Ici, nous avons:

$$Y1 = Y2 \quad (2.25)$$

C'est-à-dire :

$$G1 = G2, B1 = B2 \quad (2.26)$$

Une expression générale de la conductance $G1$ est donnée par [45, 46, 48 et 47]

$$G1 = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} \quad (2.27)$$

P_{rad} = est la puissance de rayonnement (définie précédemment).

V_0 = est la tension aux bornes de la fente.

$$P_{rad} = \frac{|V_0|^2}{2\pi\eta_0} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (2.28)$$

Par conséquent, $G1$ peut être exprimé sous la forme :

$$P_{rad} = \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (2.29)$$

Pour en revenir à l'équation (2.15) :

$$Z_s = R_s + jX_s = Z_L^{*'} = R_L - jX_L \quad (2.30)$$

$$Z_s = \frac{1}{Y_s} = R_s = \frac{1}{2G_1} \quad (2.31)$$

Où : "le signe (+) est utilisé pour les modes avec une distribution de tension de résonance impaire (antisymétrique) sous le patch et entre les fentes tandis que le signe moins (-) est utilisé pour les modes avec une distribution de tension de résonance paire (symétrique)" [45].

$$G12 = \frac{1}{|V_0|^2} \iint_s E1 \times H2^* \cdot ds \quad (2.32)$$

E1 = le champ électrique rayonné par Y1.

H2* = le champ magnétique rayonné par Y2.

$$G12 = \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (2.33)$$

J_0 = la fonction de Bessel du premier type d'ordre zéro.

Enfin, la position du point d'alimentation du patch (où l'impédance du patch à ce point est de 50 Ω) peut être trouvée à partir de l'équation suivante :

$$Rin = \frac{1}{2(G1 \mp G12)} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (2.34)$$

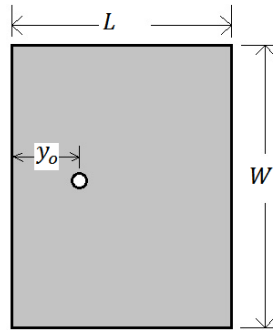


Figure 2.6 Dimensions du patch [44].

A partir des équations (2.19) ~ (2.27), nous pouvons noter que l'impédance de l'antenne patch micro-ruban ne dépend pas de la constante diélectrique du substrat ϵ_r ou de sa hauteur h . la résistance d'entrée de résonance dépend fortement de la largeur W du patch, l'augmentation de W diminuera la résistance d'entrée du patch figure (2.6).

2.1.6 Perte de retour (Return Loss)

La perte de retour est un paramètre important lors du test d'une antenne. Elle est liée à l'adaptation d'impédance et à la théorie du transfert maximal de puissance. C'est également une mesure de l'efficacité d'une antenne à fournir de l'énergie de la source à l'antenne. L'affaiblissement d'adaptation (RL) est défini par le rapport de la puissance incidente de l'antenne P_{in} à la puissance réfléchie par l'antenne de la source P_{ref} ; l'expression mathématique est :

$$RL = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{ref}} \text{ (dB)} \quad (2.35)$$

Pour un bon transfert de puissance, le rapport $\frac{P_{in}}{P_{ref}}$ est élevé. Une autre définition de l'affaiblissement d'adaptation que nous pouvons obtenir à partir de l'équation (2.28) est la

différence en dB entre la puissance envoyée vers l'antenne et la puissance réfléchiée par celle-ci. Il est toujours positif lorsque l'antenne est passive et négatif lorsqu'elle est active.

Nous pouvons trouver l'équation (2.28) écrite en termes de tension et de rapport d'onde stationnaire de tension (VSWR) et d'impédance comme suit :

$$RL = 10 \log_{10} \left| \frac{1}{\rho} \right| (dB) \quad (2.36)$$

$$= -20 \log_{10} |\rho| (dB) \quad (2.37)$$

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \right| (dB) \quad (2.38)$$

$$= (40 \log_{10} e) \operatorname{artanh} \left| \frac{1}{VSWR} \right| (dB) \quad (2.39)$$

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2} \right| (dB) \quad (2.40)$$

ρ = est le coefficient de réflexion complexe à l'entrée de l'antenne.

VSWR = est le rapport d'onde stationnaire de tension.

Z_1 et Z_2 = sont les impédances de la source et de l'antenne.

2.2 Antenne Microstrip

Cette recherche base sur l'utilisation d'une antenne réseau patch, un réseau composé de deux éléments d'antennes patch micro-ruban. L'antenne patch micro-ruban est l'une des antennes les plus utilisées aux fréquences micro-ondes. Ses avantages viennent de sa petite taille plane et de ses matériaux et processus de fabrication peu coûteux. La figure 2.7 montre la structure de base de l'antenne patch micro-ruban.

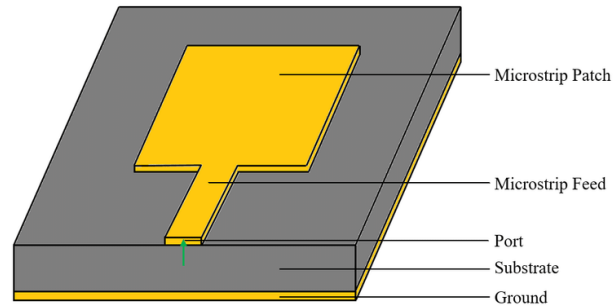


Figure 2.7 Structure basique d'une antenne micro-ruban [44].

L'antenne patch micro-ruban est composée de trois couches de haut en bas: patch, substrat et masse. Le patch rayonne les ondes électromagnétiques nécessaires. Le substrat est un diélectrique à perte qui amplifie le champ électrique de l'antenne et joue un rôle important dans la diminution de sa taille. Le sol est une plaque conductrice qui réfléchit les ondes pour qu'elles se propagent toutes dans la direction souhaitée. Il y a un petit port à l'extrémité du substrat pour connecter l'antenne à la source d'alimentation.

La figure 2.8 montre le rayonnement d'une antenne micro-ruban, avec les flèches rouges représentant les ondes de surface, les flèches bleues représentant les ondes spatiales rayonnées et les flèches vertes représentant le rayonnement latéral.

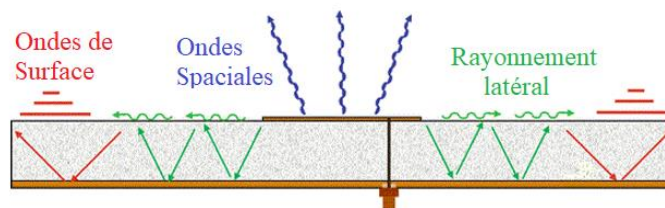


Figure 2.8 Rayonnement d'antenne patch micro-ruban [44].

Une antenne patch micro-ruban rayonne individuellement. Cependant, lorsque plusieurs antennes patch sont disposées les unes à côté des autres, leur rayonnement se combine et agit comme un système unique. En alignant les antennes patch sur une disposition

spécifique, nous créons une antenne réseau, où chaque antenne patch unique est un élément de l'antenne réseau unique.

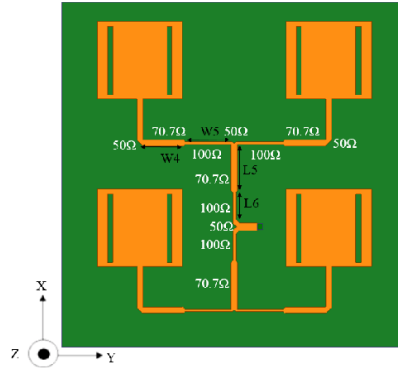


Figure 2.9 Exemple d'antenne Réseau patch 4x4 [44].

2.2.1 Choix du type d'antenne microstrip

Les antennes Micro-ruban prennent de nombreux types ; ils dépendent tous du choix de la forme de la couche de patch. Alors que le type le plus utilisé est le patch rectangulaire, le patch circulaire voit également une utilisation fréquente lorsque le rayonnement à faible polarisation croisée est important. Ces deux formes, ainsi que d'autres formes moins communes, comprennent celles illustrées à la figure 2.10. Pour les fréquences d'ondes millimétriques, les types les plus courants sont les patches rectangulaires, carrés et circulaires.

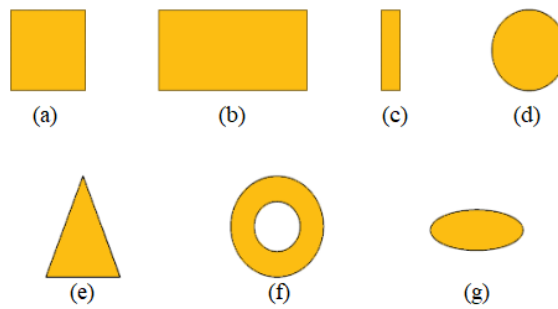


Figure 2.10 Formes d'antenne micro-ruban, (a) carré, (b) rectangulaire, (c) dipôle, (d) circulaire, (e) anneau triangulaire(f) et (g) elliptique [44].

2.2.2 *Choix du substrat*

Le substrat doit être composé d'un matériau diélectrique. Une caractéristique importante du substrat est sa perte diélectrique, qui agit comme un verdict lors du choix du matériau en fonction de l'application de l'antenne. Le choix est basé sur une approche de concessions mutuelles, car des constantes diélectriques élevées donnent des antennes de plus petite taille mais provoquent une dégradation de leurs performances; De plus, une grande épaisseur entraîne une augmentation de la bande passante mais entraînerait une fréquence de résonance plus faible.

Le substrat peut être tout type de matériau diélectrique comme le verre et la céramique. Cependant, pour une meilleure perte diélectrique, des matériaux spécialement fabriqués sont mis en pratique, principalement ceux composés de fibre de verre.

Le substrat choisi pour cette recherche est l'un de ces matériaux en fibre de verre, le RO4003 et RO RT5880, produit par Rogers. Ils sont utilisés dans les conceptions hyperfréquences/RF sensibles aux coûts.

2.2.3 *Choix de la méthode d'alimentation*

Il existe de nombreuses méthodes pour alimenter une antenne micro-ruban. Les méthodes les plus courantes sont :

1. Ligne micro-ruban.
2. Sonde coaxiale (alimentation coplanaire).
3. Couplage de proximité.
4. Couplage d'ouverture.

Du fait que l'antenne rayonne d'un côté du substrat, il est donc facile de l'alimenter depuis l'autre côté (le plan de masse), ou depuis le côté de l'élément.

La chose la plus importante à considérer est le transfert de puissance maximum (adaptation de la ligne d'alimentation avec l'impédance d'entrée de l'antenne), ceci est discuté dans la section d'adaptation d'impédance.

De nombreux bons modèles ont été rejetés à cause de leur mauvaise alimentation. Le concepteur peut construire une antenne avec de bonnes caractéristiques et un bon paramètre de rayonnement et une efficacité élevée, mais lorsque l'alimentation est mauvaise, l'efficacité totale peut être réduite à un faible niveau, ce qui rend l'ensemble du système rejeté.

- Alimentation ligne micro-ruban

Ce mode d'alimentation est très largement utilisé car il est très simple à concevoir et à analyser, et très facile à fabriquer. La figure 2.11 montre un patch avec une alimentation en ligne micro-ruban depuis le côté du patch.



Figure 2.11 Antenne patch micro-ruban avec alimentation latérale

La position du point d'alimentation (y_0) du patch dans la figure 2.11(b) a été discutée en détail dans la section d'adaptation d'impédance [44].

La technique d'alimentation du patch de la figure 2.11(a) et de la figure 2.12 est largement utilisé dans les antennes à un patch et les antennes à plusieurs patches (matrice).

L'impédance du patch est donnée par:

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon r^2}{\epsilon r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (2.41)$$

L'impédance caractéristique de la section de transition doit être :

$$Z_T = \sqrt{50 + Z_a} \quad (2.42)$$

La largeur de la ligne de transition est calculée à partir de :

$$Z_T = \frac{60}{\sqrt{\epsilon r}} \ln \left(\frac{8d}{W_T} + \frac{W_T}{4d} \right) \quad (2.43)$$

a largeur de l'alimentation micro-ruban de 50 Ω peut être trouvée à l'aide de l'équation (2.44) ci-dessous :

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left(1.393 + \frac{W}{h} + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right)} \quad (2.44)$$

Où :

$$Z_0 = 50 \Omega$$

La longueur de la bande peut être trouvée à partir de (2.25).

$$R_{in(x=0)} = \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} x_0 \right) \quad (2.45)$$

La longueur de la ligne de transition est le quart de la longueur d'onde :

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.46)$$

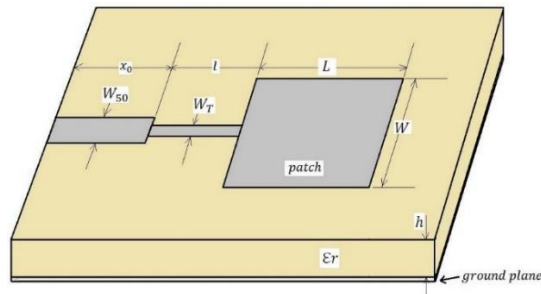


Figure 2.12 Antenne patch micro-ruban rectangulaire [44].

- Alimentation coaxiale (alimentation coplanaire)

Le couplage de l'alimentation à l'antenne patch via une sonde est un moyen très simple, bon marché et efficace. Si le concepteur ajuste le point d'alimentation à 50Ω , il lui suffit alors d'utiliser un câble coaxial 50Ω avec connecteur coaxial de type N.

Le connecteur N-coaxial est couplé à la face arrière de l'antenne micro-ruban (le plan de masse) et le connecteur central du coaxial sera passé à travers le substrat et soudé au patch, comme illustré sur la figure 2.13.

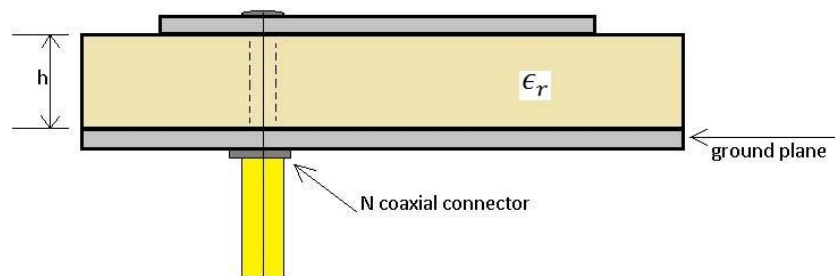


Figure 2.13 Alimentation de ligne coaxiale [44].

- Couplage de proximité

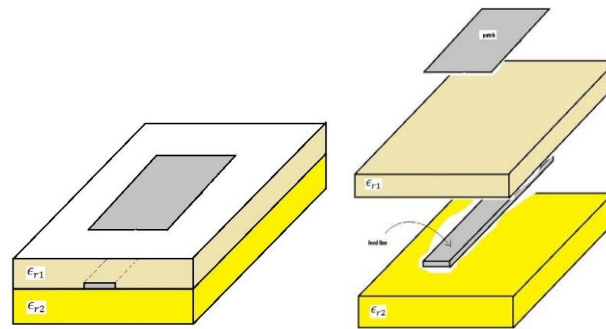


Figure 2.14 Méthode d'alimentation par couplage de proximité [44].

Le couplage de proximité consiste à utiliser deux substrats ϵ_{r1} et ϵ_{r2} . Le patch sera en haut, le plan de masse en bas et une ligne micro-ruban est connectée à la source d'alimentation et située entre les deux substrats comme indiqué sur la figure 2.14. Ce type est également connu sous le nom de « alimentation micro-ruban à couplage électromagnétique ».

Le principe de ce mécanisme est que le comportement entre le patch et la ligne à ruban d'alimentation est capacitif. L'analyse et la conception d'une telle antenne sont un peu plus compliquées que celles discutées dans les sections précédentes car le concepteur doit prendre en compte l'effet du condensateur de couplage entre la ligne d'alimentation en bande et le patch ainsi que l'équivalent RL-C circuit résonant représentant le patch et le calcul de deux substrats (ϵ_{r1} et ϵ_{r2}). Le condensateur de couplage de cette antenne peut être conçu pour l'adaptation d'impédance de l'antenne.

- Couplage d'ouverture

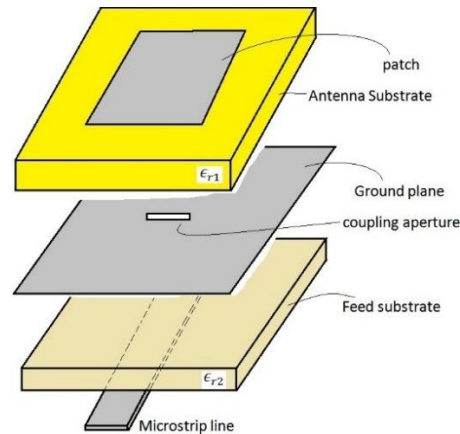


Figure 2.15 Méthode d'alimentation par couplage d'ouverture [44].

La figure 2.15 montre les couches de l'antenne patch micro-ruban utilisant le mécanisme d'ouverture. Le plan de masse a une ouverture en forme de cercle ou de rectangle et sépare deux substrats : le substrat supérieur ϵ_{r1} avec le patch dessus, et le substrat inférieur ϵ_{r2} avec la ligne d'alimentation micro-ruban en dessous. Ce type de couplage donne une bande passante plus large. Une autre propriété de ce type est que le rayonnement de la ligne à ruban d'alimentation est réduit par l'effet de blindage du plan de masse. Cette caractéristique améliore la pureté de polarisation [47].

2.3 Les particularités du domaine micro-ondes

Le spectre mm-Wave nouvellement introduit pour les réseaux mobiles à une plage élevée entre 30 GHz et 300 GHz, ce qui apporte un débit de données à haut débit aux consommateurs. Cependant, une telle fréquence élevée signifie que les ondes peuvent facilement être épuisées lorsqu'elles heurtent des obstacles, c'est pourquoi mm-Waves doit être déployé dans des cellules de réseau plus petites. Cela signifie également que les

antennes doivent être vraiment petites, car les antennes sont proportionnelles à leur longueur d'onde, et donc inversement proportionnelles à la fréquence.

Outre les paramètres mentionnés dans le sous-chapitre 2.1 dans [44], d'autres paramètres sont essentiels lors de l'étude d'antennes fonctionnant dans les bandes micro-ondes et mmWave.

2.3.1 Paramètres *S*

Signifie paramètres de diffusion (scattering parameters). C'est un ensemble de mesures qui décrivent comment l'énergie se propage dans un champ électrique. Il comprend le gain de tension ainsi que la tension d'entrée et de sortie de l'appareil.

2.3.2 La « perte de retour »

Partie des paramètres *S*. Il identifie à quel point le rapport de l'entrée et de la sortie de l'impédance est par rapport à une valeur théorique.

2.3.3 *SWR* (Standing Wave Ratio)

Le rapport d'onde stationnaire de tension est une mesure de l'efficacité de transmission de la tension à l'antenne depuis la source d'alimentation via sa ligne d'alimentation. En tant que tel, le VSWR idéal ne devrait être que légèrement supérieur à 1 à la fréquence de fonctionnement prévue.

2.4 Structure EBG

EBG signifie bande interdite électromagnétique (electromagnetic band-gap), une structure actuellement appliquée dans de nouvelles antennes, principalement dans les réseaux d'antennes micro-ruban.

EBG est l'utilisation de patchs métalliques uniformément répétés disposés sur le substrat diélectrique. À la fréquence micro-ondes, l'EBG annule la propagation des ondes de surface et réfléchit complètement les ondes entrantes avec un changement de phase nul [7].

L'utilisation d'EBG minimise donc l'effet des ondes de surface, qui jouent un rôle dans la dégradation du diagramme de rayonnement de l'antenne, ainsi que dans l'augmentation des lobes arrière indésirables. Il augmente également le gain global de l'antenne.

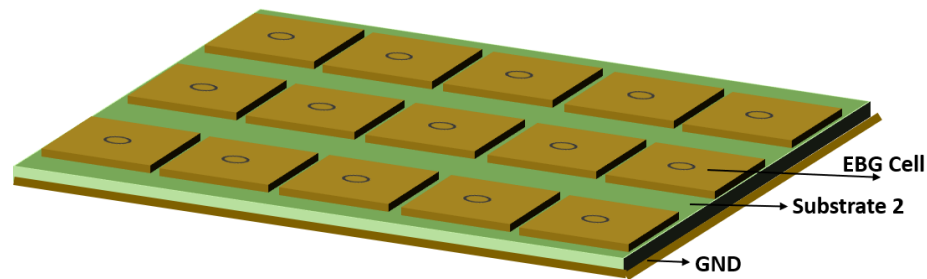


Figure 2.16 Type de champignon EBG [7].

Les espaces entre les éléments d'une antenne EBG affectent la fréquence; en augmentant et en diminuant leur taille, la capacité est proportionnellement affectée, ce qui amène l'antenne à décaler sa fréquence entre plus haut et plus bas, respectivement. L'utilisation d'EBG est considérée pour sa capacité à fournir de meilleures performances concernant la bande passante, ainsi que l'amélioration du gain.

Une structure EBG peut être décrite par une capacité équivalente C , introduite par les espaces entre les bords conducteurs des cellules adjacentes et l'inductance équivalente L , introduite par les bandes dépendantes des cellules adjacentes. La fréquence centrale de la bande interdite est donnée par [9] :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.47)$$

2.5 Description des outils utilisé pour le design de base

2.5.1 Le logiciel ANSYS HFSS

Le monde de l'électromagnétisme computationnel a été transformé en 1990. Avant 1990, l'électromagnétisme computationnel était en grande partie une activité universitaire axée sur la recherche en méthodes et algorithmes numériques. Après 1990, l'électromagnétisme informatique est devenu une activité commerciale dans le but de créer des logiciels pour modéliser les champs et les appareils électromagnétiques. La cause de cette transformation était HFSS®, développé par Ansoft Corporation (maintenant ANSYS) et mis en vente par Hewlett-Packard Corporation en octobre de la même année [45].

