كلية العلوم و التقنيات فاس
ⵜⴰⵖⵉⵡⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⵎⴰⵙⵙⴰⵏⵉⵏ ⴷ ⵜⵙⵏⵉⴳⵉⵜⵉⵏ
Faculté des Sciences et Techniques de Fès

جامعة سيدي محمد بن عبد الله
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵉⵜ ⵙⵉⴷⵉ ⵎⵓⵃⵎⵎⴰⴷ ⴱⵏ ⵄⴱⴷⵓⵍⵍⴰⵀ
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre *20/2020*

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr: Mohamed El BAKKALI

Discipline : Physique

Spécialité : Télécommunications

Sujet de la thèse : Planar Antennas with Parasitic Elements and Metasurface Superstrate Structure for 3U CubeSats

Formation Doctorale: Sciences de l'ingénieur Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique.

Thèse présentée et soutenue le vendredi 17 Juillet 2020 à 10h30 min au centre de conférence devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Farid ABDI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Abdelmajid FARCHI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Settat	Rapporteur
Mohammed JORIO	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Mohssin AOUTOUL	PH	Faculté des Sciences El Jadida	Rapporteur
Faisel TUBBAL	Doc	UoW & WSU (Australie), LCRSSR Libye	Examinateur
Hassan AMMOR	PES	Ecole Mohammedia des Ingénieurs de Rabat	Examinateur
Najiba El Amrani El IDRISSI	PES	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc	Directeur de thèse

Collaborations Internationales

1er Institut:
Université de Wollongong, Melbourne (Australie)

1er Institut

1. Dr. Faisel Tubbal
2. Prof. Raad Raad
3. Dr. Muhammad Salman Raheel
4. M. Panagiotis Ioannis Theoharis
5. Mme. Suhila Abuelgasem

2eme Institut:
Institut de technologie de Melbourne (MIT), Sydney (Australie)

2e Institut

Dr. Saeid Iranmanesh

3eme Institut:
Université Occidentale de Sydney, Sydney (Australie)

3e Institut

Dr. Faisel Tubbal

4eme Institut:
Centre libyen de télédétection et de recherche scientifique, Tripoli (Libye)

4e Institut

Dr. Faisel Tubbal

5eme Institut:
Université Lovely Professional, Pendjab (Inde)

5e Institut

1. Prof. Gurjot Singh Gaba
2. Dr. Lavish Kansal

Résumé

Connecter un CubeSat à des stations terrestres pour les télécommandes d'une liaison montante, la télémétrie d'une liaison descendante et les données utiles est le principal défi à relever après la réussite d'une mission de lancement du CubeSat dans l'orbite. Cela signifie que les CubeSats ont besoin d'antennes appropriées pour transférer les données avec les stations terrestres et accomplir d'autres tâches en liaison descendante. Une antenne pour les CubeSats doit, par conséquent, être adaptée aux liaisons CubeSat-Station terrestre. Ceci sera réalisé si l'antenne est à gain élevé aux fréquences de résonance souhaitées. Or, le gain est, généralement, proportionnel à la taille d'antenne et oblige les concepteurs à compromettre la qualité de la liaison pour se conformer aux exigences de taille et de poids d'une structure cubesatellitaire standard. Le respect de ces exigences et le maintien de bonnes performances de rayonnement à la fréquence de résonance de CubeSat représentent le principal défi mécanique et RF pour les missions cubesatellitaire en orbite basse et en espace lointain.

Cette thèse de doctorat est donc la première étude complète qui introduit des antennes planaires avec éléments passifs pour les CubeSats. Notant que les éléments passifs sont extrudés des métamatériaux et leur efficacité est définie par le couplage électromagnétique entre les éléments rayonnants. Ils peuvent améliorer les performances de l'antenne sans avoir besoin de plus de puissance et d'espace sur le boîtier d'un CubeSat. Désormais, les éléments passifs dans cette étude sont des éléments parasites et des MSS et sont utilisés dans le but de rendre les antennes proposées adaptées aux missions cubesatellitaires de type 3U.

A travers cette thèse, il est prouvé que les 1D-EBGs créés par les éléments parasites et les MSS (1) définissent les fréquences de résonance et (2) modifient la direction principale du rayonnement. Cela signifie que la manière de définir les éléments parasites et le MSS à côté / au dessus de l'antenne source doit être choisie pour maximiser l'énergie rayonnée dans la direction principale et obtenir un bon RL aux fréquences de résonance souhaitées. Les approches présentées montrent que la distance entre les éléments rayonnants (translation horizontale) affecte la fréquence de résonance, et donc la largeur de la bande passante, tandis que les dimensions d'un élément rayonnant définissent l'énergie rayonnée par le lobe principal et déterminent, par conséquent, le gain d'antenne à une fréquence souhaitée. En plus, la distance d'air entre l'antenne source et un MSS (translation verticale) modifie le gain total et la forme du diagramme de rayonnement à une fréquence souhaité. Ce sont les comportements dominants dans la conception des antennes avec éléments parasites et MSS, tandis que les approches proposées se concentrent également sur l'élimination des lobes arrières et sur la miniaturisation a l'extrême des tailles complètes.

Cette thèse présente trois antennes très compactes pour les CubeSats et les très petits satellites. Ces antennes sont imprimées sur des tailles inférieures à 12×12 mm^2 et donnent des gains supérieurs à 5,50 dBi aux fréquences de résonance souhaitées. Dans ces structures antennaires, les gains sont améliorés aux fréquences requises en utilisant uniquement des éléments parasites ou des MSS et sans augmenter la puissance, les longueurs et les largeurs des antennes. En plus, cette étude présente la conception d'une antenne qui permet d'obtenir le gain le plus élevé en bande S et convient à toutes les configurations cubesatellitaires. C'est une antenne à fente avec MSS conçue en bande S et alimentée par un guide d'ondes de 50Ω. Cette antenne MSS atteint un gain de 10,70 dBi avec un RL élevé et une bonne adaptation d'impédance à 2450 MHz puisqu'elle est gravée sur une surface carrée de 90×90 mm^2. Les autres modèles antennaires sont également de petites tailles, légères et adaptés à la configuration Cubesatellitaire 3U, qui est la structure satellitaire préférée par cette thèse de doctorat.

Cette thèse de doctorat constitue donc la première étude qui présente les éléments parasites et les MSS comme de bonnes techniques pour améliorer les performances de rayonnement des antennes patch et à fente pour les communications cubesatellitaire à basses et moyennes fréquences.