HFSS était révolutionnaire à plusieurs égards. C'était le premier logiciel commercial à permettre aux utilisateurs d'entrer des géométries arbitraires en trois dimensions, puis de résoudre le champ électromagnétique avec peu d'entrée utilisateur. C'était le premier programme à utiliser des éléments finis vectoriels tangentiels pour fournir des solutions de champ stables et précises à hautes fréquences. Et c'était le premier programme informatique à fournir des paramètres variationnellement stationnaires avec une précision sans précédent. Ces percées technologiques ont d'abord été commercialisées par son distributeur, Hewlett-Packard Corporation (HP), la principale société de test et de mesure à l'époque.

La facilité d'utilisation était la clé de l'acceptation de HFSS. Le logiciel pourrait prendre une géométrie arbitraire et calculer automatiquement un maillage d'éléments finis grossier pour cette géométrie, résoudre le problème sur ce maillage grossier, calculer l'erreur dans

chaque élément et affiner les éléments ayant les plus grandes erreurs. En résolvant le problème de manière itérative avec le maillage successivement raffiné, un processus appelé génération de maillage adaptatif, une solution de plus en plus précise serait obtenue. L'utilisateur a pu observer la convergence de la solution et avoir confiance dans l'exactitude du résultat. Le raffinement automatique du maillage adaptatif était une technologie révolutionnaire qui a permis à la simulation de champ électromagnétique de se généraliser [46].

Aujourd'hui, HFSS est utilisé par des milliers d'ingénieurs pour concevoir des produits meilleurs et plus fiables.

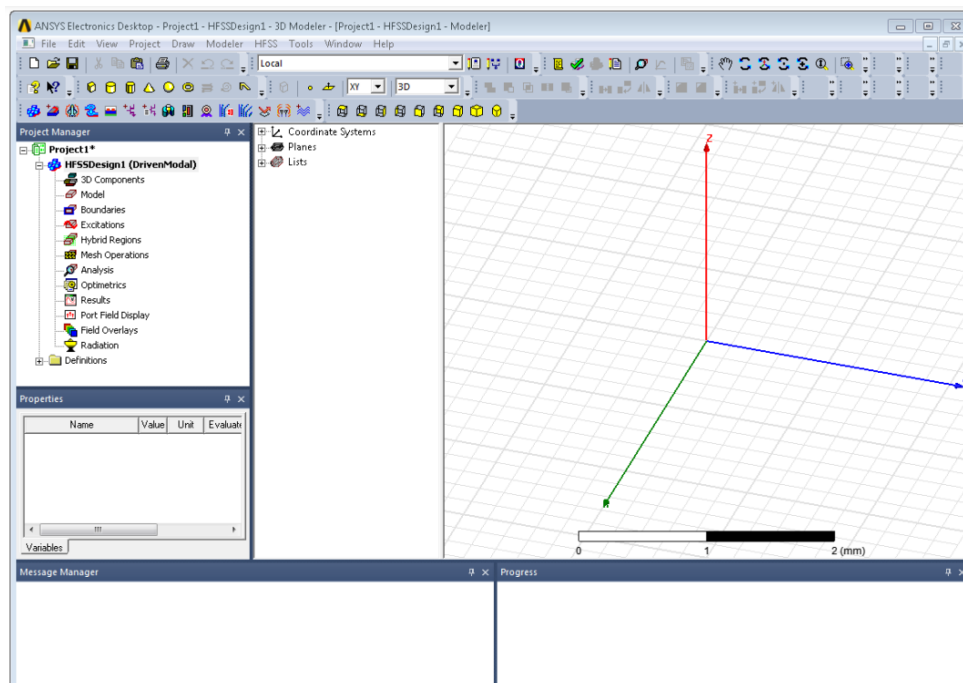


Figure 2.17 L'interface du logiciel ANSYS HFSS [46].

2.6 Description des outils utilisés pour apporter des améliorations

Une fois l'antenne conçue, elle doit être simulée pour étudier ses résultats. La simulation est un processus très important car elle supprime le besoin de matérialiser l'antenne juste pour l'étudier et découvrir qu'elle ne répond pas aux normes requises.

2.6.1 *Studio micro-ondes de CST*

CST Studio Suite est un logiciel robuste capable de simuler les effets des champs électromagnétiques presque identiques à une application tangible. Grâce au logiciel CST, l'antenne peut être utilisée pour tester et analyser. Après l'implémentation dans le logiciel, on peut obtenir les résultats des paramètres de l'antenne tels que le diagramme de rayonnement, le coefficient de réflexion et le gain.

CST STUDIO SUITE aide les concepteurs de systèmes électromagnétiques en intégrant étroitement les dernières méthodes de simulation dans une interface utilisateur intuitive. Avec des options de calcul hautes performances, des simulations de plus en plus complexes peuvent être effectuées. La version 2023 étudie à des fonctionnalités du solveur de domaine fréquentiel éléments de maillage tétraédrique incurvés d'un ordre mathématique élevé, possède un solveur d'équation intégrale avec la méthode multipolaire rapide à plusieurs niveaux pour des tailles de structure allant jusqu'à environ 1 000 longueurs d'onde, et utilise un solveur d'équation asymptotique basé sur la méthode des rayons rebondissants pour les structures plus grandes [47].

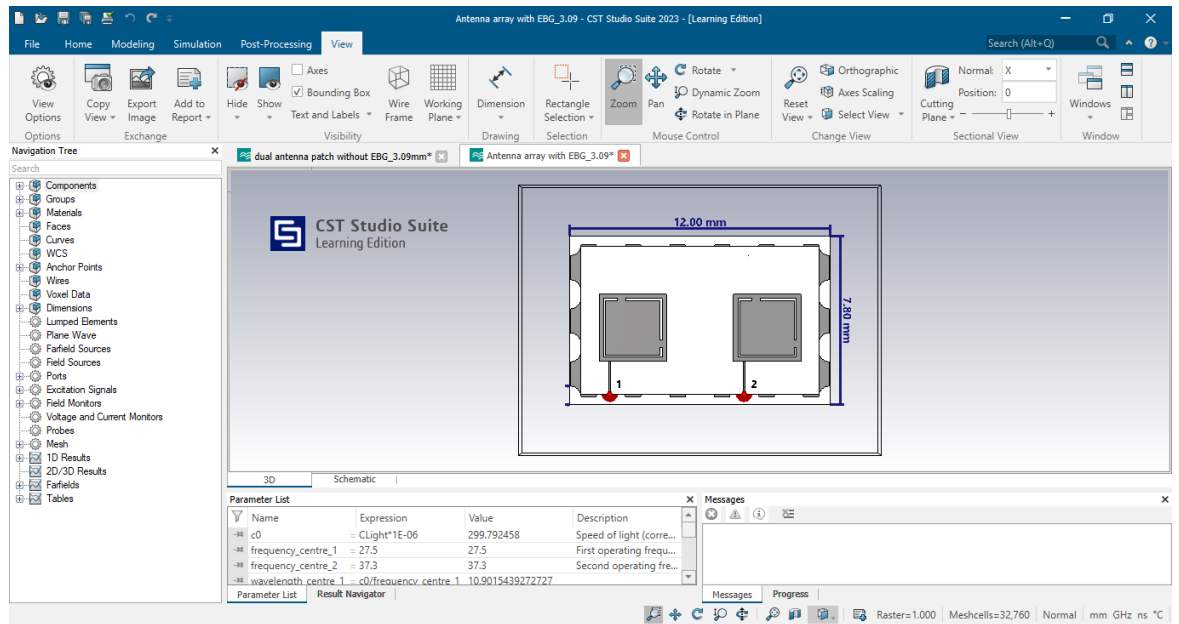


Figure 2.18 L'interface du logiciel CST STUDIO SUITE 2023 version étudiante

- Solveur de domaine de fréquence avec éléments courbes

Le solveur de domaine de fréquence CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) comportera des éléments de maillage tétraédrique courbes d'ordres géométriques élevés. Par rapport à l'utilisation d'éléments curvilignes plus simples (éléments incurvés de premier ordre), qui souffrent souvent de la création d'imprécisions dans la représentation du maillage, les éléments incurvés d'ordre supérieur offrent une représentation beaucoup plus fluide de surfaces arbitraires.

Comme pour tous les schémas d'adaptation de maillage, les simulations ne convergeront vers les résultats corrects que si des mécanismes tels que True Geometry Adaptation sont utilisés. Ceux-ci améliorent en fait la représentation du modèle d'entrée en continu, plutôt que de simplement affiner la première discrétisation du modèle. Les éléments courbes d'ordre supérieur seront également disponibles pour le solveur de modes propres CST MWS et le solveur résonant rapide [47].

- Analyse de sensibilité et de rendement

Solveur transitoire CST MWS fournit un calcul efficace des paramètres S à large bande et des résultats de champ en une seule simulation. Dans la version 2023, l'analyse de sensibilité peut évaluer les dépendances du paramètre S sur divers paramètres du modèle sur la base de cette seule simulation à large bande. D'autres évaluations pour différents ensembles de paramètres de modèle peuvent être dérivées sans redémarrer la simulation pleine onde. Par conséquent, l'analyse de rendement pour les modèles tridimensionnels (3D) complexes est disponible pour pratiquement aucun coût de calcul supplémentaire [47].

- Multiphysics

CST MPHYSICS STUDIO calcule les effets thermiques et mécaniques. Bien qu'elle ne soit pas totalement intégrée dans l'environnement de conception, dans la version 2023, la température calculée à partir des pertes électromagnétiques peut être utilisée pour modifier les paramètres du matériau pour une simulation de champ électromagnétique consécutive. CST MPHYSICS STUDIO dispose désormais également d'un solveur thermique sur une grille tétraédrique [47].

- EMC/EMI

CST STUDIO SUITE améliore l'intégration de CST CABLE STUDIO et du solveur CST MWS TLM (anciennement CST MICROSTRIPES) dans l'environnement de conception CST. Les utilisateurs intéressés par l'analyse des émissions rayonnées et de la susceptibilité bénéficieront d'un environnement unifié unique pour toutes les tâches de modélisation liées à la CEM, y compris la configuration et la simulation considérablement simplifiées du modèle.

Lors du prétraitement, la définition de modèles d'ouverture équivalents compacts et de faisceaux de câbles peut être effectuée dans l'environnement de conception familier de CST. Le couplage entre le champ électromagnétique 3D complet et les solveurs de câbles permet une simulation transitoire directe des problèmes de susceptibilité dans les systèmes contenant des faisceaux de câbles complexes, y compris des paires torsadées blindées [47].

- Intégrité du signal et de l'alimentation

Pour une précision élevée et pour adresser des dispositions avec des éléments non-planaires tels que des liaisons filaires, une simulation 3D complète est souvent nécessaire. CST propose des filtres d'importation pour les outils de mise en page des principaux fournisseurs d'EDA, tels que Cadence(R), Mentor Graphics(R) ou Zuken. Tous ces liens ouvrent la mise en page dans l'environnement de conception EM avant de configurer et d'exécuter des simulations.

CST STUDIO SUITE version 2023 étudiant relève les défis de la conception de systèmes électromagnétiques modernes en intégrant étroitement les dernières technologies de simulation dans une interface utilisateur intuitive. Des flux de travail rationalisés permettent d'aborder et de résoudre les problèmes du monde réel dans un environnement virtuel, conduisant finalement à un cycle de conception accéléré et plus rentable [47].

- Microwaves and RF/Optical
- Periodic Structure
- FSS, Metamaterial-Unit Cell
- Dispersion Diagram
- Frequency Domain

Chapitre 3 - Analyse descriptive du système d'antenne micro-ruban avec une structure EBG Ground

Dans ce chapitre, On va analyser un modèle d'antenne qui a inspiré notre étude. Le modèle est une conception de miniaturisation d'un réseau d'antennes micro-ruban avec sol EBG pour un réseau d'antennes patch à deux éléments.

La méthode des antennes avec sol EBG proposée dans la conception ne nécessite aucun espacement supplémentaire entre les deux éléments d'antennes et ils peuvent être extrêmement proches les uns des autres avec un faible couplage mutuel [1].

Une brève revue de littérature est importante afin de voir et de s'inspirer des différentes études et travaux de conception des réseaux d'antennes micro-ruban.

3.1 Travaux sur les méthodes de découplages et isolation entre les antennes

De nos jours, l'antenne patch micro-ruban (MPA) est largement utilisée en raison de ses principaux avantages par rapport aux autres. La plupart des appareils électroniques utilisent le MPA, et avec l'arrivée de la 5G, plusieurs technologies avancées sont intégrées dans leur conception, telles que le réseau MIMO, le MIMO massif [7].

Le défi d'aujourd'hui, c'est d'intégrer ces technologies dans une conception miniaturisée de MPA où les antennes peuvent être proches les uns des autres dans cette pièce électronique, ce qui cause un fort couplage mutuel. Donc ça joue entre la taille de MPA qu'on cherche à réduire de plus en plus et le nombre des antennes MIMO intégrés dans sa conception qu'on cherche à augmenter.

On sait bien que la technologie à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) fournit une méthode efficace pour améliorer l'efficacité du spectre et le débit de transmissions de données. Cependant, un réseau d'antennes MIMO pratique doit être compact en raison de l'espace limité pour satisfaire la demande de miniaturisation d'antennes à large bande dans une appareils électronique. C'est-à-dire que la distance entre deux éléments d'antenne adjacents est très courte approximativement une fraction de la longueur d'onde dans le vide. Par conséquent, un fort couplage mutuel se produit et augmente considérablement avec la diminution de la distance entre les deux éléments étroitement liés. Pendant ce temps, les performances du réseau d'antennes MIMO se détérioreront rapidement en termes d'efficacité des lobes latéraux [8], [9],[10], la corrélation d'enveloppe [11], [12] et le rapport signal sur bruit [10]. La capacité des canaux pour le système MIMO sera également considérablement réduite en raison du couplage mutuel. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier la technologie de réduction de couplage de réseau utilisée dans les systèmes d'antennes MIMO.

Actuellement, de nombreux articles sur la conception de découplage de l'antenne MIMO sont rapportés, qui peuvent être divisés dans les catégories suivantes :

1. Conception de la modification du sol : en chargeant des structures de dérivation ou en gravant des structures de sol défectueuses (DGS) sur le plan de masse, le courant induit qui provoque le couplage mutuel diminue et la masse commune est modifiée.

Les méthodes publiées varient également et décrivent des méthodes impliquant la gravure de la structure périodique en forme de S [13], l'intégration de la structure en forme d'arbre [14] et l'insertion de branches en forme de T.

2. Conception des lignes de neutralisation : Des lignes connectées de formes différentes [15], [16] sont introduites entre deux antennes pour annuler le couplage réactif. Cela a été utilisé dans des applications pratiques pour l'antenne de téléphone mobile. De plus, les rapports pertinents peuvent être étendus au WLAN monofréquence [17], aux doubles bandes [18] et à l'antenne UWB [19].

3. Conception des éléments parasites : Une structure couplée ou parasite [20] est chargée entre deux antennes [21]. Par conséquent, la structure n'est pas reliée à l'antenne de rayonnement et au sol [22].

4. Technologie de découplage de réseau : Le couplage entre deux antennes est fortement réduit par la théorie des circuits. Les exemples incluent les modes caractéristiques [23], la correspondance multi-ports conjugués (MC) [24] ainsi que le couplage de réseau de découplage de résonateurs (CRDN) [25], [26]. Le CRDN comme méthode de découplage est apparu pour la première fois dans les terminaux mobiles [25] ; par la suite, une technologie de découplage CRDN double bande a également été présentée dans [26].

En raison de ses nouvelles caractéristiques électromagnétiques, le matériau d'électroaimant artificiel est devenu un sujet de recherche universitaire brûlant pour lequel de nouveaux phénomènes électromagnétiques ont été découverts [27]. En particulier, l'émergence de la méta-surface a fortement favorisé le développement de matériaux électromagnétiques. Divers nouveaux dispositifs électromagnétiques et applications micro-ondes ont été développés. Par exemple, pour la réalisation de gains élevés, des antennes à cavité Fabry-Pérot, des antennes à réflecteur [28] et des antennes à réseau de transmission [29] sont proposées ; pour la réduction de la section efficace radar (RCS) [30], l'antenne à

faible RCS est réalisée ; pour la modulation de polarisation, couvertures polaires et antennes OAM [31] sont présentés. De plus, le métamatériau ou la méta-surface peut également être utilisé pour le découplage dans le réseau d'antennes MIMO.

Basées sur le mécanisme de travail du découplage avec les métamatériaux, ces méthodes de découplage peuvent être divisées en trois types comme suit :

1. Bande interdite électromagnétique (EBG) et métamatériaux de guide d'ondes : ils peuvent inhiber l'onde de surface dans une certaine mesure. Des métamatériaux de guides d'ondes ont été conçus et présentés [32], [33]. De plus, la structure EBG peut être utilisée pour découpler les antennes réseau dans [34]. De plus, de nombreuses structures déformées de l'EBG sont présentées, telles qu'une structure EBG à deux couches [35], un EBG accordable utilisant la technique de polarisation, ainsi que la combinaison de l'action de l'EBG et des SRR [36] pour améliorer l'isolement. De plus, l'EBG pour le découplage peut être appliqué dans les antennes UWB [36] et même dans les champs d'ondes millimétriques [38].

2. Isolants en méta-cloak et métamatériau : certaines mesures ont été adaptées pour réduire le couplage en champ proche. Dans [50], la technologie d'isolant EM en métamatériau est introduite pour réduire le couplage d'antenne dans le plan E, qui a été réalisé dans un réseau à cinq éléments. Dans [40], un mur d'isolation en métamatériau est utilisé entre deux antennes à résonateur diélectrique (DRA) pour le découplage à 60 GHz. Ce type de méthode de découplage a été réalisé dans des applications térahertz (THz) en utilisant des méta-surfaces de graphène [41].

3. Conception de découplage de méta-surface : un certain espace de découplage est requis entre deux antennes couplées en utilisant les deux méthodes basées sur les

métamatériaux mentionnées ci-dessus. Pour compenser les lacunes du petit espace dans un réseau compact, la technologie de découplage des méta-surfaces proposée a émergé. De plus, l'utilisation d'une surface de découplage antenne réseau pour l'amélioration de l'isolement est d'abord présentée dans deux exemples pratiques [42]. Ensuite, une surface de découplage de réseau modifiée est utilisée pour le découplage d'une antenne double bande [43]. Ensuite, une surface EBG [1] est adaptée comme terrain de découplage dans la bande d'onde millimétrique qui est différente de la méta-surface.

3.2 Description physique du système réseau d'antennes avec EBG Ground

La modélisation physique d'antenne dans l'article [1] sur CST Suite studio m'a permis de comprendre les constitutions physiques de ce modèle et on peut le deviser sur trois parties.

La structure de l'antennes proposé dans l'article [1] a été simulée et vérifiée avec le logiciel ANSYS HFSS.

3.2.1 Conception de la cellule unitaire EBG

La figure 3.1 montre la géométrie de la cellule unitaire, La cellule unitaire comprend un carré métallique (EBG patch) gravé sur un substrat diélectrique (Substrate) et connecté au plan de masse (Ground) par un via métallique (Metal Via).

- EBG patch : est conçu avec un conducteur électrique (On choisit le PEC sur le logiciel ANSYS HFSS ou CST Suite Studio) avec une épaisseur 0,035 mm, longueur $wa - \frac{G}{2} = 1,75 \text{ mm}$ et largeur $wb - \frac{G}{2} = 1,35 \text{ mm}$.

G présente la largeur de la fente qui est 0,35 mm.

- Substrate : est conçu avec la matière Rogers 4003 avec une épaisseur $H_{\text{cbg}}=0,203\text{mm}$, une longueur $w_a=2,1\text{ mm}$ et une largeur $w_b=1,7\text{ mm}$.
- Ground : conçu avec un conducteur électrique (PEC), il a les mêmes longueur et largeur que le substrate avec une épaisseur $0,035\text{mm}$.
- Metal Via : qui relie EBG patch avec le Ground, il a une forme d'un tube vide à l'intérieur avec un rayon de $0,1\text{ mm}$ et une longueur de $0,273\text{ mm}$.

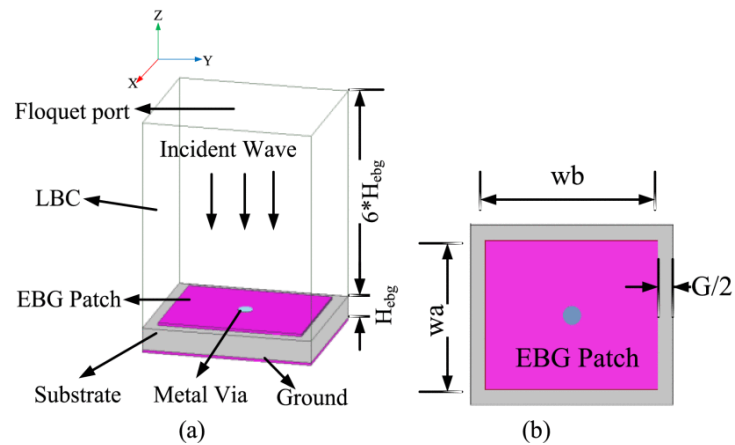


Figure 3.1 (a) Modèle de simulation de la cellule EBG. (b) Vue de dessus de la cellule EBG [1].

La figure 3.2 présente ma réalisation de la cellule EBG sur le logiciel CST Suite Studio, ou on voit les dimensions de cette cellule sur « Paramater List » et sur la zone de la modélisation de logiciel.