Table des matières

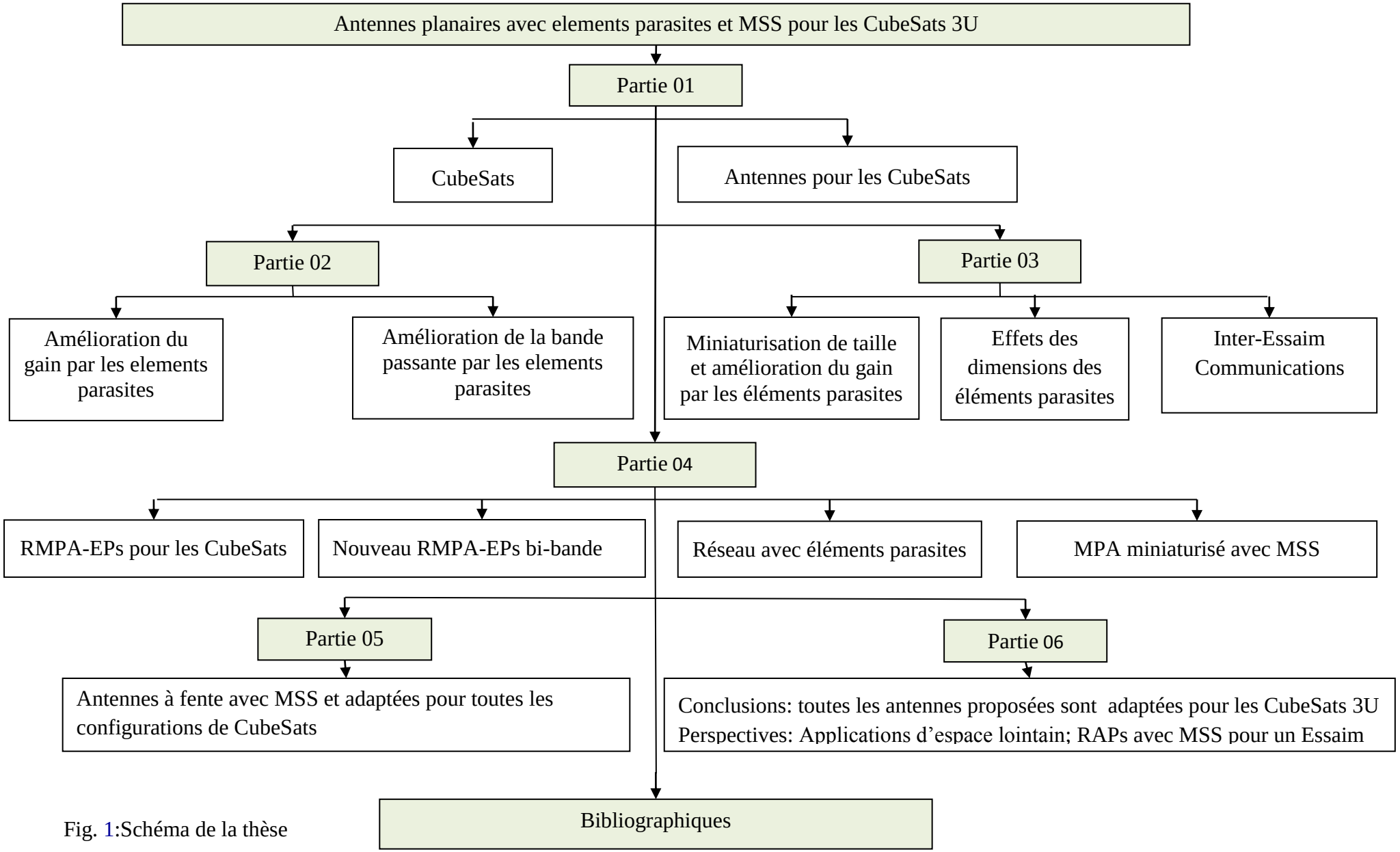


Fig. 1:Schéma de la thèse

Partie 01

Introduction

Les CubeSats sont de petits engins spatiaux avec une configuration modulaire basée sur une unité (1U) cubesatellitaire, qui est un cube ayant 10 cm par côté. La structure 1U permet la conception des autres engins spatiaux de formes régulières et de dimensions variées, dont les plus populaires sont le 1U, les deux unités (2U) avec un volume de 10 × 10 × 20 cm^3 et une masse de 2 kg, les trois unités (3U) avec un volume de 10 × 10 × 30 cm^3 et une masse inférieure à 4 kg et les six unités (6U) avec des dimensions de 10 × 20 x 30 cm^3 et une masse inférieure à 8 kg, voir Fig. 2.

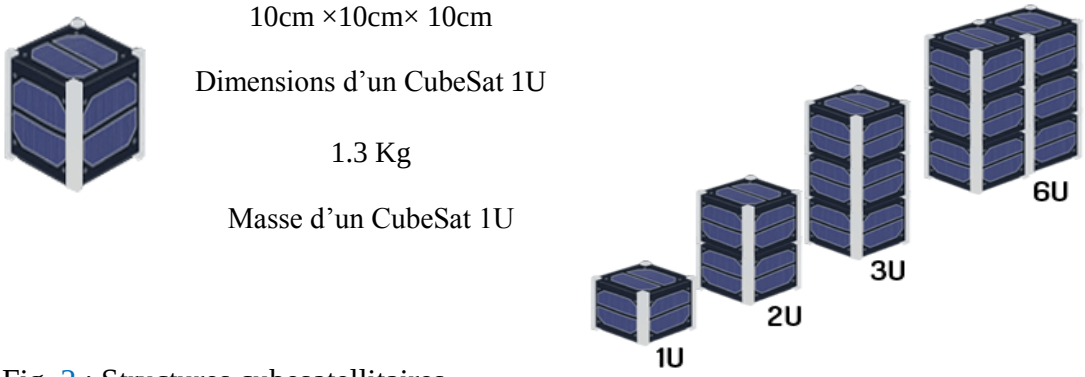


Fig. 2 : Structures cubesatellitaires

La standardisation des CubeSats vient des exigences satellitaires de Poly-Pico Orbital Deployer développées par Cal Poly San Luis Obispo aux USA. Un P-POD est capable de transporter plusieurs CubeSats de tailles standard et peut être libéré comme charge utile secondaire sur de nombreux lanceurs satellitaires. Les avantages de multiples opérations de lancement sont le faible coût, développement rapide de CubeSats qui a amené de nombreuses sociétés commerciales à offrir des opportunités de lancement à l'aide de deployers auto-développés. D'autre part, le système de communication est l'un des principaux systèmes dans un CubeSat, sans lequel il ne serait rien d'autre qu'un débris spatial. Il prend en charge non seulement la transmission des données de l'orbite satellitaire aux stations de base sur la surface terrestre, mais est également responsable des fonctions de poursuite, de télémétrie et de commande. Les sous-systèmes de communication les plus importants sont les antennes.