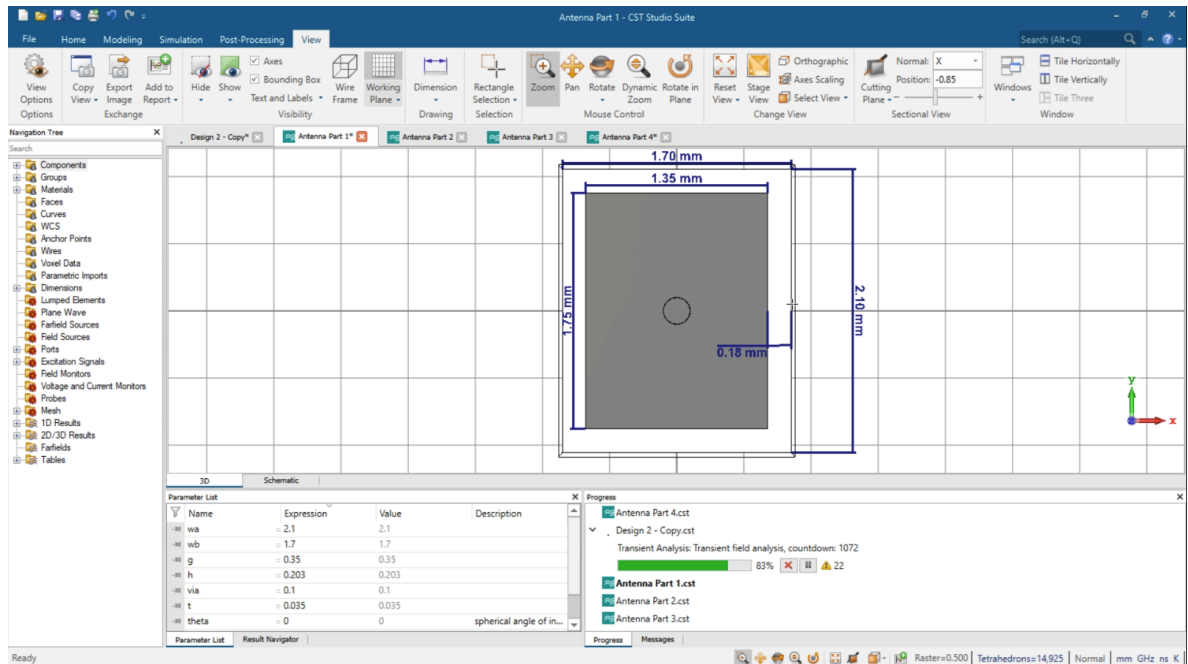


Figure 3.2 Réalisation de la cellule EBG sur le logiciel CST Suite Studio.

3.2.2 Conception de la couche EBG

Designer sur la figure 3.3 (a) avec le nom EBG layer, elle est composée de 6 cellules unitaires en colonne et 3 unités en ligne comme montré dans la figure 3.3 (b).

- Le « EBG patch » des cellules EBG reste avec les mêmes dimensions
- Les longueurs et largeurs latérales de « Substrate » et « Ground » sont $T_a = 15$ mm et $T_b = 12,7$ mm.
- Les épaisseurs restent les mêmes, $H_{ebg} = 0,203$ mm pour le « Substrate », et $0,035$ mm pour le « Ground » et les « EBG Patches ».
- La distance entre les « EBG patches » est $G = 0,35$ mm.

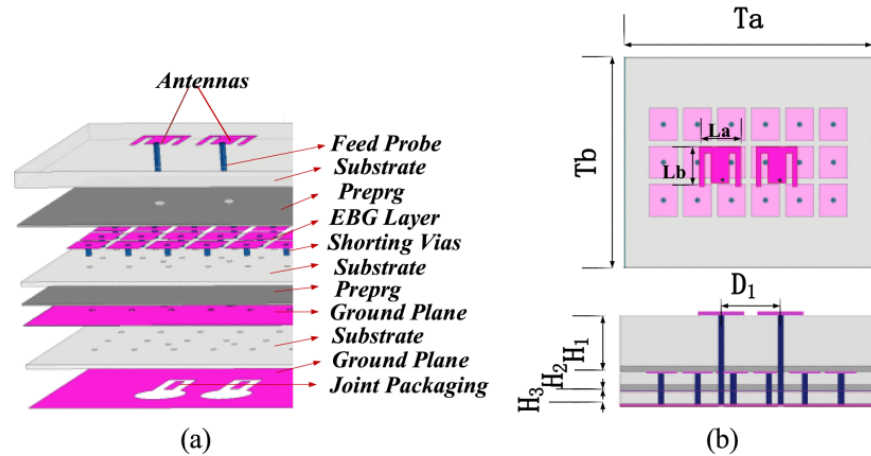


Figure 3.3 (a) Pile de couches et (b) vue de dessus et vue latérale du réseau d'antennes proposé avec le sol EBG [1].

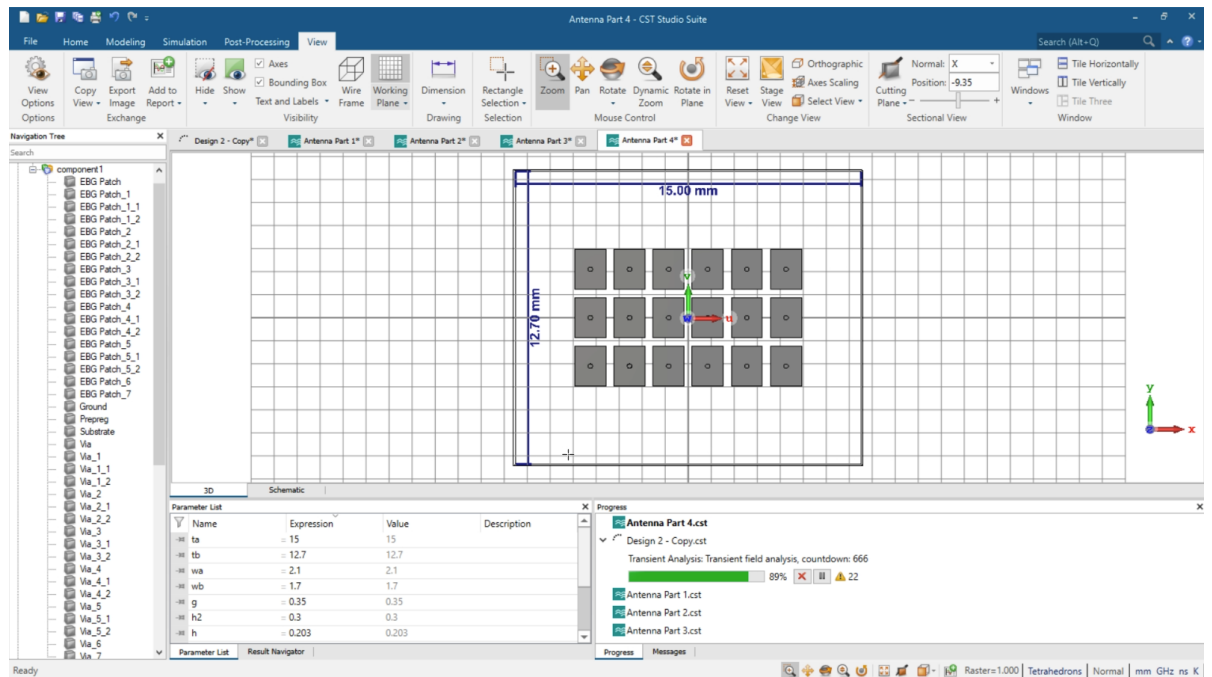


Figure 3.4 Réalisation de la couche EBG du réseau d'antennes proposé sur le logiciel CST Suite Studio.

La figure 3.3 présente ma réalisation de la couche « EBG Layer » sur le logiciel CST Suite Studio, ou on voit les dimensions de cette couche sur « Paramater List » et sur la zone de la modélisation de logiciel.

3.2.3 Conception du système en complet

Après la réalisation de la couche EBG, on ajoute d'autres couches l'une sur/sous les autres, le tableau 1 montre les dimensions de ces couches qui sont classées par rapport à leurs positions dans la figure 3.3 (a).

Couche	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Matière
2 Antennas	$L_a=2,5$	$L_b=2,4$	$t= 0,035$	PEC
Substrate	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$H_2=0,2$	Rogers 4003
Preprg	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$H_2-(t+H_{ebg})$	Rogers 4450
EBG Layer	$w_a= 2,1$	$w_b= 1,7$	$t = 0,035$	PEC
Substrate	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$H_{ebg}=0,203$	Rogers 4003
Preprg	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$H_3=0,2$	Rogers 4450
Ground Plane	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$0,035$	PEC
Substrate	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$H_3=0,2$	Rogers 4003
Ground Plane	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$0,035$	PEC
Joint Packaging	$T_a= 15$	$T_b= 12,7$	$0,035$	PEC

Tableau 1 Les dimensions des différentes couches de l'antenne proposé dans l'article1 avec le sol EBG [1].

Pour les deux antennes micro-ruban en haut de la structure, elles ont une forme de E et elles sont placées côte à côte et couplées dans le plan H, et leur distance centre à centre est $D_1 = 3,4$ mm.

Les vias EBG sont perforés entre la couche 2 et la couche 3, tandis que les alimentations coaxiales des deux antennes traversent toutes les couches.

3.3 L'état actuel de design et ces performances

Le design proposé est un réseau d'antennes micro-ruban miniaturisé composé de deux éléments d'antennes en forme de E peuvent être placés à proximité l'un de l'autre par une distance de centre à centre de $0,32 \lambda$ longueur d'onde alors que la distance entre les éléments voisins de l'antenne doit être supérieure à $0,5 \lambda$. Il est constitué de plusieurs couches comme on peut voir dans la figure 3.3 et il fonctionne dans la bande de fréquences 5G New Radio (26500 MHz - 29500 MHz).

3.3.1 L'approche de découplage

La méthode de réduction du couplage mutuel (souvent appelées découplage) utilisée pour le design est une surface de structures EBG appliquée comme sol pour deux antennes patch étroitement placés l'un de l'autre. En anglais on appelle cette approche de découplage « EBG Ground ». Cette approche sera bien définie dans le chapitre 4.

3.3.2 Les performances du système

L'insertion du EBG Ground sur ce réseau d'antenne a permis d'obtenir une amélioration de 15 dB par rapport au réseau avec une masse conventionnelle entièrement métallique [1].

Decoupling Approach	C to C Spacing	Max Coupling Reduction	Center Frequency	Profile increase	Number of antenna
EBG Gound	$0,3 \lambda$	10 dB	27 GHz	$0,028 \lambda$	2 elements

Tableau 2 Les performances du design proposé dans l'article [1].

3.3.3 Les résultats du paramètre S

On peut observer que le réseau avec sol EBG maintient de bonnes performances d'adaptation tandis que l'isolement entre les éléments d'antenne est amélioré d'au moins 10 dB, comme le montre la figure 3.5(b) [1].

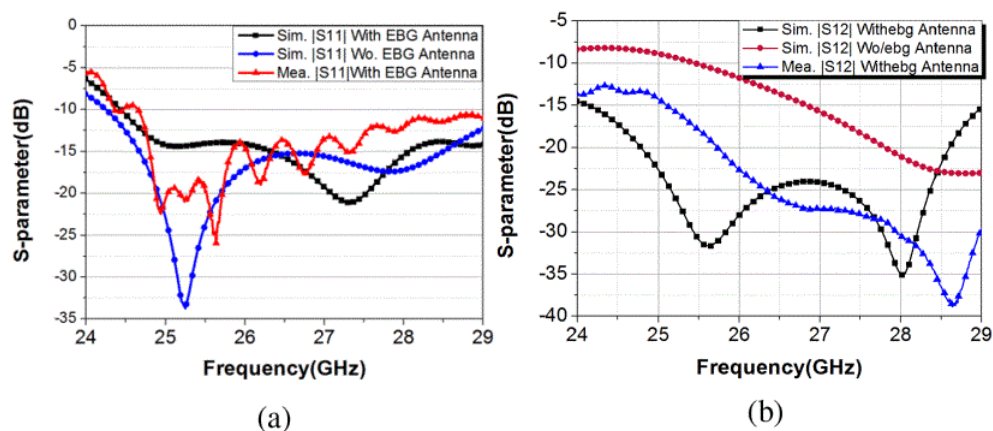


Figure 3.5 Simulation du Paramètres-S avec et sans EBG broyé conjointement avec mesurées Paramètres-S avec EBG Ground conçu. (a) une réflexion. (b) Isolement [1].

3.3.4 Les diagrammes de rayonnement du système

Les diagrammes de rayonnement du réseau d'antennes avec et sans sol EBG dans les plans E et H sont superposés sur la figure 3.7. Dans les cas du plan E, les motifs du réseau sans masse EBG sont inclinés d'au moins 30° tandis que les motifs du réseau avec masse EBG ont leurs pics à près de 0° . Dans les cas du plan H, il est évident que les modèles

d'excitation à un seul port avec la masse EBG sont bien meilleurs que ceux sans la masse EBG. Le modèle pour le réseau avec la masse EBG alors que les deux éléments sont également excités surpasse le réseau sans la masse EBG en termes de gain de crête et de rapport avant/arrière [1].

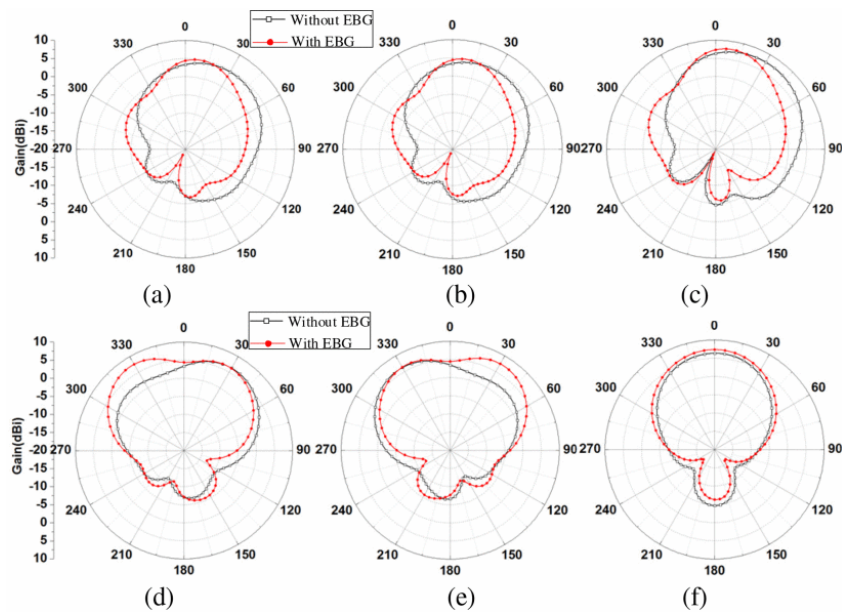


Figure 3.6 Diagramme de rayonnement simulé avec et sans sol EBG dans le plan E tandis que (a) le port 1 est excité ; (b) le port 2 est excité ; (c) les ports 1 et 2 sont excités ; et dans le plan H pendant que (d) le port 1 est excité ; (e) le port 2 est excité ; et (f) les ports 1 et 2 sont excités [1].

3.3.5 Les résultats de la polarisation

Pour démontrer davantage l'avantage d'utiliser des cellules unitaires EBG rectangulaires par rapport aux cellules unitaires EBG carrées classiques, une courbe de polarisation croisée avec une structure EBG carrée est illustrée sur la figure 3.8. Il est évident que la discrimination de polarisation croisée (XPD) peut être améliorée d'environ 10 dB [1].

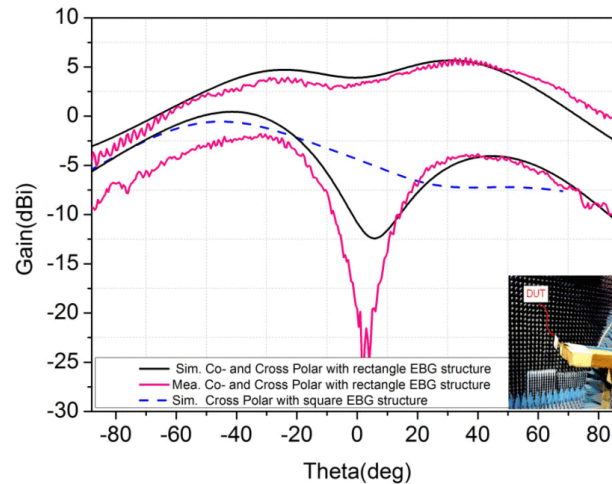


Figure 3.7 Diagramme de rayonnement mesuré pendant que l'antenne 1 est excitée avec l'antenne 2 terminée avec une charge adaptée à 26 GHz [1].

3.4 Stratégie d'amélioration du design

3.4.1 Facteurs à optimiser

L'amélioration du design se basera sur plusieurs facteurs :

- *Amélioration des performances et réduction des Interactions*

Afin d'améliorer les performances et de minimiser les interactions, nous examinerons le modèle de référence présenté dans l'article 1, lequel fonctionne sur une seule bande de fréquence. Par la suite, notre approche consistera à concevoir un réseau d'antennes opérant sur une double bande de fréquence. Nous nous attacherons également à optimiser l'isolation entre les éléments d'antennes, à réduire le couplage mutuel et à augmenter le gain. Une attention particulière sera accordée aux implications de la distance entre les antennes, aux effets induits par le changement de matériaux, et des comparaisons seront établies avec des travaux antérieurs.

- *Réduction de Taille et Économie d'Espace*

La méthode de conception adoptée ici implique la création d'un réseau d'antennes multicouches avec une structure EBG, visant à atténuer les interférences entre les éléments d'antenne et à minimiser la taille de l'antenne autant que possible. Cette approche permet également de réduire la distance entre les antennes, conduisant ainsi à une diminution significative de la taille globale du réseau d'antennes. Dans le cadre de cette démarche, nous accordons une importance particulière à la réduction du nombre de couches ainsi que de leur épaisseur pour obtenir une structure plus compacte. L'intégration de matériaux à haute permittivité est une composante essentielle de cette optimisation, contribuant à réduire la longueur des éléments tout en maintenant de bonnes performances. Afin d'identifier les matériaux les plus performants, nous entreprendrons une recherche ciblée. Pour faciliter ces ajustements, le logiciel CST Suite Studio sera utilisé pour optimiser divers paramètres tels que le nombre de couches, leurs épaisseurs, leurs longueurs, et le choix des matériaux.

- *Simplicité et Facilité de Conception et Fabrication*

Pour simplifier le processus de conception et de fabrication, il est essentiel de concevoir des antennes avec des formes géométriques simples et d'opter pour des techniques d'assemblage directes. Réduire le nombre de composants contribuera également à la simplicité du processus. En outre, l'utilisation d'une alimentation unifiée, telle qu'une alimentation en ligne micro-ruban, permettra de rationaliser le système d'alimentation, simplifiant ainsi la conception globale.

3.4.2 *Étapes de conception de l'antenne*

- Choix du Modèle d'Antenne Micro-ruban :

Dans la perspective d'améliorer la portée du réseau d'antennes, notre objectif est de modéliser une antenne capable de fonctionner sur deux ou plusieurs bandes de fréquence. La sélection du type d'alimentation pour notre patch d'antenne micro-ruban revêt une importance cruciale à cette étape, nous permettant ainsi de concevoir un modèle simple, unique, et facile à mettre en œuvre tant du point de vue de la conception que de la fabrication. Nous explorons également des avenues pour réduire le nombre de couches constituant le réseau d'antennes, contribuant ainsi à diminuer son épaisseur.

- Modélisation du Réseau d'Antennes 1 x 2

Nous procédons à la combinaison d'antennes micro-ruban pour former un réseau sans introduire la structure EBG. Nous analysons ensuite les conséquences de la variation de la distance entre les deux antennes au sein de notre réseau. Un aspect clé de cette étape est la recherche de matériaux offrant des résultats optimaux.

- Modélisation de la cellule unitaire EBG

La structure de la cellule unitaire EBG, composée d'un patch métallique en forme de plaque relié à un plan de masse métallique, est initialement conçue dans le modèle du réseau d'antennes décrit dans l'article 1. Notre objectif consiste à explorer différentes formes de cellules unitaires et à adopter celle offrant des résultats plus performants.

- Intégration de la structure EBG

Après la réalisation des étapes précédentes, nous procédons à la conception de la structure du réseau EBG, que nous intégrons ensuite avec le réseau d'antennes 2 x 1. Nous optons pour la structure EBG avec le nombre de cellules répondant davantage à nos objectifs, permettant ainsi d'équilibrer la taille et les paramètres à performés dans notre réseau d'antennes visés dans les objectifs notre travail.

- Étude Comparative

Après la modélisation, une étude comparative approfondie sera réalisée, permettant d'évaluer les performances obtenues.

Chapitre 4 - Modélisation numérique

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation numérique de l'antenne proposée dans l'objectif de ce travail. Nous réaliserons également une analyse comparative des résultats obtenus par rapport au modèle de référence sur lequel nous nous sommes basés. Cette approche permettra de valider les améliorations apportées et de vérifier l'efficacité des modifications proposées.

4.1 Modélisation avec logiciel

Dans la figure 4.1, l'antenne patch micro-ruban à profil bas proposée est conçue sur un stratifié d'une épaisseur de 0,26 mm ayant une dimension de 10×10 mm². Le substrat utilisé a une permittivité relative ϵ_r et une tangente de perte diélectrique $\tan\delta$ 2,2 et 0,038 respectivement.

La conception proposée comprend une évaluation étape par étape depuis un simple patch carré jusqu'à une antenne patch à fente optimisée avec mise à la terre complète. Le processus est résumé en 3 étapes et a été simulé et vérifié avec le logiciel CST Suite Studio comme indiqué sur la figure 4.1. Le résultat de chaque étape est présenté sur la figure 4.2.

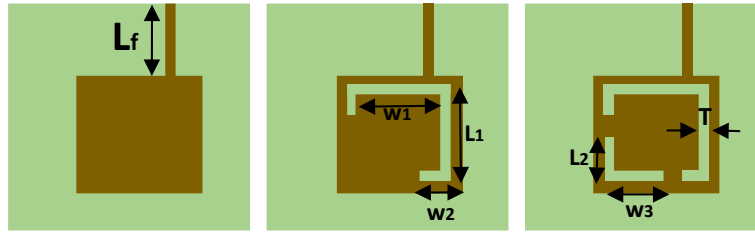


Figure 4.1 Antenne patch sans emplacement b) avec un slot c) avec deux slots.

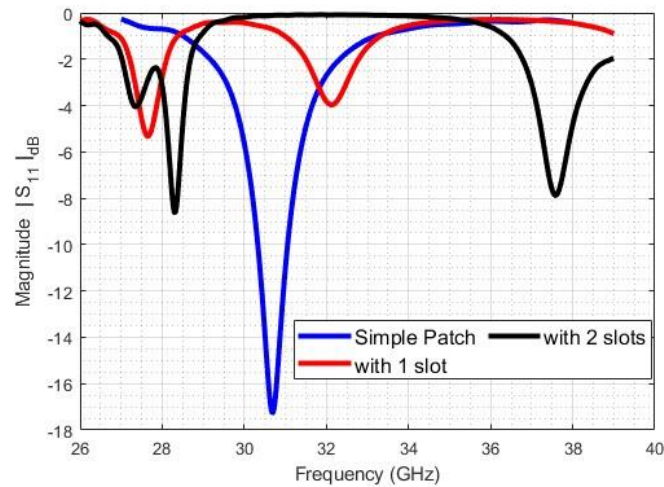


Figure 4.2 Coefficients de réflexion (S_{11}) de l'antenne patch.

La figure 4.2 montre que la structure finale de l'élément d'antenne patch nous a permis d'atteindre une double fréquence sur laquelle notre réseau peut fonctionner. Ainsi, l'un de nos objectifs a été atteint. Cette évolution vers une double bande de fréquence illustre la polyvalence du réseau d'antennes, ouvrant la voie à des applications plus diversifiées dans le domaine des communications sans fil.

Cependant, la préoccupation subsiste quant aux faibles valeurs de réflexion obtenues qui ne dépassent pas les -10 dB. Il est essentiel de souligner que des valeurs plus faibles de S_{11} indiquent une meilleure adaptation d'impédance entre l'antenne et le système, ce qui entraîne une réduction de la réflexion d'énergie. Une valeur de S_{11} de -10 dB, par exemple,

signifie que seulement 0,1 % de l'énergie est réfléchi, ce qui est considéré comme une adaptation d'impédance satisfaisante. L'objectif, en intégrant la structure EBG, serait d'atteindre des valeurs de S11 encore plus faibles que celles actuellement obtenues, afin d'optimiser davantage les performances du réseau d'antennes.

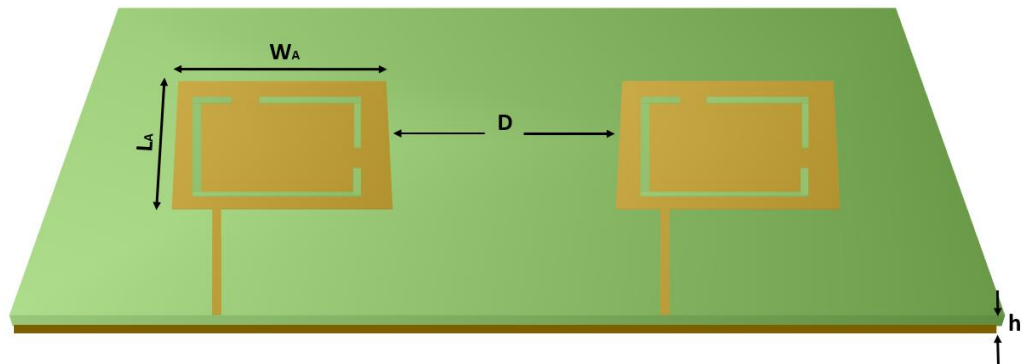


Figure 4.3 Antenne 1 x 2 éléments sans et avec la structure EBG.

La figure 4.3 offre un aperçu de la structure modélisée du réseau d'antennes 1 x 2 avant l'ajout de la structure EBG. Ce réseau est composé de deux éléments d'antennes patch disposés côte à côte dans un plan en h (un plan de masse et un substrat diélectrique). La distance entre ces éléments est de $D = 2$ mm. L'évaluation de coefficient de réflexion et de l'isolation entre la paire d'antennes sur une masse métallique standard sont présentés dans la figure 4.4.

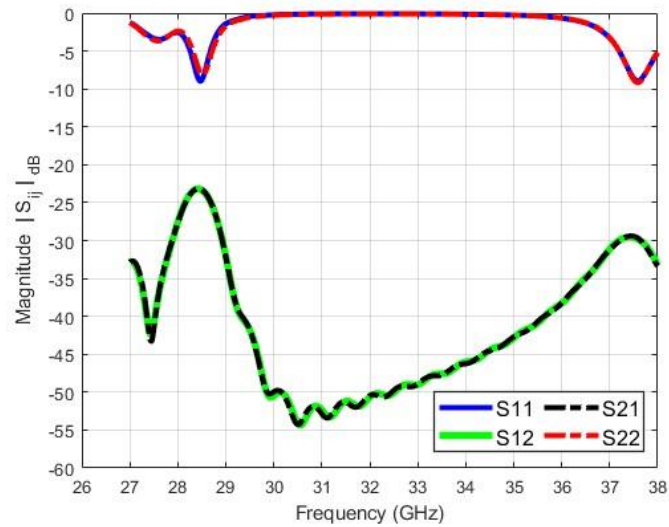


Figure 4.4 Coefficient de réflexion et de transmission d'un réseau 1 x 2.

Les résultats des mesures de coefficient de réflexion, exprimés par S11, sont significatifs. À une fréquence de 28 GHz, le S11 atteint approximativement -9 dB, tandis qu'à 38 GHz, il maintient une valeur robuste de -8 dB. Ces résultats confirment la transition réussie d'un réseau d'antennes single bande à un réseau d'antennes double bande de fréquence, conformément aux bandes de fréquences souhaitées, mais reste que ces valeurs sont très faibles pour que ce réseau d'antenne aura meilleure performance.

Une structure EBG très courante, représentée sur la figure 4.5 (a), est constituée d'un réseau 2D de plaques métalliques reliées de manière conductrice à un plan de masse via un via plaqué métal. Le modèle équivalent de la structure EBG simple est constitué d'un condensateur et d'un conducteur connectés en parallèle comme le montre la figure 4.5 (b).

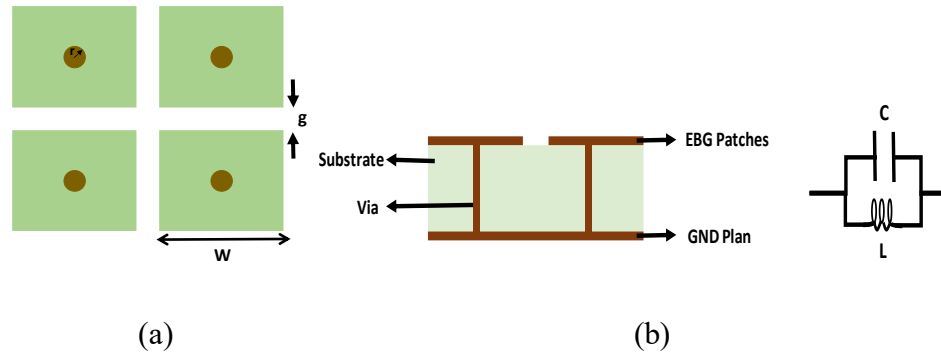


Figure 4.5 a) Structure EBG b) Vue latérale de la structure EBG et de son modèle de circuit équivalent.

L'écart g entre les patches représentés par le condensateur (C) et le plan au sol montre l'inducteur (L) et sa valeur de C et L peut être trouvée en utilisant les équations (1) et (2).

$$L = 0.2 \times h \left[\ln\left(\frac{2h}{r}\right) - 0.75 \right] \quad (4.1)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{w^2}{h} \quad (4.2)$$

Où h et r représentent respectivement la hauteur et le rayon du via, tandis que w désigne la largeur des patches EBG.

Parameters	Value (mm)	Parameters	Value (mm)
LA	3.1	WA	3.1
Lf	1.5	W1	2.5
L1	2.7	W2	0.66
L2	1.92	W3	1.68
L	13.6	W	2.05
g	0.35	h	0.3
r1	0.1	r2	1.35

Tableau 3 Dimension du réseau d'antennes double bande proposé.

4.2 Proposition des modifications

4.2.1 Conception de cellule unitaire EBG

Une structure EBG est constituée d'un patch métallique en forme de plaque conçu pour sa fréquence de fonctionnement. Il est relié à un plan de masse métallique à travers un via métallique d'un rayon de r_1 , comme le montre la figure 4.6. La cellule unitaire est conçue sur un substrat en Rogers RT 5880 d'une épaisseur de 0,26 mm. Pour la condition aux limites, l'excitation des ports Floquet est utilisée.

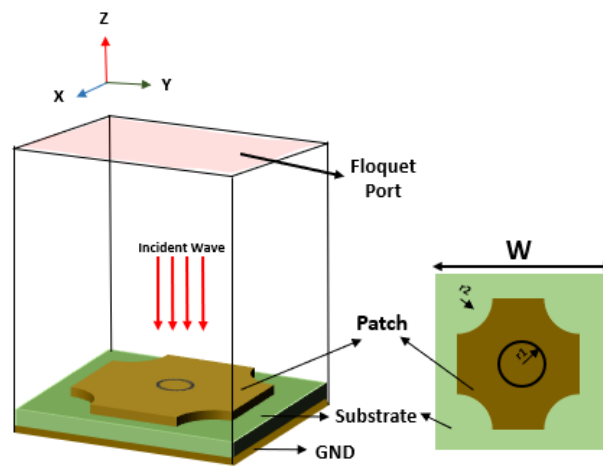


Figure 4.6 Cellule unitaire de la structure EBG.

La figure 4.7 montre la phase de réflexion de la cellule unitaire, où le passage par zéro représente la fréquence de fonctionnement et la phase autour de 0 degré représente la bande passante de fonctionnement.

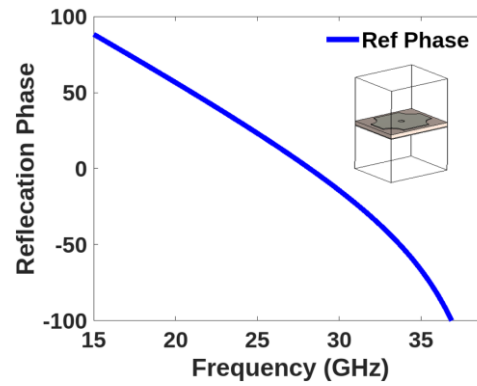


Figure 4.7 Phase de réflexion de la cellule de l'unité EBG.

Le réseau de structure EBG 3×6 est utilisé comme masse pour réduire le couplage mutuel et la distance entre éléments, comme le montre la figure 4.8 (a). Le réseau d'antennes avec couche de masse EBG se compose de deux parties (quatre couches), la première avec des patches d'antenne, la seconde avec le patch EBG, comme le montre la figure 4.8 (b).

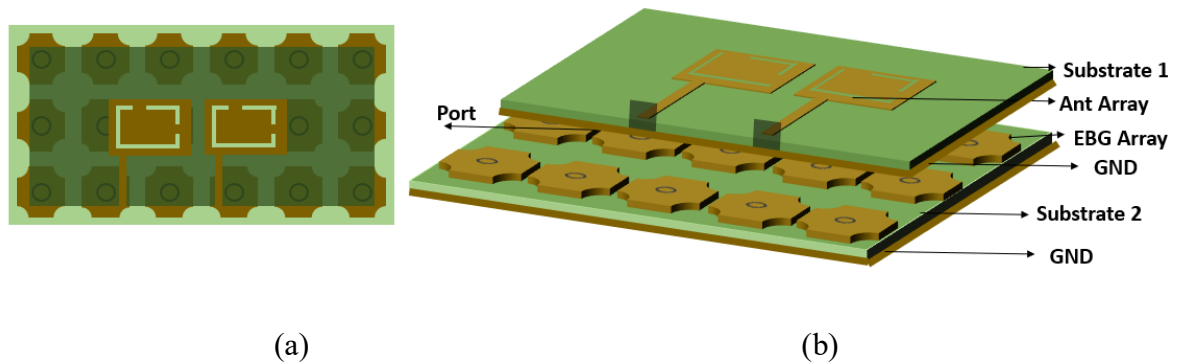


Figure 4.8 Réseau d'antennes de 1×2 avec EBG a) Vue de dessus b) Empilement de couches.

Couches	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Matière
Cellule EBG	$2.1-r_2=1.1$	$1.7-r_2=0.7$	0,03	PEC
Substrat	12	7.8	0.26	Rogers RT5880
Plan de masse	12	7.8	0.4	PEC

Tableau 4 Les dimensions des différentes couches constituant la structure EBG.

4.2.2 Résultats et discussions

a) Perte de retour et isolement

Le réseau d'antennes utilisant une masse EBG est simulé, et on observe que le réseau avec une masse EBG maintient une perte de réflexion inférieure à -10 dB, tandis que le paramètre d'isolement du système reste inférieur à -20 dB sur nos fréquences de fonctionnement.

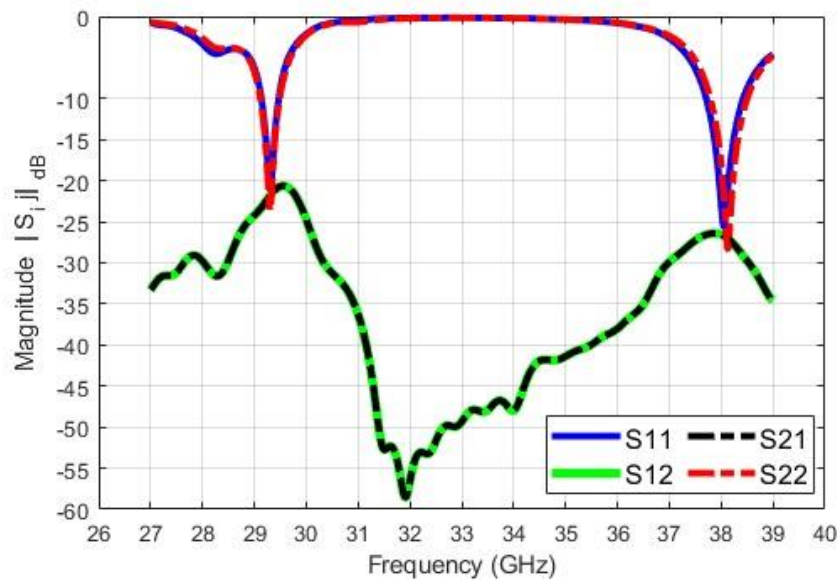


Figure 4.9 Paramètre de réflexion et d'isolement du réseau d'antennes double bande avec EBG.

La figure 4.10 met en évidence les variations de l'isolement en fonction de la distance entre deux éléments. L'augmentation de cette distance en présence de la masse EBG contribue à améliorer à la fois le couplage mutuel et la perte de retour, et inversement.

L'étude a été réalisée en examinant trois distances distinctes entre les éléments d'antennes patch, soit 2 mm, 1.1 mm et 0.6 mm. À chacune de ces distances, l'antenne fonctionne de manière efficace. Notamment, à mesure que les antennes se rapprochent, on observe une amélioration du gain, comme illustré dans la figure 5.11. Cependant, la distance de 2 mm offre la meilleure valeur d'isolation, tandis que celle de 0.6 mm procure le meilleur gain. Les valeurs de S11 restent satisfaisantes dans les trois cas, soulignant la robustesse du réseau d'antennes sur une plage de distances variées.

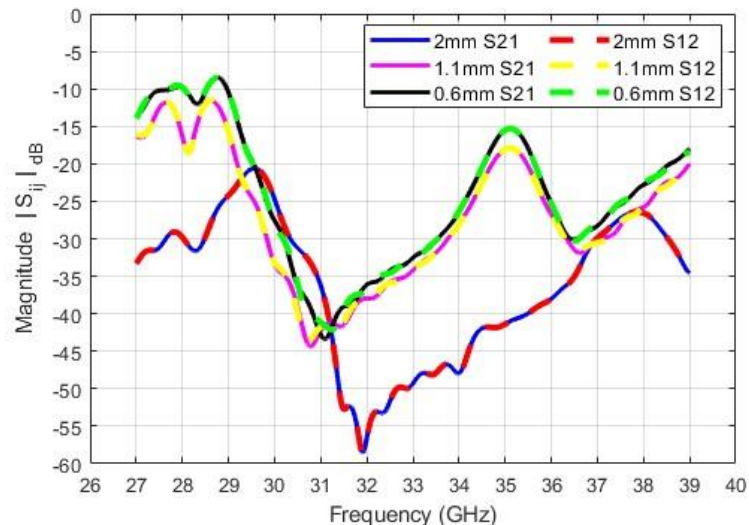


Figure 4.10 Isolement par rapport à la variation de distance inter-éléments.

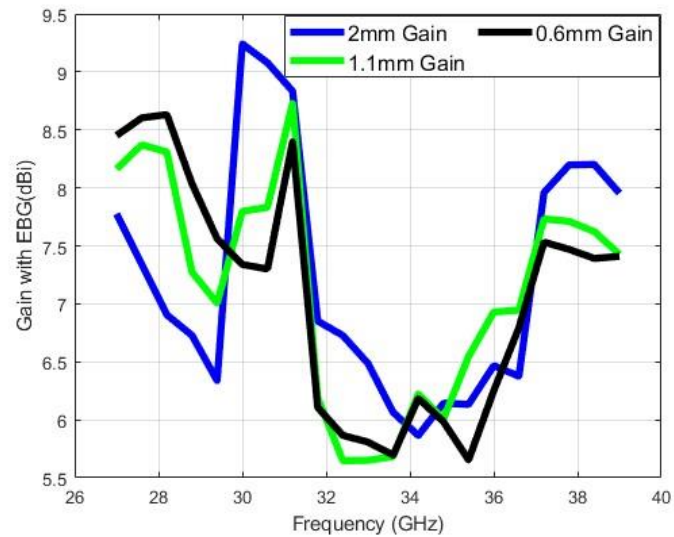
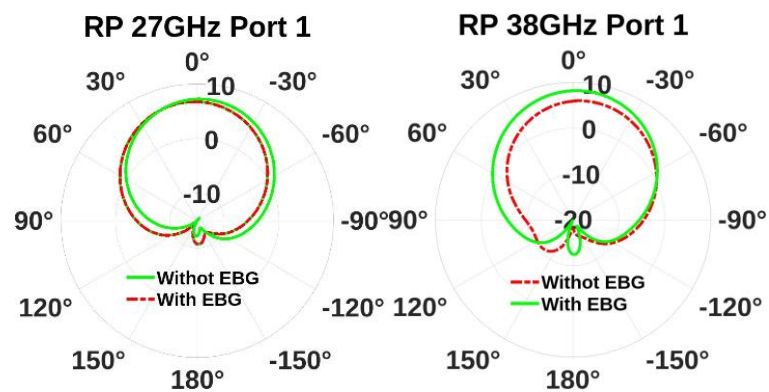


Figure 4.11 Variations du gain du réseau d'antennes double bande avec EBG en fonction des distances inter-éléments.

b) Modèle de rayonnement

Le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes 1 x 2 proposé, avec et sans EBG, est présenté dans les figures 4.12 et 4.13 à des fréquences de fonctionnement de 28 GHz et 38 GHz, respectivement.



(a) (b)

Figure 4.12 Diagramme de rayonnement lorsque le port 1 est actif a) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 28 GHz b) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 38GHz

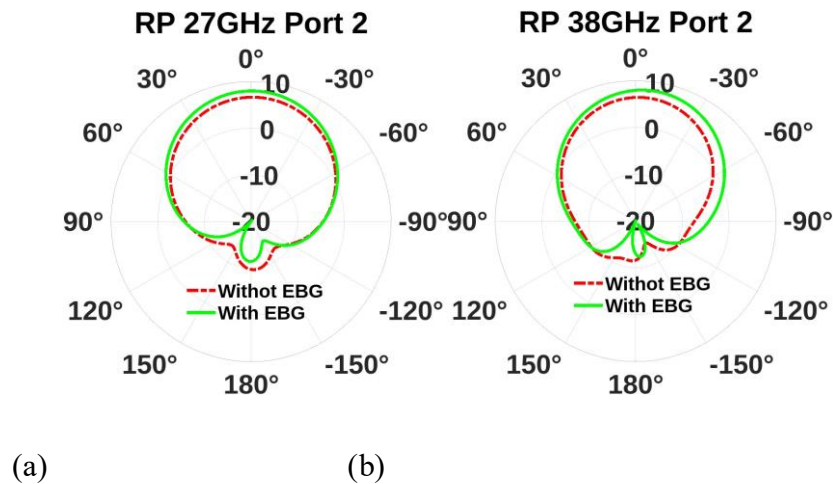


Figure 4.13 Diagramme de rayonnement lorsque le port 2 est actif a) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 28 GHz b) diagrammes de rayonnement avec et sans EBG à 38GHz

À partir des chiffres du diagramme de rayonnement, nous pouvons analyser que lorsque la masse conventionnelle est remplacée par EBG, le niveau des lobes secondaires s'améliore et le gain du lobe principal augmente, ce qui est évident que le faisceau avec EBG est meilleur que sans masse EBG.

4.3 Analyse comparative

Dans la figure 4.14, l'influence du changement de matériau de substrat sur les paramètres de l'antenne est clairement mise en évidence. Lorsque le matériau utilisé est le Rogers 4003C, l'antenne opère dans les bandes de fréquences de 31 GHz et 45 GHz, offrant une isolation de -21 dB et -18 dB, ainsi que des paramètres de réflexion de -14 dB et -20 dB respectivement.