Les antennes pour un CubeSat doivent avoir un gain élevé et les meilleures caractéristiques de rayonnement possibles pour communiquer avec les stations terrestres. Ces antennes sont connectées au système de communication cubesatellitaire à l'aide des connecteurs SMA. En outre, comme l'angle d'élévation du satellite varie au passage du ciel, l'angle hors nadir change aussi, et les antennes doivent donc être conçues pour optimiser la marge de la liaison pour le plus grand nombre possible d'angles d'élévation. C'est pourquoi les antennes conçues pour les communications cubesatellitaires doivent avoir un gain élevé à une fréquence de résonance souhaitée.

Les CubeSats étant envisagés pour des missions en orbite terrestre basse et dans l'espace lointain. C'est pourquoi la communauté scientifique travaille actuellement à la mise au point de nouveaux systèmes antennaires capables de répondre aux spécifications de communication longue distance tout en optimisant la taille physique de l'antenne proposée. Les antennes pour un CubeSat fonctionnent sur une large gamme de fréquences et vont des grandes antennes réflecteurs aux antennes planaires miniaturisées.

Introduction: Antennes pour les CubeSats

MONOPOLES et DIPOLES



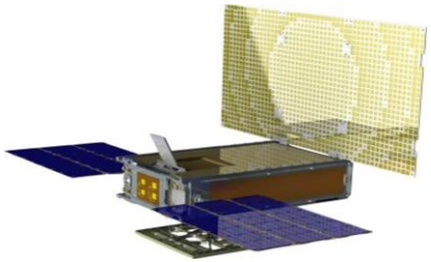
NanoRacks-FPTU CubeSat-1

ANTENNES DEPLOYABLES



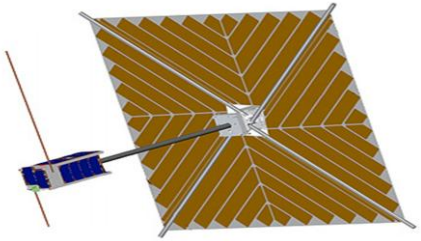
RainCube de la NASA

RESEAU REFLECHISSANT



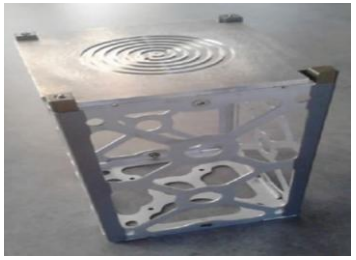
Marco CubeSat

ANTENNES MEMBRANES



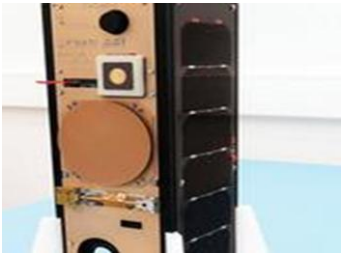
OrigamiSat1: CubeSat Japonaise

ANTENNES CORNETS



Antenne cornet sur 1U CubeSat

ANTENNES PLANAIRES



ZaCube 2 CubeSat de l'Afrique du Sud

PORTEE DE LA THESE

Cette thèse de doctorat vise à l'intégration des éléments parasites ou MSS à côté/en haut d'une antenne source (antenne patch ou à fente) afin d'obtenir des gains élevés aux fréquences de fonctionnement pour les CubeSat sans l'utilisation des amplificateurs.

Amélioration du gain et bande passante par les éléments parasites

Grâce au couplage électromagnétique entre les éléments rayonnants, plusieurs techniques et approches peuvent être appliquées sur les antennes planaires avec éléments parasites afin d'obtenir une miniaturisation de taille, un gain élevé, une bonne adaptation d'impédance, un faible coefficient de réflexion, une large bande passante, etc. Cette partie détermine donc les principaux paramètres des éléments parasites qui affectent les performances de rayonnement des antennes planaires avec éléments parasites à une fréquence de résonance.

1. Amélioration de la bande passante par les éléments parasites

Notre 1ère contribution consiste en une antenne conçue sur un substrat FR4 ayant une épaisseur h de 1,6 mm, une permittivité diélectrique de 4,4 et une tangente de perte de 0,02 [2]. Le FR4 a été choisi en raison de sa grande disponibilité et son faible coût. Cette antenne est conçue en utilisant CST Microwave Studio et ANSYS HFSS sur une taille géométrique de 30×38 mm^2, voir Fig. 3. Dans cette contribution, notre principale nouveauté est l'utilisation de deux éléments parasites rectangulaires pour améliorer les performances la bande des fréquences basses.