En revanche, en utilisant le matériau Rogers RT5880, des améliorations significatives des valeurs de réflexion et d'isolation sont observées. La figure illustre que l'antenne fonctionne dans la bande de 28 GHz avec une valeur de réflexion de -23 dB et une isolation

de -20 dB. De plus, à la fréquence de 38 GHz, la valeur de réflexion atteint -26 dB, accompagnée d'une isolation de -26 dB.

Il est ainsi démontré que le changement de matériau de substrat a un impact direct sur les bandes de fréquences dans lesquelles l'antenne peut opérer de manière optimale. Que ce soit avec le Rogers RT5880 ou le Rogers 4003C, l'antenne reste fonctionnelle, soulignant la flexibilité de cette conception par rapport aux variations du matériau de substrat.

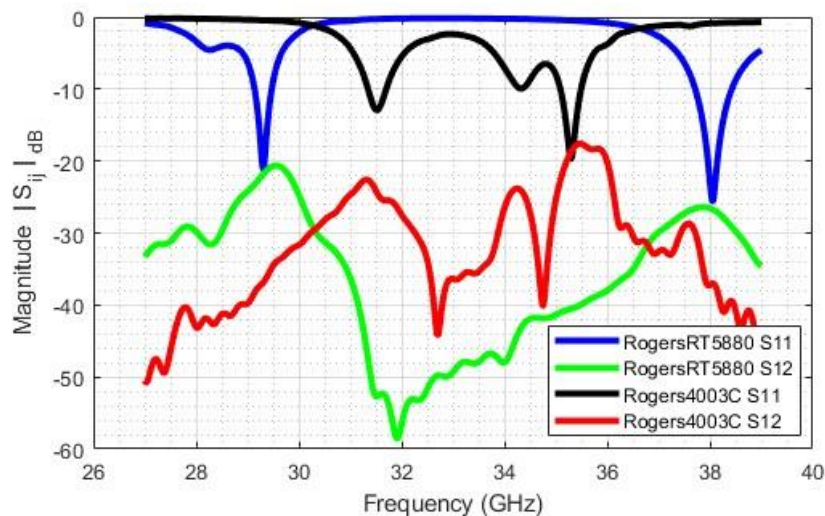


Figure 4.14 Paramètres de réflexion et d'isolation du réseau d'antennes double bande avec EBG en utilisant deux différents matériaux de substrat.

La figure 4.15 illustre clairement que les gains obtenus sont significativement meilleurs avec le matériau Rogers RT5880. Par conséquent, le choix de ce matériau apparaît comme une option plus avisée pour assurer un gain optimal pour notre modélisation.

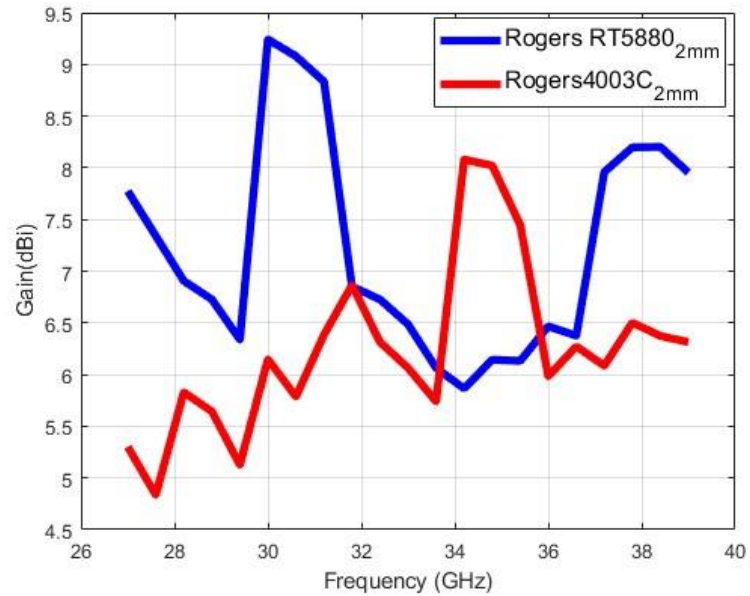


Figure 4.15 Variations du gain du réseau d'antennes double bande avec EBG en utilisant deux différents matériaux de substrat.

A titre de comparer la structure de la cellule EBG proposée dans notre modélisation (figure 4.6) avec une cellule EBG rectangulaire modéliser dans l'article de référence, visible dans la figure 5.16, les résultats de cette analyse sont illustrés dans la figure 4.17 et la figure 4.18.

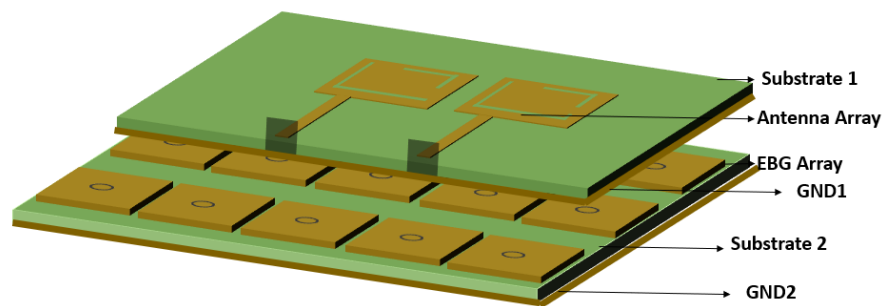


Figure 4.16 Model réseau d'antennes double bande avec des cellules EBG rectangulaire.

La figure 4.17 met en évidence des résultats d'isolation plus favorables avec la cellule EBG proposée par rapport à une structure rectangulaire ou carrée. À une distance inter-

éléments de 2 mm entre les patches d'antennes, la différence entre les deux structures de cellules EBG est presque 10 dB de différence, une variation significative. Cette disparité demeure intéressante, soulignant l'efficacité de notre proposition. Pour une distance de 0.6 mm, notre approche démontre également une amélioration notable des résultats.

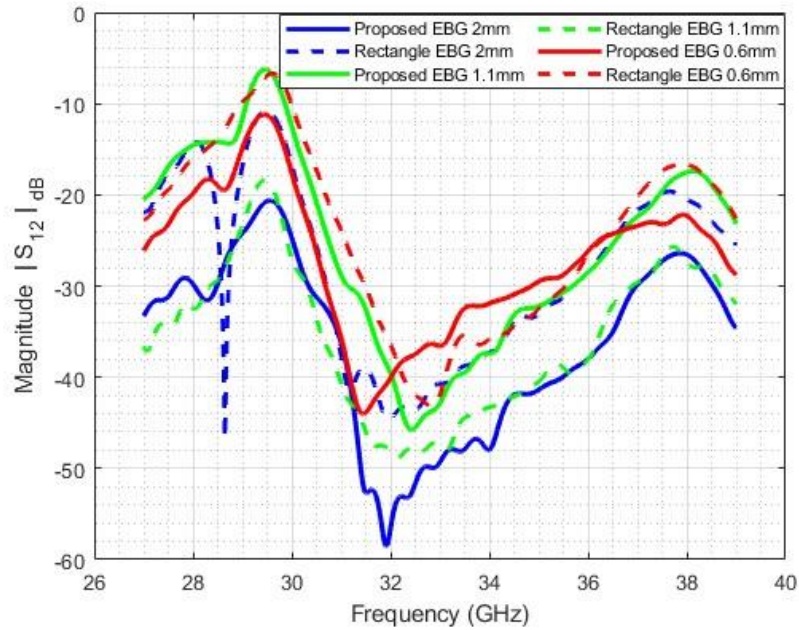


Figure 4.17 Isolement dans le réseau d'antenne double bande par rapport à la forme de la cellule EBG.

En ce qui concerne le gain, une amélioration a été observée à la fréquence de 38 GHz, passant de 7.1 dBi à 7.4 dBi, représentant une amélioration notable, tandis que pour les autres fréquences et distance entre inter-élément d'antennes, l'amélioration du gain est relativement modeste.

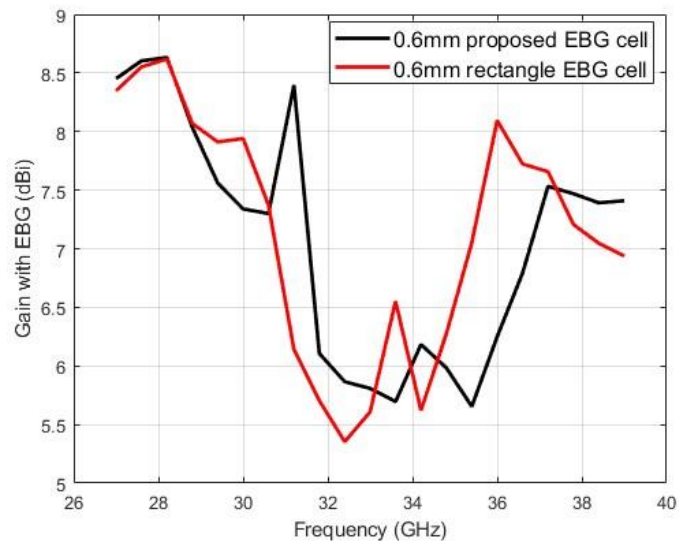


Figure 4.18 Variations du gain du réseau d'antennes double bande par rapport à la forme de la cellule EBG.

4.4 Comparaison entre le réseau d'antennes de référence et le réseau d'antenne modélisée

La comparaison des conceptions avec la littérature précédente est illustrée dans le tableau 5, où nous comparons certains paramètres importants discutés dans la section des résultats de la recherche proposée avec des travaux antérieurs. D'après le tableau 5, nous pouvons observer qu'en utilisant les techniques précédentes sur la double bande de fréquence, nous maintenons une réduction de couplage mutuel (MCR) maximale tout en gardant une taille faible.

Ref	Bande de fréquence	Techniques	MCR (dB)	Taille globale (mm²)
[1]	Single	EBG Ground	15	15 × 12.7
[31]	Single	DGS	10.6	40 × 25
[35]	Single	EBG	16	20.5 × 20.5
Ce model	Dual Band	EBG Ground	23	12 × 7.8

Tableau 5 Comparaison le modèle modélisé avec ceux de la littérature [1] [20] [35].

Ce tableau 5 compare les performances de différents réseaux d'antennes en fonction de plusieurs paramètres critiques. Le premier modèle référencé, identifié comme [1], est optimisé pour une bande de fréquence unique avec l'utilisation d'un sol EBG (Electromagnetic Band Gap) pour atteindre une réduction de couplage mutuel (MCR) de 15 dB. Ce modèle affiche des dimensions globales de 15 × 12.7 mm², ce qui le rend adapté pour des applications nécessitant une petite taille et une isolation efficace.

Un autre modèle cité dans la littérature, [31], utilise des structures de ground plane différentielles (DGS) pour atteindre une MCR de 10.6 dB. Malgré des dimensions plus grandes de 40 × 25 mm², ce modèle est conçu pour une seule bande de fréquence mais offre une réduction significative du couplage mutuel grâce à sa conception innovante de DGS.

En comparaison, le modèle proposé dans cet article, noté comme "Ce modèle", se distingue par sa capacité à opérer sur deux bandes de fréquence distinctes (dual band) : 28

GHz et 38 GHz. Utilisant un sol EBG, ce réseau d'antennes atteint une MCR impressionnante de 23 dB avec une taille globale réduite de seulement $12 \times 7.8 \text{ mm}^2$. Cette compacité est rendue possible grâce à une conception optimisée qui garantit à la fois une faible réflexion (S11) et une isolation élevée (S12) entre les éléments d'antennes aux fréquences centrales spécifiées.

La structure du réseau d'antennes de l'article de référence, optimisée pour une fréquence unique de 27 GHz, affiche une taille globale de $15 \times 12.7 \text{ mm}$, ce qui la rend idéale pour des applications à bande de fréquence unique. En revanche, la structure proposée se distingue par sa conception plus polyvalente, opérant sur deux bandes de fréquence (28 GHz et 38 GHz) tout en présentant une taille globale plus réduite de $12 \times 7.8 \text{ mm}$. Cette compacité, associée à une forme simple, facilite la fabrication et génère des économies de matériaux. La forme simple offre un avantage économique en minimisant l'utilisation de matériaux, ce qui peut être bénéfique du point de vue de la fabrication. Cette simplicité n'altère en rien les performances élevées de l'antenne, mais contribue à une fabrication plus efficace.

En outre, la taille plus petite de ce modèle peut être un atout majeur pour les applications où l'espace est une contrainte. La compacité de cette antenne facilite son intégration dans des dispositifs et systèmes où l'encombrement spatial est critique. Le réseau d'antenne dans l'article 1 présente un couplage mutuel entre deux éléments de 23 dB, tandis que l'Antenne 2 affiche des valeurs de couplage mutuel de 23 dB et 25 dB entre ses éléments, indiquant une efficacité supérieure dans la gestion des interactions entre composants. En termes de perte de retour, les deux antennes démontrent une faible perte,

mais notre modèle maintient cette caractéristique sur les deux fréquences de 27 GHz et 38 GHz.

Enfin, le gain du système proposé par notre modèle sur les deux fréquences excède les 8 dBi, dépassant ainsi le gain maximum de 7 dBi observé pour le réseau d'antenne de référence. En résumé, notre modèle présente des avantages notables en termes d'économie de matériaux grâce à sa forme simple, facilitant ainsi sa fabrication tout en offrant une solution compacte idéale pour les applications nécessitant un gain d'espace, avec des performances accrues sur deux bandes de fréquence.

Ref	S11 (dB) @ 28 GHz	S11 (dB) @ 38 GHz	S12 (dB) @ 28 GHz	S12 (dB) @ 38 GHz	Fréquences centrales (GHz)
[1]	-14	-20	-21	-18	27
Ce model	-23	-26	-20	-26	28 et 38

Tableau 6 les résultats comparatifs des Paramètres S11, S12 et les fréquences centrales de l'antenne modelé avec celui de référence.

Le tableau 6 présente une comparaison des performances de l'antenne de référence avec celles du modèle proposé en termes de coefficients de réflexion (S11), de coefficients de transmission (S12), et des fréquences centrales de fonctionnement.

Le coefficient de réflexion (S11) est un indicateur clé de l'adaptation d'impédance de l'antenne. Plus la valeur de S11 est faible (en dB), meilleure est l'adaptation, ce qui signifie moins de puissance réfléchi et plus de puissance rayonnée. À 28 GHz, le modèle proposé

présente un S_{11} de -23 dB, contre -14 dB pour l'antenne de référence. À 38 GHz, les valeurs sont respectivement de -26 dB et -20 dB. Ces résultats montrent que le modèle proposé offre une meilleure adaptation d'impédance sur les deux fréquences de fonctionnement, réduisant ainsi les pertes par réflexion.

Le coefficient de transmission (S_{12}) mesure le couplage mutuel entre les éléments de l'antenne. Des valeurs plus faibles indiquent un meilleur isolement, ce qui est crucial pour minimiser les interférences entre les éléments de l'antenne. À 28 GHz, le modèle proposé affiche un S_{12} de -20 dB, similaire à l'antenne de référence qui a un S_{12} de -21 dB. Cependant, à 38 GHz, le modèle proposé présente un S_{12} de -26 dB, contre -18 dB pour l'antenne de référence, indiquant un isolement nettement supérieur à cette fréquence.

L'antenne de référence est optimisée pour une fréquence centrale unique de 27 GHz. En revanche, le modèle proposé est conçu pour fonctionner sur deux bandes de fréquence distinctes, à 28 GHz et 38 GHz. Cette capacité à opérer sur des bandes multiples montre une plus grande polyvalence et une meilleure adéquation pour les applications nécessitant une large gamme de fréquences.

En comparant les résultats des deux antennes, il est clair que le modèle proposé surpasse l'antenne de référence dans plusieurs aspects clés. Le modèle proposé offre une meilleure adaptation d'impédance (S_{11} plus bas) et un meilleur isolement entre les éléments d'antenne (S_{12} plus bas) à la fois à 28 GHz et 38 GHz. De plus, la capacité du modèle à fonctionner sur deux bandes de fréquence le rend plus flexible et adaptable pour des applications diverses. En somme, le modèle proposé présente des améliorations significatives en termes de performances électromagnétiques tout en offrant une conception compacte et optimisée.

Bibliographie

- [1] Shen, X., Liu, Y., Zhao, L., Huang, G. L., Shi, X., & Huang, Q. (2019). A Miniaturized Microstrip Antenna Array at 5G Millimeter-Wave Band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(8), 1671-1675. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2927460>
- [2] Tiang, J. J., Islam, M. T., Misran, N., & Mandeep, J. S. (2011). Slot loaded circular microstrip antenna with meandered slits. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 25(13), 1851-1862. <https://doi.org/10.1163/156939311797454042>
- [3] Azim, R., Mobashsher, A. T., Islam, M. T., & Misran, N. (2010, May 8-11). Compact planar antenna for UWB applications. Paper presented at the 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology.
- [4] Buell, K., Mosallaei, H., & Sarabandi, K. (2005, July 3-8). Electromagnetic metamaterial insulator to eliminate substrate surface waves. Paper presented at the 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.
- [5] Islam, M. T., & Alam, M. S. (2013). Compact EBG structure for alleviating mutual coupling between patch antenna array elements. *Progress in Electromagnetics Research*, 137, 425-438. <https://doi.org/10.2528/PIER12121205>
- [6] Rajo-Iglesias, E., Quevedo-Teruel, Ó., & Inclán-Sánchez, L. (2008). Mutual coupling reduction in patch antenna arrays by using a planar EBG structure and a multilayer dielectric substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(6), 1648-1655. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.923306>
- [7] Wang, Z., Li, C., & Yin, Y. (2020). A Meta-Surface Antenna Array Decoupling (MAAD) Design to Improve the Isolation Performance in a MIMO System. *IEEE Access*, 8, 61797-61805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983482>
- [8] Steyskal, H., & Herd, J. S. (1990). Mutual coupling compensation in small array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 38(12), 1971-1975.
- [9] Pozar, D. (1983). Considerations for millimeter wave printed antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-31(5), 740-747.
- [10] Jensen, M. A., & Wallace, J. W. (2004). A review of antennas and propagation for MIMO wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(11), 2810-2824.
- [11] Lu, L., Li, G.-Y., & Swindlehurst, A.-L. (2014). An overview of massive MIMO: Benefits and challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 8(5), 742-758.

- [12] Taluja, P. S., & Hughes, B. L. (2013). Diversity limits of compact broadband multi-antenna systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(2), 326-337.
- [13] Wei, K., Wang, L., Xing, Z., Xu, R., & Li, J. (2016). S-shaped periodic defected ground structures to reduce microstrip antenna array mutual coupling. *Electronics Letters*, 52(15), 1288-1290.
- [14] Zhang, S., Ying, Z., Xiong, J., & He, S. (2009). Ultrawideband MIMO/diversity antennas with a tree-like structure to enhance wideband isolation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1279-1282.
- [15] See, C. H., Abd-Alhameed, R. A., Abidin, Z. Z., McEwan, N. J., & Excell, P. S. (2012). Wideband printed MIMO/diversity monopole antenna for WiFi/WiMAX applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(4), 2028-2035.
- [16] Peng, H.-L., Tao, R., Yin, W.-Y., & Mao, J.-F. (2013). A novel compact dual-band antenna array with high isolations realized using the neutralization technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(4), 1956-1962.
- [17] Su, S.-W., Lee, C.-T., & Chang, F.-S. (2012). Printed MIMO-antenna system using neutralization-line technique for wireless USB-dongle applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(2), 456-463.
- [18] Wang, S., & Du, Z. (2015). Decoupled dual-antenna system using crossed neutralization lines for LTE/WWAN smartphone applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 523-526.
- [19] Zhang, S., & Pedersen, G. F. (2016). Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 166-169.
- [20] Cheng, Y.-F., Ding, X., Shao, W., & Wang, B.-Z. (2017). Reduction of mutual coupling between patch antennas using a polarization-conversion isolator. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1257-1260.
- [21] Mak, A. C. K., Rowell, C. R., & Murch, R. D. (2008). Isolation enhancement between two closely packed antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(11), 3411-3419.
- [22] Lau, B. K., & Andersen, J. B. (2012). Simple and efficient decoupling of compact arrays with parasitic scatterers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(2), 464-472.
- [23] Wang, K., Li, L., & Eibert, T. F. (2013). Comparison of compact monopole antenna arrays with Eigenmode excitation and multiport conjugate matching. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(8), 4054-4062.

- [24] Lau, B. K., Andersen, J. B., Kristensson, G., & Molisch, A. F. (2006). Impact of matching network on bandwidth of compact antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(11), 3225-3238.
- [25] Zhao, L., Yeung, L. K., & Wu, K.-L. (2014). A coupled resonator decoupling network for two-element compact antenna arrays in mobile terminals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(5), 2767-2776.
- [26] Zhao, L., & Wu, K.-L. (2013, June). A broadband coupled resonator decoupling network for a three-element compact array. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (pp. 1-3).
- [27] Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., & Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical Review Letters*, 76(25), 4773-4776.
- [28] Luo, Q., Gao, S., Li, W., Sobhy, M., Bakaimi, I., de Groot, C. H. K., et al. (2019). Multibeam dual-circularly polarized reflectarray for connected and autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3574-3585.
- [29] G.-B. Wu, S.-W. Qu and S. Yang, "Low-profile transmitarray antenna with cassegrain reflectarray feed", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 5, pp. 3079-3088, May 2019.
- [30] Y. Liu, K. Li, Y. Jia, Y. Hao, S. Gong and Y. J. Guo, "Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 1, pp. 326-331, Jan. 2016.
- [31] Liu, Y., Li, K., Jia, Y., Hao, Y., Gong, S., & Guo, Y. J. (2016). Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(1), 326-331.
- [32] Yu, S., Li, L., & Shi, G. (2016). Dual-polarization and dual-mode orbital angular momentum radio vortex beam generated by using reflective metasurface. *Applied Physics Express*, 9(8), 082202-082206.
- [33] Xu, H.-X., Wang, G.-M., & Qi, M.-Q. (2013). Hilbert-shaped magnetic waveguided metamaterials for electromagnetic coupling reduction of microstrip antenna array. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(4), 1526-1529.
- [34] Yang, X. M., Liu, X. G., Zhou, X. Y., & Cui, T. J. (2012). Reduction of mutual coupling between closely packed patch antennas using waveguided metamaterials. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 389-391.
- [35] Yang, F., & Rahmat-Samii, Y. (2003). Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(10), 2936-2946.

- [36] Ghosh, S., Tran, T.-N., & Le-Ngoc, T. (2014). Dual-layer EBG-based miniaturized multi-element antenna for MIMO systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(8), 3985-3997.
- [37] Lee, J.-Y., Kim, S.-H., & Jang, J.-H. (2015). Reduction of mutual coupling in planar multiple antenna by using 1-D EBG and SRR structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(9), 4194-4198.
- [38] Li, Q., Feresidis, A. P., Mavridou, M., & Hall, P. S. (2015). Miniaturized double-layer EBG structures for broadband mutual coupling reduction between UWB monopoles. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(3), 1168-1171.
- [39] Karimian, R., Kesavan, A., Nedil, M., & Denidni, T. A. (2017). Low-mutual-coupling 60-GHz MIMO antenna system with frequency selective surface wall. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 373-376.
- [40] Buell, K., Mosallaei, H., & Sarabandi, K. (2007). Metamaterial insulator enabled superdirective array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(4), 1074-1085.
- [41] Dadgarpour, A., Zarghooni, B., Virdee, B. S., Denidni, T. A., & Kishk, A. A. (2017). Mutual coupling reduction in dielectric resonator antennas using metasurface shield for 60-GHz MIMO systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 477-480.
- [42] Ghosh, J., & Mitra, D. (2017). Mutual coupling reduction in planar antenna by graphene metasurface for THz application. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 31(18), 2036-2045.
- [43] Wu, K.-L., Wei, C., Mei, X., & Zhang, Z.-Y. (2017). Array-antenna decoupling surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6728-6738.
- [44] Niu, Z., Zhang, H., Chen, Q., & Zhong, T. (2019). Isolation enhancement in closely coupled dual-band MIMO patch antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(8), 1686-1690.
- [45] Kraus, J. D., & Marhefka, R. J. (2002). *Antennas for all Applications*. McGraw-Hill.
- [46] Cendes, Z. (2016). The development of HFSS. In 2016 USNC-URSI Radio Science Meeting (pp. 39-40). <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI.2016.7588501>.
- [47] Shenton, D. N., & Cendes, Z. J. (1985). Three-dimensional finite element mesh generation using Delaunay Tessellation. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-21(6), 2535-2538.

- [48] CST STUDIO SUITE 2011: Integrating Simulation Technology. (2010). *Microwave Journal*, 53(12), 92–96. Retrieved from <https://search-ebSCOhost-com.biblioproxy.uqtr.ca/login.aspx?direct=true&db=aci&AN=501713511&site=ehost-live>. Accessed January 2024.
- [49] Research Databases EBSCO. (2021). Retrieved from <https://www.ebsco.com/products/research-databases>. Accessed January 2024.
- [50] About Scopus, Research Guides. (2020, November 18). Retrieved from <https://belmont.libguides.com/Scopus>. Accessed January 2022.
- [51] Mouillet, M. (2016). *Les essentiels de la recherche bibliographique en santé. Chercher • Organiser • Publier. Méthodo: Doin*.
- [52] Boeker, M., Vach, W., & Motschall, E. (2013). Google Scholar as replacement for systematic literature searches: good relative recall and precision are not enough. *BMC Medical Research Methodology*, 13(1), 131. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-13-131>.
- [53] Gehanno, J. F., Rollin, L., & Darmoni, S. (2013). Is the coverage of Google Scholar enough to be used alone for systematic reviews. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 13, 7. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-13-7>.
- [54] Les bibliothèques du réseau de l'Université du Québec, Carrefour gestion bibliographique. Retrieved from <http://carrefour.uquebec.ca/>. Accessed January 2022.
- [55] Bénichoux, B. (2011). Un outil d'évaluation scientifique : le facteur d'impact. 4(4), 16-20. <https://doi.org/10.4267/2042/45845>.
- [56] IEEEExplore Database. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.biblioproxy.uqtr.ca/search/advanced>. Accessed January 2022.
- [57] Google Scholar. Retrieved from <https://scholar.google.com/>. Accessed January 2022.
- [58] ProQuest Database. Retrieved from <https://www.proquest.com/advanced?accountid=14725>. Accessed January 2022.

Annexe A – Licences logiciels utilisés

Dans le cadre de cette étude, deux outils logiciels essentiels ont été utilisés : CST Studio Suite pour la conception et la simulation d'antennes, et MATLAB pour l'analyse et la représentation graphique des résultats de simulation. La licence du logiciel CST Suite Studio est incluse dans cette annexe pour assurer la transparence et la conformité aux réglementations de licence.

Le logiciel CST Suite Studio version d'apprentissage est spécialement destinée aux étudiants, accessible gratuitement à des fins éducatives. J'ai téléchargé et installé la dernière version mise à disposition par Dassault Systèmes, qui est la version 2023. Pour les étapes, je me suis inscrit sur la plateforme 3D Experience Edu en utilisant le lien suivant : <https://edu.3ds.com/fr/software/cst-studio-suite-edition-etudiant> . Par la suite, j'ai créé mon profil, comme illustré dans la figure ci-dessous.

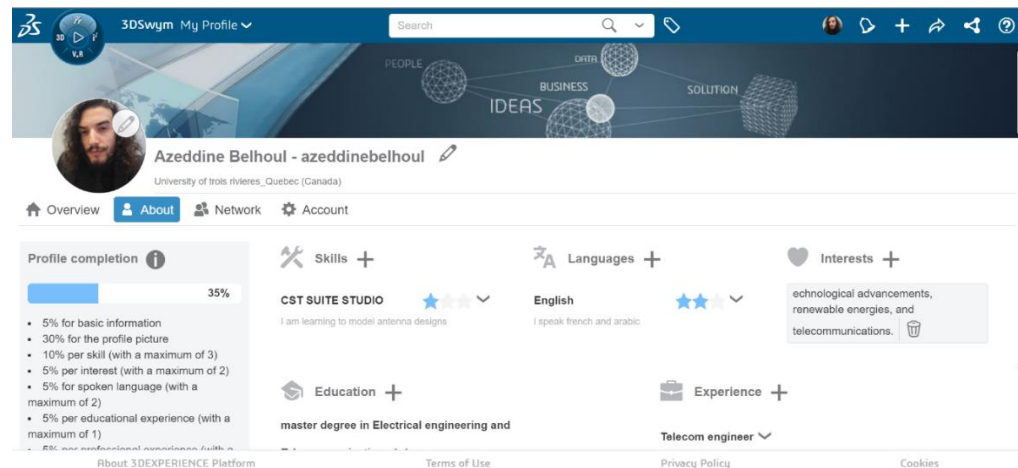


Figure 1 Mon profil sur la plateforme 3D Experience Edu d’Dassault Systèmes

Par la suite, j'ai saisi "CST SUITE Student Download" dans la barre de recherche, puis j'ai cliqué sur le lien indiqué dans le cadre rouge de la figure suivante :

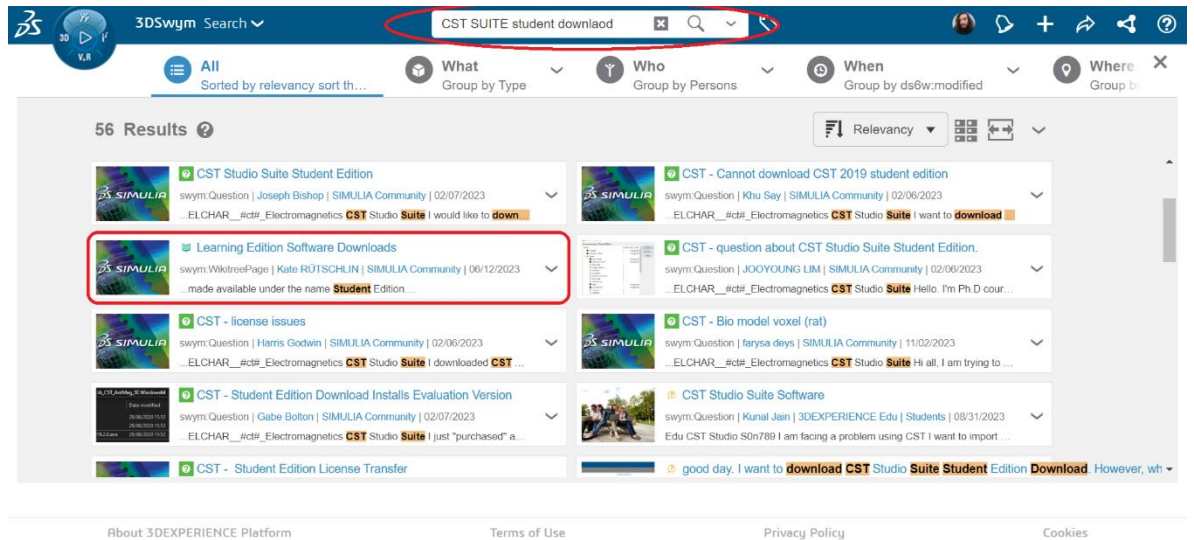


Figure 2 Étape conduisant au téléchargement gratuit de la version apprentissage du logiciel CST Suite Studio.

Ensuite, j'ai sélectionné la version d'apprentissage CST 2023, puis je l'ai téléchargée, comme le montre cette figure :

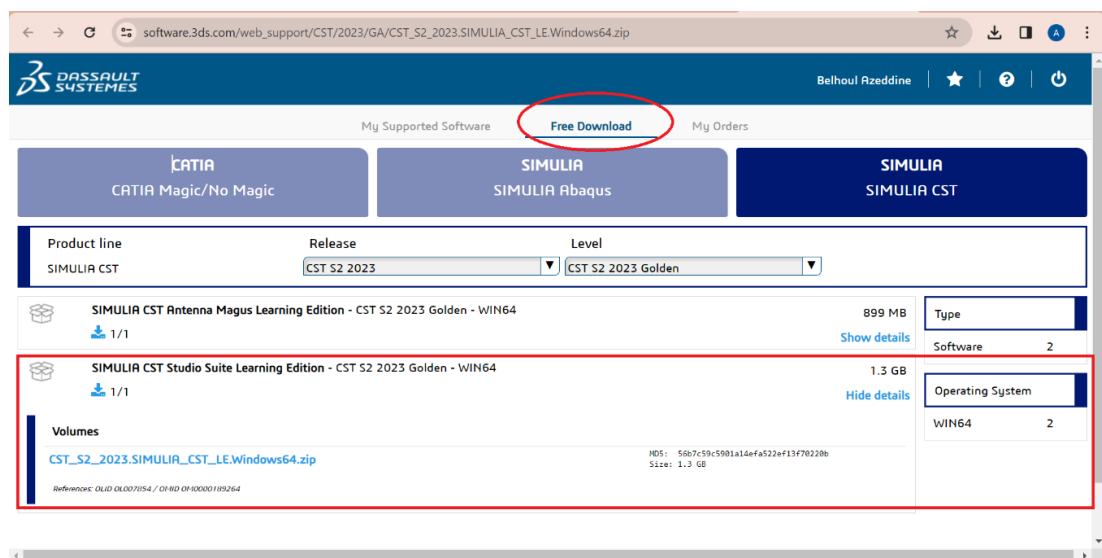


Figure 3 Sélection de la version souhaitée du logiciel CST Suite Studio.

Une fois le logiciel installé, la gestion de la licence peut être visualisée dans cette fenêtre de dialogue :

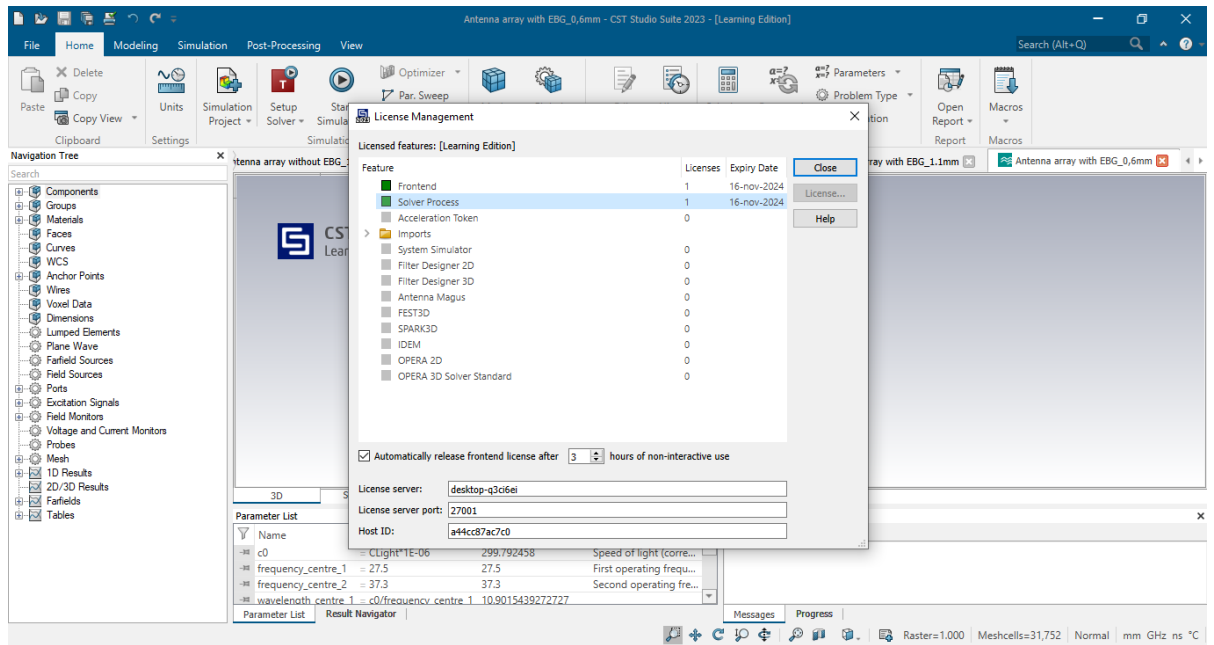


Figure 4 Gestion de la licence du logiciel via l'interface dédiée.

Le contenu du document de licence du logiciel est présenté dans ce qui suit, ce document est disponible sur mon profil dans la plateforme 3D Experience Edu :

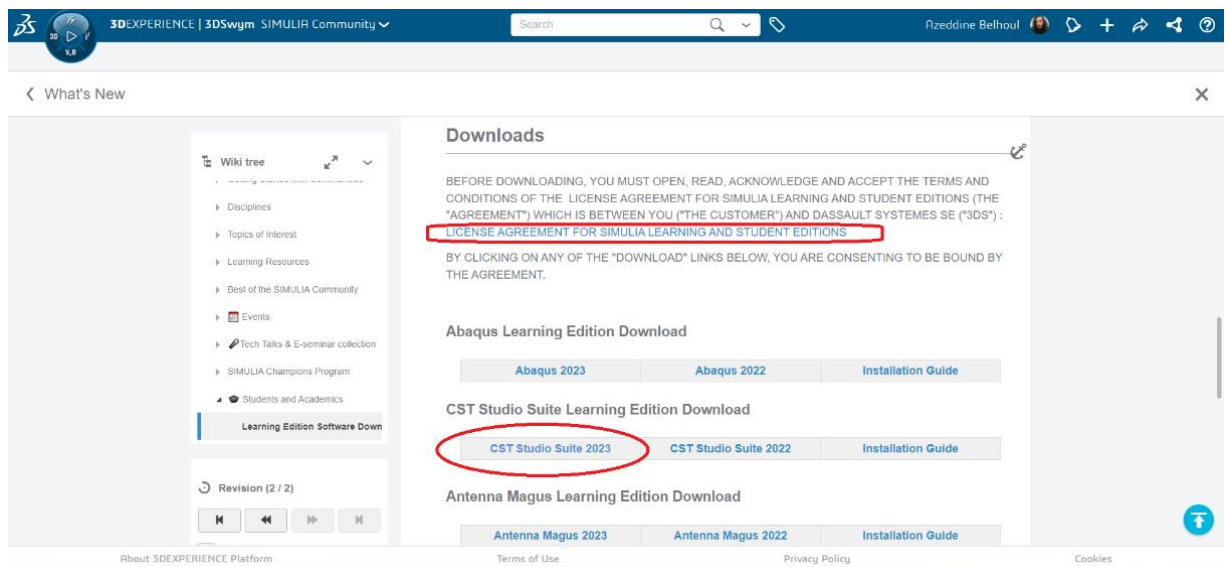


Figure 5 Emplacement du document de la licence des logiciels Dassault Systèmes dédiés à l'apprentissage.

SIMULIA Learning and Student Editions	
<p>This SIMULIA LEARNING AND STUDENT EDITIONS License Agreement is made by and between the customer ("Customer") and DASSAULTSYSTEMES S.E. ("3DS"). The parties agree as follows:</p>	
GENERAL TERMS	
1. Definitions	<p>The Licensed Programs may (i) be executed only on, or accessed by, Machines, and (ii) for student or learning purpose with the exclusion of any direct or indirect commercial purpose.</p> <p>2.2 Scope. Customer agrees to operate each DS Offering in accordance with the terms and provisions of this Agreement.</p> <p>Customer acknowledges and agrees that 3DS shall have no obligation to provide any services, support or maintenance for the DS Offerings under this Agreement. No rights, including, without limitation, any right to use, reproduce or display, other than those specifically provided in this Agreement are granted to Customer. Except to the extent permitted by applicable law, Customer shall not modify, adapt, reverse engineer, decompile, disassemble or otherwise translate all or part of any DS Offering, and shall not provide, disclose or transmit any results of tests or benchmarks related to any DS Offering to any third party.</p>
<p>Agreement means these General Terms and any additional terms published or referenced upon its acceptance (including by clicking to accept).</p> <p>Controlled Data means any information required for the development, production, assembly, operation, repair, test, maintenance, or modification of an item, in any tangible or intangible form, (including but not limited to written or oral communications, designs, computer-aided design files, plans, models, photographs, instructions, engineering designs and specifications) requiring an authorization to be exported.</p> <p>Documentation means, at any time, the current user documentation in any form or media as delivered together with the DS Offering for use in connection with the DS Offering.</p> <p>DS Offering means SIMULIA Abaqus Learning Edition, CST Studio Suite Antenna Magnus Learning Edition, CST Studio Suite Learning Edition, SIMULIA Abaqus Student Edition, CST Studio Suite Antenna Magnus Student Edition or CST Studio Suite Student Edition Licensed Programs.</p> <p>Effective Date means the later of the following: (x) the date on which such Licensed Program is made available electronically to Customer or, if applicable, (y) the date on which Customer is informed by 3DS that the associated license key can be requested or is available.</p> <p>Export Control Regulations means all applicable export control laws and regulations, and sanctions programs worldwide, including but not limited to the United States Export Administration Regulations (EAR) and the Office of Foreign Assets Control (OFAC) Specially Designated Nationals sanctions, and the European Union Council Regulation (EC) No 428/2009.</p> <p>Licensed Program means any data processing program for which a license is ordered by and provided to Customer, consisting of a series of instructions or databases in machine readable form and associated Documentation.</p> <p>Machine means hardware belonging to Customer or under its sole control or supervision, and located on Customer's premises.</p> <p>Defined terms can be used in a singular or plural form.</p>	<p>3. Delivery</p> <p>DS Offerings will be made available electronically. Electronic delivery will be made by providing Customer with necessary information to download the Licensed Program. Customer is responsible for accessing 3DS's website and downloading the Licensed Program.</p>
2. License and Use Rights	<p>4. Intellectual Property</p> <p>3DS and/or its suppliers retain ownership in all intellectual property rights in all DS Offerings and all modifications, enhancements or other derivative works thereof. Licensed Programs are licensed, not sold. Customer shall preserve and reproduce all copyright, patent and trademark notices which appear in any DS Offering on all partial or integral copies thereof. Customer shall keep full, true and accurate records of all copies of the Licensed Programs, which records shall be available for audit by 3DS. Customer recognizes that the methodologies and techniques contained in or expressed within the DS Offerings are proprietary information or trade secrets of 3DS or its suppliers, whether or not marked as "confidential". Customer shall treat them as confidential information and not disclose them.</p>
<p>2.1 Grant. 3DS grants Customer, from the Effective Date, a perpetual, free of charge, non-exclusive and non-transferable right to access and use the DS Offering, from the Effective Date and solely for student or learning purpose with the exclusion of any direct or indirect commercial purpose.</p> <p>Customer may (i) make and install the necessary number of copies of the applicable Licensed Program for which on-premise installation is required, and (ii) make one copy for back-up purposes of each Licensed Program for which on-premise installation is required.</p>	<p>5. Warranty, Limitation of Liability, Risk of Use and Indemnity</p> <p>THE DS OFFERINGS ARE MADE AVAILABLE ON AN "AS IS" BASIS, AND, TO THE EXTENT PERMITTED BY APPLICABLE LAW, WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, ORAL OR WRITTEN, INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS</p>
<p>License Agreement for SIMULIA Learning and Student Editions – V12.3</p>	
<p>Page 1 of 2</p>	

Figure 6 La première partie du document de licence associé au logiciel, spécifiquement l'Accord de licence des éditions d'apprentissage et étudiantes de SIMULIA_V12.3.

FOR A PARTICULAR PURPOSE, TITLE OR NON-INFRINGEMENT.

3DS AND ITS LICENSORS SHALL HAVE NO LIABILITY FOR DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR PUNITIVE DAMAGES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION CLAIMS FOR LOST PROFITS, BUSINESS INTERRUPTION AND LOSS OF DATA, THAT IN ANY WAY RELATE TO THIS AGREEMENT, ANY DS OFFERING, DOCUMENTATION OR SERVICES, WHETHER OR NOT 3DS HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES AND NOTWITHSTANDING THE FAILURE OF THE ESSENTIAL PURPOSE OF ANY REMEDY. CUSTOMER'S USE OF DS OFFERINGS SHALL BE AT CUSTOMER'S SOLE RISK. CUSTOMER SHALL INDEMNIFY AND HOLD 3DS AND ITS LICENSORS HARMLESS FROM ANY AND ALL LIABILITY OR EXPENSE, INCLUDING REASONABLE ATTORNEYS' FEES, ARISING OUT OF THIS AGREEMENT OR CUSTOMER'S USE OF DS OFFERINGS UNDER THIS AGREEMENT.

6. Term and Termination

6.1 This Agreement shall come into force from the Effective Date and remains in full force and effect until terminated as provided hereunder.

3DS or Customer may terminate this Agreement for convenience by providing the other party with a thirty (30) days prior written notice.

6.2 Upon termination of this Agreement, Customer shall immediately destroy or return all copies of the terminated Licensed Programs in their entirety.

7. Data Privacy

All personal data communicated by Customer to 3DS will be processed by 3DS, acting as data controller, to achieve the purpose of this Agreement and to perform any action which may arise from the contractual relationship set forth herein, according to its privacy policy available on 3DS.com

8. Export

DS Offerings and related Documentation are subject to Export Control Regulations concerning (i) their export, import, re-export and in-country transfer, (ii) their intended end use by Customer, and (iii) the receipt, use, storage and/or export of Controlled Data. In the event of any conflict between Export Control Regulations, for purposes of the Agreement, the most restrictive law shall prevail.

3DS and its licensors shall not be liable if authorizations, licenses and approvals, required for export to Customer under Export Control Regulations, are not sought or obtained.

Customer shall comply with all applicable Export Control Regulations, and shall not export or re-export, directly or indirectly, any DS Offering or related Documentation if such export or re-export requires an export license or other governmental approval pursuant to Export Control Regulations without first obtaining such license or approval. Customer shall

not use any DS Offering and Documentation in violation of Export Control Regulations, including but not limited to proliferation of any nuclear, chemical or biological weapons or missile delivery systems. Customer shall not divert any DS Offering or Documentation to any country, company or individual if prohibited by Export Control Regulations.

The export, re-export, and in-country transfer of information under the Agreement is subject to compliance with Export Control Regulations. Unless provided for in a separate agreement, the parties shall not disclose or exchange any Controlled Data. The restriction in the foregoing sentence shall not apply to information where the authorization is required solely for export to countries subject to trade sanctions.

The obligations of 3DS under the Agreement shall be subject to and conditioned upon compliance with all applicable Export Control Regulations. 3DS may terminate or suspend at any time the Agreement, all licenses, provision of DS Offerings hereunder, or generally cease or suspend the performance of its obligations under the Agreement, if Customer violates the Export Control Regulations provisions of the Agreement or if performance of the Agreement would cause 3DS to infringe any Export Control Regulations or to be potentially exposed to any sanctions or penalties that could be imposed by any governmental authority as a result of continued performance. Such suspension or termination shall be effective upon written notice as of the date stipulated in that notice

9. Miscellaneous

9.1 **Severability.** If any provision of this Agreement is found by a court of competent jurisdiction or arbitrator to be illegal, void or unenforceable, the other provisions shall remain in full force and effect, and the affected provision will be modified so as to render it enforceable and effective to the maximum extent possible in order to effect the original intent of the parties.

9.2 **Transfer, Assignment & Subcontract.** Any subcontract, assignment, delegation or other transfer (including without limitation, by way of merger, acquisition, divestiture, or change of control or contribution in kind) of this Agreement or any of Customer's rights, duties, benefits or obligations hereunder is subject to 3DS's prior written approval. Any attempt to do so without such consent is void. This Agreement shall be binding upon, and inure to the benefit of 3DS and its successors and assigns.

9.3 **Amendments & Non-Waiver.** No waiver, alteration, modification, or cancellation of any of the provisions of this Agreement shall be binding unless made by written amendment signed by both parties. A party's failure at any time to require performance of any provision hereof shall in no manner affect its right at a later time to enforce that or any other provision.

9.4 **Language.** This Agreement is provided in English and may be provided, for informational purposes only, in a language other than English. The English version shall be the only binding and enforceable version of this Agreement.

9.5 3DS may assign, delegate, subcontract or otherwise transfer any of its rights or obligations hereunder, in whole or in part, without Customer's consent.

Figure 7 La deuxième partie du document de licence associé au logiciel.

Il est important de souligner que le logiciel MATLAB a été obtenu légalement à partir du site officiel de l'Université du Québec à Trois-Rivières, et par conséquent, il est dûment licencié.

Sur la figure qui suit, on peut voir les liens et les étapes à suivre pour obtenir Matlab :

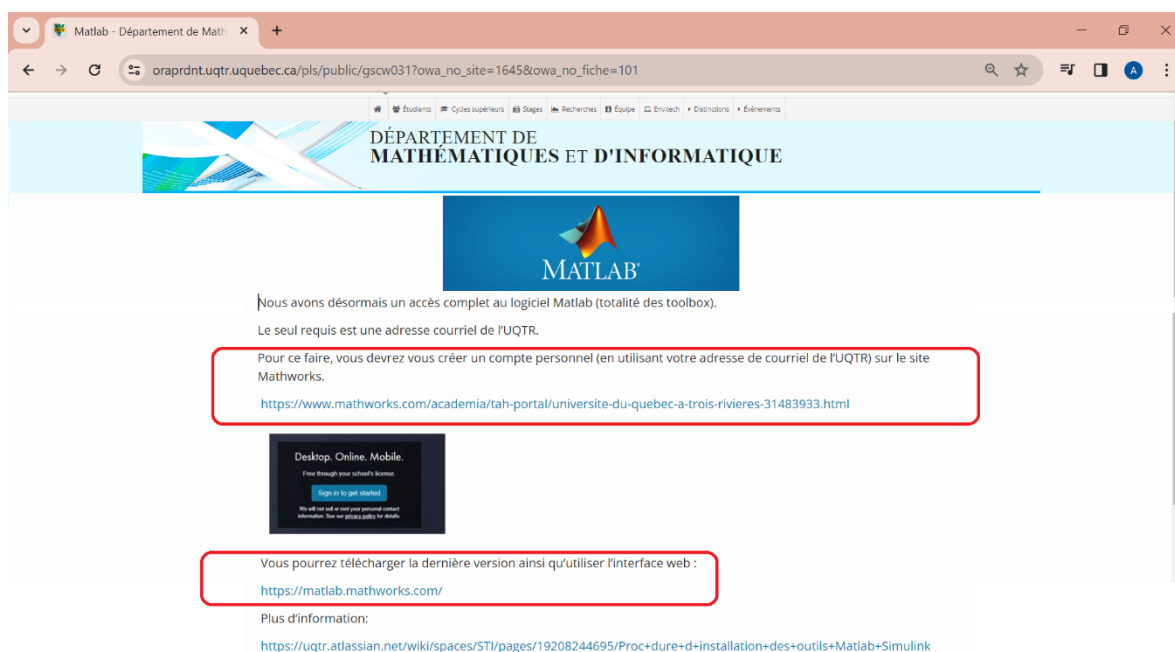


Figure 8 Les liens et les étapes à suivre pour obtenir Matlab sur la plateforme de l'UQTR.

La figure suivante affiche le numéro de licence du logiciel Matlab de l'UQTR :

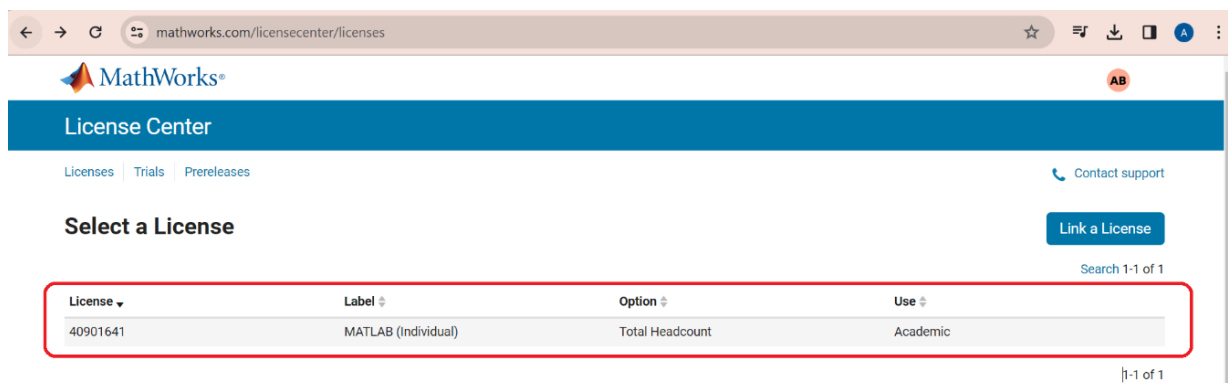


Figure 9 Le numéro de licence du logiciel Matlab de l'UQTR.

J'ai utilisé MATLAB pour générer les graphiques et les figures des résultats de simulation obtenues dans le but de permettre une reproductibilité totale des résultats et de faciliter la compréhension du processus d'analyse. Je vais fournir un exemple de code MATLAB, ce dernier servant de modèle central à partir duquel les autres graphes ont été dérivés.

Le code MATLAB que j'ai employé pour créer la figure 5.2, illustrant les coefficients de réflexion (S11) de l'antenne patch est le suivant :

```
clear all
close all
clc
A = dlmread('GainEBG1.txt');
x = A(:,1);
y = A(:,2);
plot(x,y, '-b', 'LineWidth', 4, ...
      'MarkerEdgeColor', 'k', ...
      'MarkerFaceColor', 'g', ...
      'MarkerSize', 10)

hold on
A = dlmread('GainEBG2.txt');
x = A(:,1);
y = A(:,2);
plot(x,y, '-g', 'LineWidth', 4, ...
      'MarkerEdgeColor', 'k', ...
      'MarkerFaceColor', 'g', ...
      'MarkerSize', 10)

hold on
A = dlmread('GainEBG3.txt');
x = A(:,1);
y = A(:,2);
plot(x,y, '-k', 'LineWidth', 4, ...
      'MarkerEdgeColor', 'k', ...
      'MarkerFaceColor', 'g', ...
      'MarkerSize', 10)

hold on
xlabel('Frequency (GHz)')
ylabel('Gain with EBG(dBi)')
legend({'2mm Gain', '1.1mm Gain', '0.6mm Gain'}, 'Location', 'northeast', 'FontSize', 16)
```

Annexe B – Recherche bibliographique

Les préalables pour réussir une recherche bibliographique, tout d’abord, nous devons trouver les articles et travaux qui doivent être utilisés efficacement dans notre travail de recherche.

La majorité des articles et publications typiques sont regroupés dans des bases de données (j’ai cité en bas celles que j’ai utilisé durant ma recherche).

Dans cette démarche, y’a aussi certains choses qu’on devrait connaitre et maîtriser comme les index qui sont des déterminants essentiels dans la recherche, ainsi les outils de gestion bibliographique qui permettent de créer et gérer les références bibliographiques dans une base ou liste bibliographique. Nous allons présenter tout cela dans ce qui suit.

Mots clés

Les publications scientifiques sont répertoriées dans les bases de données selon plusieurs index tel : les auteurs, les titres, le nombre de citations et le plus important de ces index nous avons les mots clés.

Lorsque on prépare un travail de recherche, l’utilisation des mots clés est essentielle car c’est la clé d’avoir les références bibliographiques de bonne qualité, ainsi on garantit une recherche efficace et valable.

Pour trouver les bons mots clés, j’ai traduit mon sujet de recherche à des mots qui ont intérêt et qui m’ont orienté vers le domaine désiré pour ma recherche, et ils sont comme suivant :

Antenne micro-ruban, réseau d'antenne, antenne patch, 5G millimeter-wave, structure EBG, bandgap, Technologie MIMO, couplage mutuel.

PS : Tous ces mots clé seront définies dans le quatrième chapitre.

Outils de recherche bibliographique

Les travaux scientifiques publiées sur internet sont intégrés dans des bases de données, et dans la recherche bibliographique on doit consulter ces bases afin de retrouver les articles fiables et utiles pour notre sujet de recherche. La bibliothèque universitaire d'UQTR nous offre l'accès à plusieurs bases de données, et durant ma recherche, les sources d'informations que j'utilise et que je trouve les plus appropriées en termes d'efficacité et de couverture de contenu dans la recherche de publications sont les suivantes :

- **IEEE Xplore**

L'IEEE Xplore regroupe des articles, des revues, normes, livres électroniques et cours éducatifs. Pour un accès aux sujets dans le domaine génie électrique, génie électronique ou informatique, comme mon cas de recherche, j'ai utilisé IEEE Explore produit par l'Institute of Electrical and Electronic Engineers qui donne accès au contenu de produit IEEE/IEE Electronic Library qui comprend environ 200 titres de périodiques, 4600 rapports de conférence.

Pour le mot clé « structure EBG » j'ai obtenu 2333 résultats dans l'IEEE Xplore et ce qui est suffisamment pour mener ma recherche sur elle, soit pour la définir, comprendre son utilité et fonctionnement, aussi d'inspirer d'autres travaux d'antennes qui sont basés sur elle.



Figure 19 L'interface de la base de données IEEE Xplore [55].

- **Les bases de données d'EBSCO**

EBSCO se considère le leader des fournisseurs de bases de données de recherche, de revues électroniques, de services d'abonnement presse, d'e-books et de services de recherche pour les bibliothèques et entreprises de tout type [37]. Tous ses services et produits sont pour but de soutenir les travaux de recherche.

L'UQTR nous donne accès à plusieurs bases de données d'EBSCO pour différents domaines de recherches (voir la figure 3). Pour les recherches dans le domaine d'ingénierie on peut compter sur ces deux bases :

- **Academic Search Complete** : elle donne accès à la version électronique d'articles de plus de 8500 revues scientifiques, dont 7 300 sont relues par un comité de lecture (peer review). On y trouve aussi des références bibliographiques et des résumés pour plus de 12 500 revues et 13 200 publications (livres, rapports, actes de conférence, etc.) [37].

Les cadres rouges dans la figure 2 montrent le nom de la base de données qu'on utilise sur EBSCOhost (on voit Academic Search Complete), et on peut accéder à d'autres bases d'EBSCO en cliquant sur « Choose Databases » comme il est montré sur la figure 3.

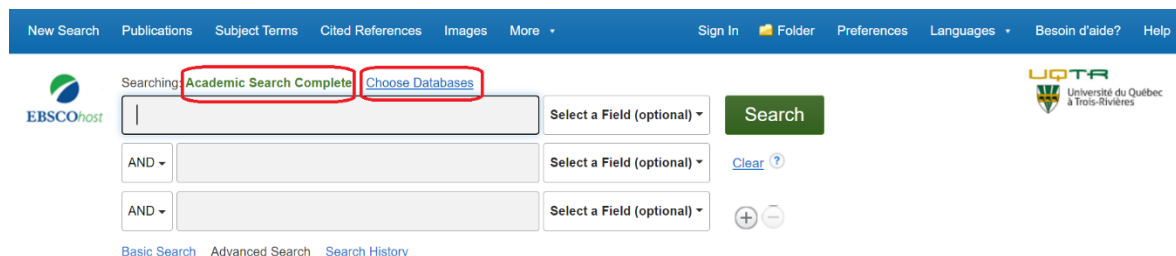


Figure 20 L'interface de la base de données EBSCO [37].

- Applied Science and Technology Source : elle comprend une sélection rigoureuse de revues en accès libre, ce qui donne lieu à une collection croissante de 589 revues en libre accès provenant du monde entier. Dès qu'elles sont validées et certifiées pour ajout, ces revues en accès libre font l'objet d'une indexation thématique de haute qualité et sont assorties de liens vers le contenu en texte intégral [37].

Le figure 3 montre les bases de données d'EBSCO à les quelles l'UQTR nous permet d'accéder et durant ma recherche je me suis basé sur celles qui sont sélectionnées avec un cadre rouge.

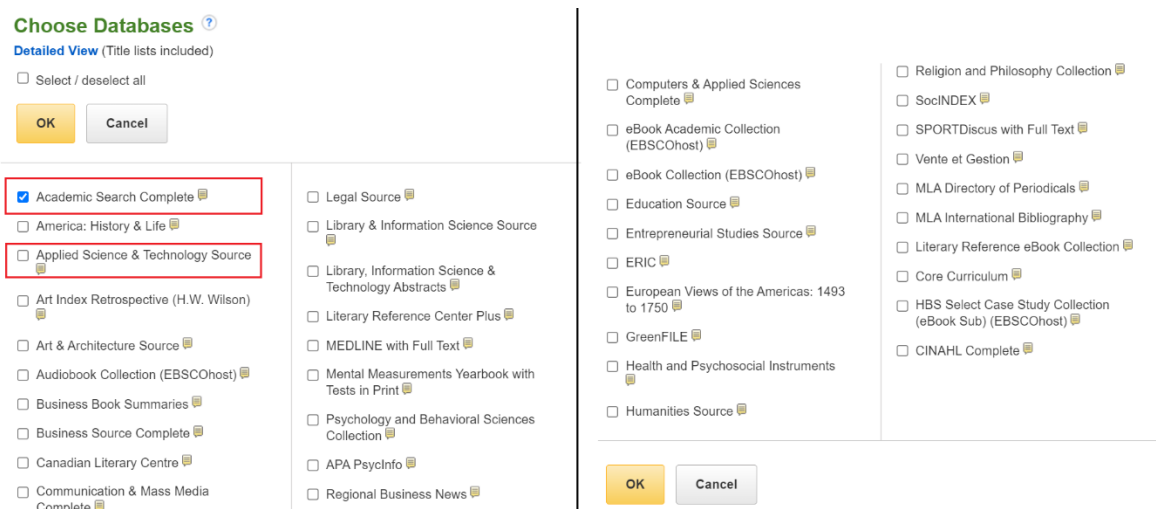


Figure 21 Les différentes bases de données qui appartiennent à OBSCO [37].

- **Scopus**

Scopus a été développé en 2004 par Elsevier, c'est une base de données avec un contenu de plus 24600 titres de périodique, 5000 éditeurs et plus de 75 millions d'enregistrements dans le domaine des sciences pures et appliquées et science sociales.

Elle génère des résultats de recherche de citations précis et des profils de chercheurs détaillés et des informations mis à jour automatiquement, ce qui conduisent à des meilleurs décisions, actions et résultats [49].

L'interface d'interrogation de Scopus présente en trois onglets les types de recherche possibles par sujet (Document search), par auteur (Author search) et par adresses d'organismes (Affiliation search). Un quatrième onglet offre une interface de recherche avancée [39].

Étant donné son prix, peu d'universités ont souscrit un abonnement direct à cette source d'information.

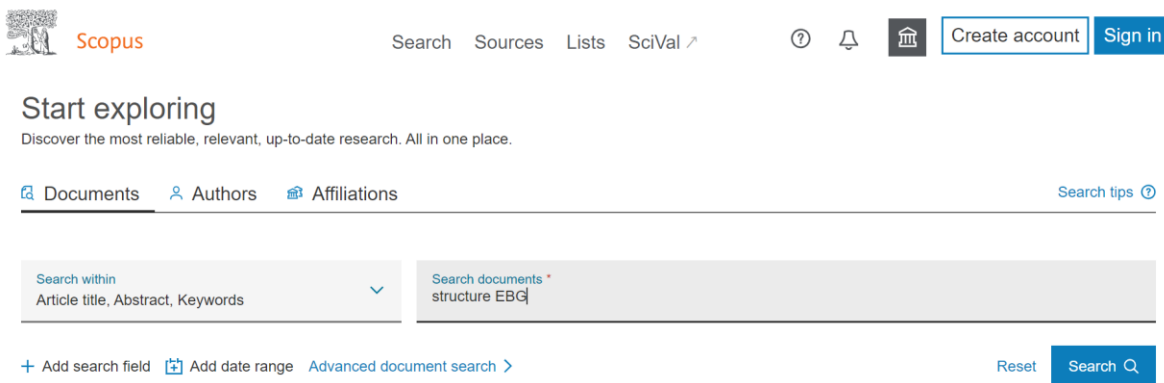


Figure 22 L'interface de la base de données Scopus [49].

- **Google Scholar**

Dans une étude intitulée « La couverture de Google Scholar est-elle suffisante pour être utilisée pour des revues systématiques? », les auteurs ont conclu leur travail par le paragraphe suivant :

« En conclusion, la couverture de GS est beaucoup plus élevée qu'on le pensait auparavant pour des études de haute qualité. GS est très sensible, facile à chercher et pourrait être le premier choix pour les revues systématiques ou les méta-analyses. Il peut même être utilisé seul. Il suffit d'améliorer les fonctionnalités de recherche avancée pour améliorer sa précision ... » [51].

Par conséquent, varier les outils de recherche est important pour un bon travail de recherche, d'ailleurs Google Scholar présente plusieurs limites connues qui sont étudiées dans l'article [52], on va citer quelques-unes:

- L'actualité de google Scholar peut ne pas être très élevée pour certaines ressources. La période de mise à jour de certaines ressources peut aller jusqu'à neuf mois.

- La littérature qui n'est pas disponible sous forme numérique n'est pas interrogeable de manière fiable. Seules des références à des citations de cette littérature peuvent être trouvées et ne sont donc consultables que par mots-titres et auteurs.
- Certains champs de l'interface de recherche avancée ne sont pas disponibles dans une expression de recherche en tant que mot-clé ou indicateur de champ. Alors que les auteurs peuvent être spécifiquement recherchés avec l'indicateur de champ « auteur » dans une expression comme « auteur : nom de l'auteur », la date n'est pas accessible par un indicateur de champ.



Figure 23 L'interface du moteur de recherche Google Scholar [56].

- **Les bases de données ProQuest**

ProQuest contient 18 bases de données comme montrer dans le cadre rouge dans la figure 6 et cela dans plusieurs domaines de recherche surtout dans le domaine industrie et affaires mais celle qui m'intéresse c'est celle présenté en bas :

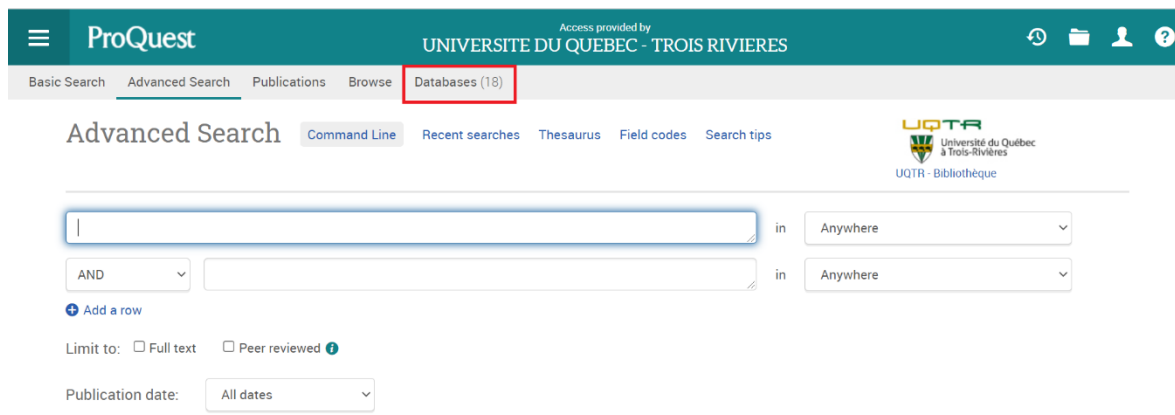


Figure 24 L'interface de la base de données ProQuest [57].

- Dissertations & Theses @ Université du Québec a Trois-Rivieres : cette base de données donne accès aux mémoires et thèses produits par les étudiants de l'UQTR, cela m'a aidé à voir comment organiser mon travail grâce aux travaux de recherche faits par les étudiants et enseignants de mon établissements et permet aussi d'avoir des contacts faciles et direct avec eux pour avoir des informations sur leurs travaux.

La figure montre le résultat obtenu de nombres de thèses faites à l'UQTR pour l'antenne patch



Figure 25 L'interface de la base de données « Dissertations & Theses @ Université du Québec a Trois-Rivieres » [57].

Outils de gestion bibliographique

Les outils de gestion bibliographique les plus fréquemment utilisés par la communauté de l'UQTR sont : EndNote, Mendeley et Zotero. Ces logiciels indispensables sont utiles pour gérer les différentes ressources consultées ainsi pour citer leurs références dans des documents.

Le site web, le carrefour gestion bibliographique (carrefour.uquebec.ca), qui est un site développé par les bibliothèques du réseau de l'Université du Québec et avec un ensemble de vidéos réalisées par les membres de la bibliothèque de l'UQTR et qu'on peut les trouver sur YouTube sont une matière de soutien à l'utilisation de ces différents logiciels de gestion de bibliographie.

- **EndNote**

EndNote (EN) est un logiciel de gestion bibliographique édité par Thomson Reuters. C'est l'un des plus anciens et des plus utilisés dans le monde scientifique et certainement le meilleur outil du marché. Son unique gros défaut est d'être, à titre individuel, onéreux. L'UQTR nous donne accès à télécharger gratuitement ce logiciel ainsi des formations avec trois niveaux afin de nous familiariser avec les fonctions de base d'EndNote jusqu'à arriver à un niveau très avancé (<https://uqtr.libguides.com/c.php?g=718505&p=5130592>). Pour ceux qui n'ont pas un accès gratuit et il souhaite s'exercer y'a la version gratuite de démonstration à télécharger (Free30-DayTrial-EndNoteX7) sur le site de l'éditeur (<http://endnote.com/downloads>). Aussi il existe une version en ligne gratuite, aux fonctionnalités limitées, EndNote basic (<http://endnote.com/product-details/basic>) permet aux débutants de s'initier à l'utilisation du logiciel [39].

Pour les points forts de ce logiciel, il permet de :

- Travailler confortablement avec un très grand nombre de références provenant de différentes sources : bases de données, catalogues de bibliothèques, fichiers en format PDF, documents personnels;
- Vous pouvez balayer les notices et leurs résumés pour mieux les sélectionner ;
- Utiliser la fonction Find Full Text de récupération automatique du texte intégral des articles des revues;
- Faire des recherches à l'intérieur des PDF, les lire, les annoter, les envoyer directement par e-mail ;
- Créer facilement des styles de présentation des références;
- Insérer des références dans un document texte (Microsoft Word, OpenOffice, Pages);
- Transmettre par e-mail votre bibliothèque compressée avec ses fichiers.

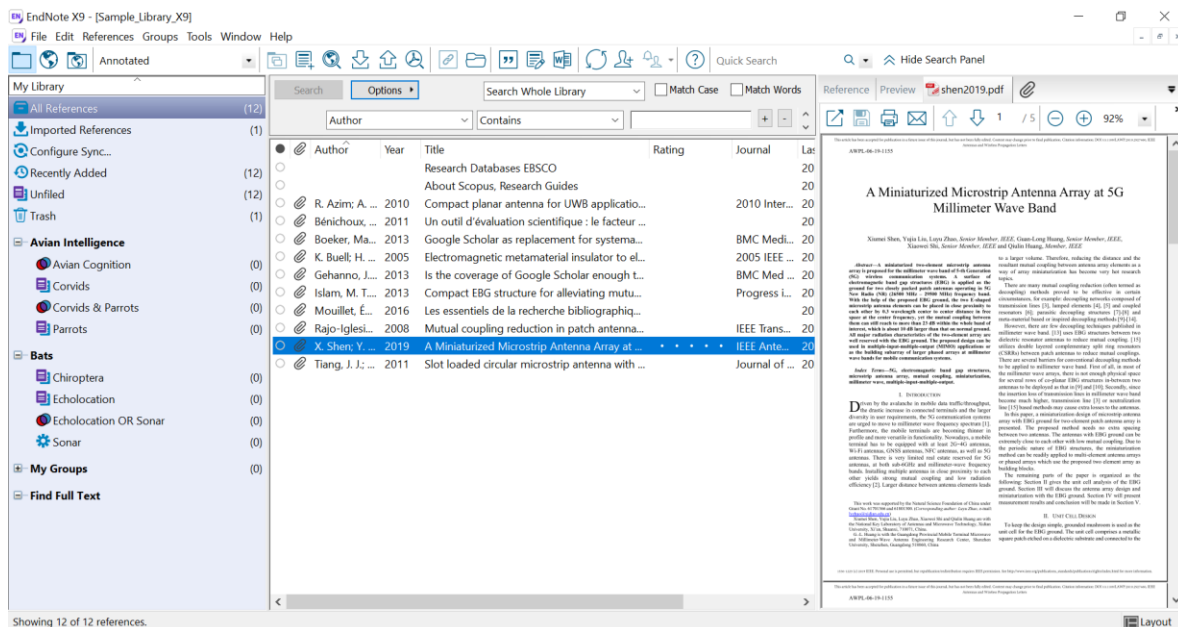


Figure 26 L'interface de logiciel de gestion bibliographique EndNote [39].

Au long de ma recherche et réalisation de ce rapport, j'ai profité des avantages de ce logiciel, et je vais vous résumer les bases que j'ai acquis dans les points qui se suivent :

- Interface du logiciel : comme il est montré sur la figure 2.8, EndNote X9 est composé de 3 sections qu'on va présenter de gauche à droite :

Fenêtre des groupes, où l'on retrouve différents groupes, les groupes préexistants (par ex. : All References), ainsi que les groupes que l'on se crée. Au milieu, on a la fenêtre d'affichage des références : où les références sont affichées de façon sommaire. Puis à droite, on a une section composée de 3 onglets :

Celle affichée par « Reference » permet de modifier le style bibliographique de la référence et le prévisualiser. On peut aussi copier la référence mise en forme selon le style sélectionné.

Celle affichée par « Preview » affiche les fonctions de visualisation et d'édition rapide de la référence. En dernier « Attached PDFs » qui permet de joindre un fichier PDF à la référence [53].

- Importer les références à partir d'une base de données : une fois qu'on a fait notre recherche sur n'importe base de données, on clique sur l'article repérer et sur la fenêtre qui s'ouvre, on cherche la fonction d'importation qui diffère son nom d'une base à une autre (Cite, Citer, Exporter, Export to, Download). Une fenêtre s'affiche avec des options d'importation, on choisit EndNote ou le format RIS, un fichier sera téléchargé, une fois on clique sur ce fichier il sera installé sur notre logiciel bibliographique [53].

- Ajouter des références manuellement : pour ajouter les sites web et les livres que j'ai consulté durant mon travail, j'ai ajouté manuellement ces références puisque y'a pas une option pour les importer direct sur EndNote. Pour le faire, on clique sur « References » dans la barre de menu, puis « New reference », puis un bordereau de saisie vide apparaît. Il est important aussi de connaître les règles de saisie d'une référence et qu'on peut trouver sur le site carrefour gestion bibliographique.

- Insérer les références dans un document Word : sur EndNote, on sélectionne les références qu'on désire insérer dans un document Word, ensuite on vient sur ce document et on choisit sur le menu « EndNote X9 » on clique sur « Insert Citation » puis « Insert Selected Citation(s) ».

Dans mon cas, j'ai utilisé cette méthode pour insérer mes références dans un document puis je les ai organisés manuellement dans mon rapport mémoire, mais il existe une deuxième méthode qui permet d'ajouter les références en fur et à mesure de notre rédaction du rapport du mémoire.

- **Zotero**

De nombreux chercheurs travaillant avec Zotero apprécient cet outil de gestion bibliographique vue que c'est un outil gratuit qu'on peut récupérer sur le site « <https://www.zotero.org/download/> », il est simple à travailler, donne plusieurs fonctionnalités (stockage de PDF, tags, synchronisation entre différents ordinateurs, partage de références entre d'autres logiciels ...) et il permet l'installation de fonctions supplémentaires à l'aide d'extras, comme : Zotero Scholar Citations ; Intégration Zotero

Word ou ZotFile. Cela permet de classer par comptage de citations, ou d'annoter des PDF et d'extraire des notes.

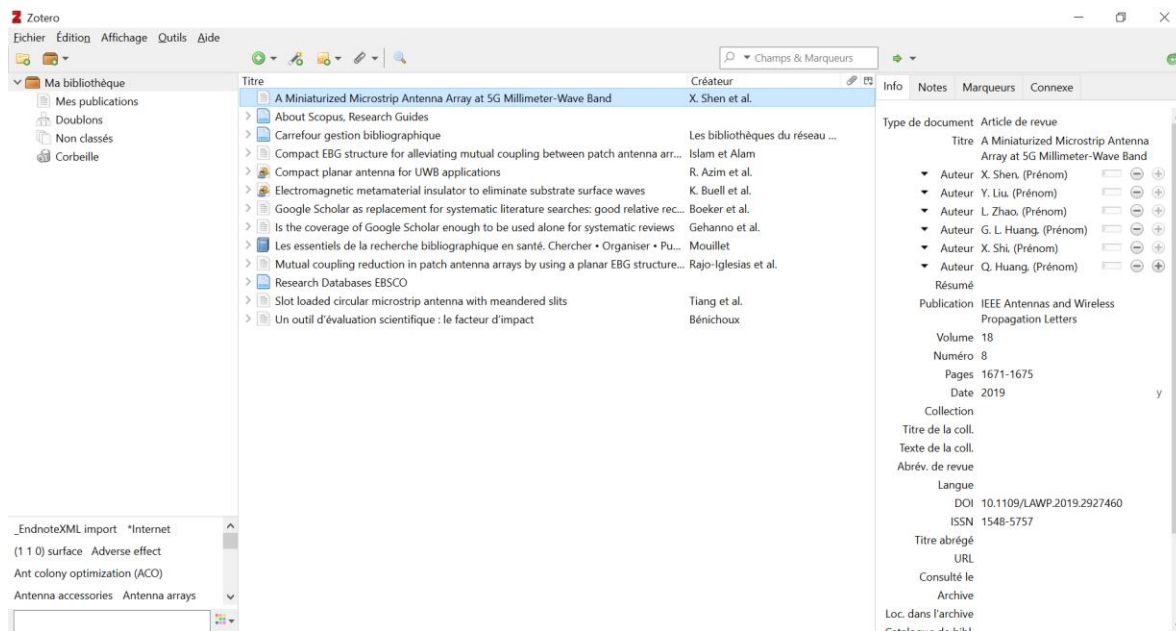


Figure 27 L'interface du logiciel bibliographique Zotero.

Outils d'évaluation scientifique

Avant d'y soumettre un article à une revue, qu'elle soit en libre-accès ou non, il est important d'en valider la qualité et la respectabilité car une CV remplie de publications douteuses peut être très dommageable pour un jeune chercheur.

Les revues sont évaluées avec ce qu'on appelle « indicateurs d'évaluations des revues scientifiques ». La bibliothèque de l'UQTR s'abonne à plusieurs bases de données qui aident les étudiants à analyser l'impact des revues scientifiques telles que : Scopus, OBSCO, Google Scholar, IEEEExplore, grâce à ces indicateurs.

Une fois sur une base de données, on inscrit le titre d'un article qu'on souhaite évaluer sur le champ Title, on fait Search. Sur la page web affichée, on retrouve plusieurs détails qui évalue l'article choisi.

Dans ce qui suit, j'ai choisi le travail des auteurs : Xiumei Shen, Yujia Liu, Luyu Zhao sur une nouvelle structure d'antenne micro-ruban pour 5G (voir article de référence [1]), un travail qui m'a inspiré pour faire cette étude, et je vais expliquer aussi pourquoi j'ai fait le choix de cet article non seulement par rapport le contenu mais aussi par rapport aux indicateurs d'évaluation d'une revue scientifique.

Les indicateurs d'évaluation sur Scopus

La base de données Scopus contient des outils d'analyses des revues qui sont Scopus Journal Comparaison, Altmetrics.com et Mendeley. Avec SJC on obtient le Source normalized impact paper par an (SNIP), ainsi que le classement annuel de revues (SCImago), et le calcul d'impact par publication par année (IPP). Altmetrics.com fournit des mesures d'impact d'articles et d'activité en ligne en ce qui a trait à l'édition savante.

L'accès au SJC lui faut une autorisation ou abonnement, sinon on a accès aux autres indices en bas de la base de données Scopus. Une fois on a cherché l'article qu'on souhaite, sur la droite, on trouve une liste : résumé, mot clé indexés, puis y'a métrique. Les métriques d'articles nous permettent d'évaluer à la fois l'impact des citations et les niveaux d'engagement de la communauté autour d'un article.

En cliquant sur « Métrique », on aura ceci :

- Index de citation : il montre combien de fois l'article a été citée. On peut voir dans la figure 2.10 que l'article choisi a été cité 32 fois sur la base de données Scopus.
- Analyse comparative des citations : montre comment les citations reçues par ce document se comparent à la moyenne de documents similaires. L'article choisi a eu un résultat plus élevé que 96 % comme on peut le voir juste à côté de l'index de citation.
- Impact des citations pondéré par le champ : en anglais « Field-Weighted Citation Impact », cet indicateur montre à quel point ce document est bien cité par rapport à des documents similaires. Une valeur supérieure à 1,00 signifie que le document est plus cité que prévu selon la moyenne. L'article que j'ai choisi a 4,4 comme on le voit sur la figure 2.10.

Pour le calcul du FWCI c'est le rapport entre les citations du document et le nombre moyen de citations reçues par tous les documents similaires sur une fenêtre de trois ans.

- Nombre des vues : c'est un indicateur d'impact sur l'utilisation, sa valeur a tendance à augmenter lorsque la taille de l'entité augmente.

Le nombre de vues peut être affiché dans un graphique ou un tableau avec des mois et/ou des années comme on peut le voir dans la figure au-dessous.



Figure 28 Les métriques sur la base de données Scopus [58].

On remarque que le nombre de vues sur Scopus n'est pas énorme, sur OBSCO ce chiffre a atteint 118 vues comme on peut voir sur la figure 11, et sur IEEEExplore affiche 2928 vues (voir la figure 12).

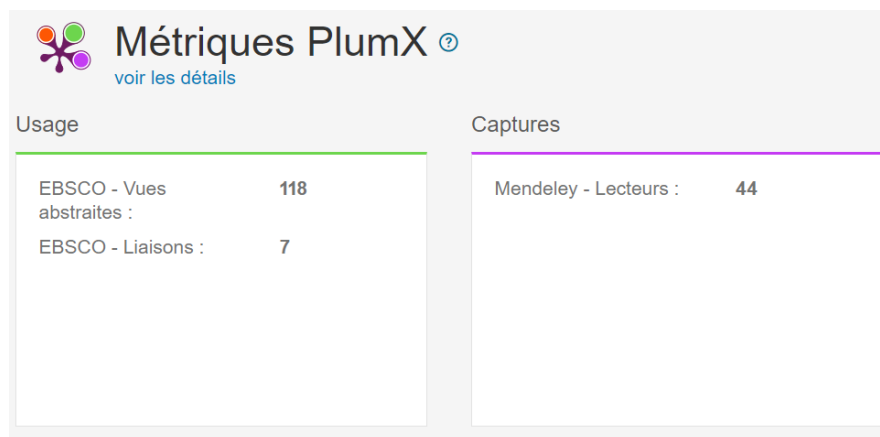


Figure 29 Les métriques PlumX sur Scopus [58].

Les indicateurs d'évaluation sur IEEEExplore

- Citations : comme montrer dans la figure 12, la base de données IEEEExplore affiche le nombre de citation d'un article dans plusieurs services, pour l'article choisi on voit 32 citations sur Scopus et c'est déjà montrer dans le titre précédant, puis 22 citations sur Web of science, et 13 citations sur Crossref.
- Usage : représente le nombre de fois où un article a été consulté, soit au format PDF, soit au format HTML. Sur la figure qui suit, on peut voir plusieurs données sur 3 ans, le nombre total d'utilisation depuis la sortie d'article en juillet 2019 qui est 2928 utilisations.

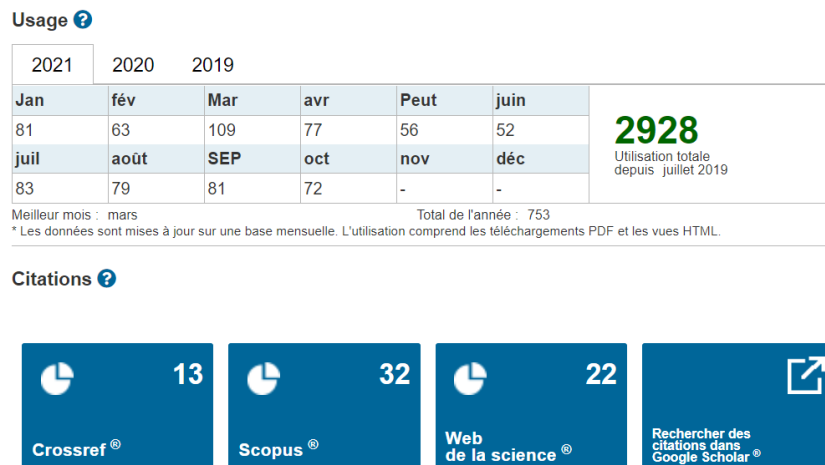


Figure 30 Les métriques sur IEEE Xplore [55].

Les indicateurs d'évaluation sur JCR

Le Journal Citation Reports est un outil d'analyse mis à jour annuellement qui analyse les taux de citation des revues et permet de les évaluer par comparaison et répertorie des mesures d'impact sur les revues: Total Cites, Impact Factor (2 ou 5 ans), Immediacy

Index, Articles, Cited Half-life, Eigenfactor, et Article Influence Score. Dans ce qui suit on va mettre la lumière sur un seul indicateur qui est le facteur d'impact [54].

- Facteur d'Impact : le FI d'une revue pour une année déterminée correspond au rapport entre le nombre de citations et le nombre d'articles publiés dans cette revue au cours des 2 années précédentes. Par exemple, pour 2021, seront pris en compte les articles publiés en 2019 et 2020.
- Calcul de Facteur d'Impact :
 Si NF = nombre de fois où les articles publiés dans une revue durant 2 ans (2019-2020) sont cités dans l'ensemble des revues indexées au cours de l'année suivante (par exemple : 2022)
 Et NA = nombre d'articles (et même de « brèves ») publiés dans la revue durant 2 ans (2019-2020)
 $FI \text{ pour } 2021 = NF/NA.$
- Où trouver le facteur d'impact d'une revue ?
 Cet indicateur est publié dans le JCR, tableau annuel fourni par Thomson-Reuters sur la plate-forme Web of science. L'accès au JCR se fait sur abonnement (relativement onéreux) : « <http://science.thomsonreuters.com/> » [54].
- Le facteur d'impact de la revue choisie : sur le site « les bibliothèques/UdeM » (<https://bib.umontreal.ca/guides/bd/web-of-science?tab=430>), on retrouve une explication détaillée avec vidéo sur les étapes qui nous permettent de récupérer le FI d'une revue à partir de la base de données Web of science. Comme on peut

voir sur la figure 13 le facteur d'impact de la revue est de 3834 pour l'année 2020.

Journal information

IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS

ISSN: 1536-1225

eISSN: 1548-5757

Current Publisher: IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC, 445 HOES LANE, PISCATAWAY, NJ 08855-4141

Journal Impact Factor: [Journal Citation Report™](#)

Research Areas: Engineering; Telecommunications

Web of Science Categories: Engineering, Electrical & Electronic; Telecommunications

3.834

Journal Impact
Factor™ (2020)

Figure 31 Facteur d'impact de la revue de référence sur Web of Science [54]