Cette étude est donc divisée en trois étapes : dans l'étape 3, la taille du plan de masse passe de 12 mm à 13,25 mm pour améliorer les résultats des étapes 1 et 2 où les distances entre les éléments rayonnants sont nos paramètres principaux dans cette contribution. Notre idée se concentre donc sur la taille du plan de masse et les distances entre les éléments rayonnants. Notons que ces paramètres sont optimisés en utilisant QNM qui fait partie des paquets d'ANSYS HFSS. Les résultats obtenus montrent que ces paramètres influents sur les caractéristiques de rayonnement de l'antenne. Ces effets ont été introduits en termes d'amélioration de la bande passante ou de génération des nouvelles bandes effectives.

Le tableau 1 montre que deux nouvelles bandes effectives sont obtenues aux étapes 1 et 2. La première bande est définie de 7,67 à 8,94 GHz (étape 1) et la seconde est comprise entre 7,46 GHz et 8,42 GHz (étape 2). A l'étape 3, où la taille du plan de masse est augmentée de 1,25 mm, la deuxième bande effective devient ultra-large (4,43 - 8,82 GHz). Toutefois, les diagrammes de rayonnement, les gains, et donc les directivités ne sont pas affectés par les deux paramètres proposés, voir Figs. 4 - 6. Cela signifie que les distances entre les patchs et la taille du plan de masse affectent seulement la fréquence de résonance et donc les bandes passantes. Cependant, l'amélioration du gain nécessite de nouveaux paramètres.

Tableau 1: Performances de l'antenne proposée

Antenne	étape	fréq. de Résonance	Gain	Directivité	Bande passante
[3]	citée	2.5	--	--	2.145 - 2.655
		5.5	--	--	4.54 - 6.46
	simulée	2.5	1.638 dB	2.066 dB	2.52 - 2.8
		5.5	3.71dB	4.40 dB	4.8 - 6.8
Notre antenne	1	2.5	1.93dB	2.24 dB	2.45 - 2.76
		5.1	3.62 dB	3.94 dB	4.48 - 6.90
		7.9	5.00 dB	5.50 dB	7.46 - 8.42
	2	2.5	1.87 dB	2.2 dB	2.41 - 2.69
		5.2	3.89 dB	4.13 dB	4.56 - 6.61
		8.4	4.10 dB	4.47 dB	7.67 - 8.94
	3	2.5	1.94 dB	2.6 dB	2.46 - 2.82
		5.5	4.14 dB	4.40 dB	4.43 - 8.82

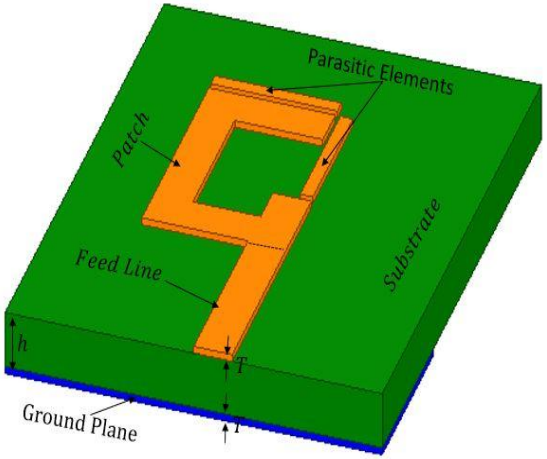


Fig. 3: Géométrie de l'antenne proposée

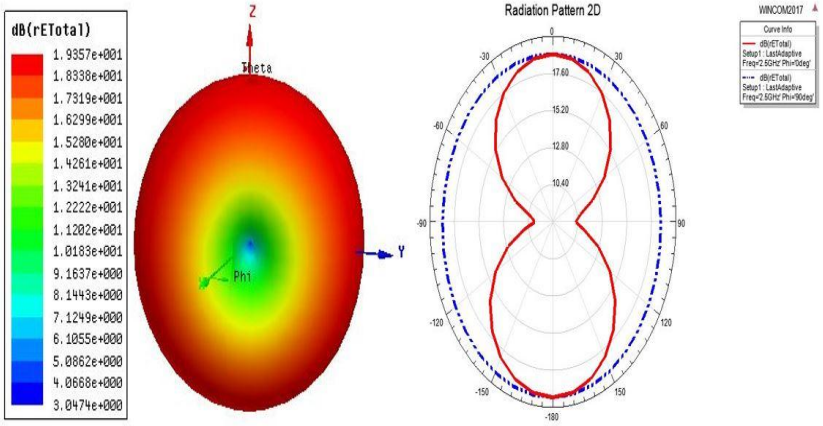


Fig. 4: diagramme de rayonnement en 2D et 3D [étape 01]

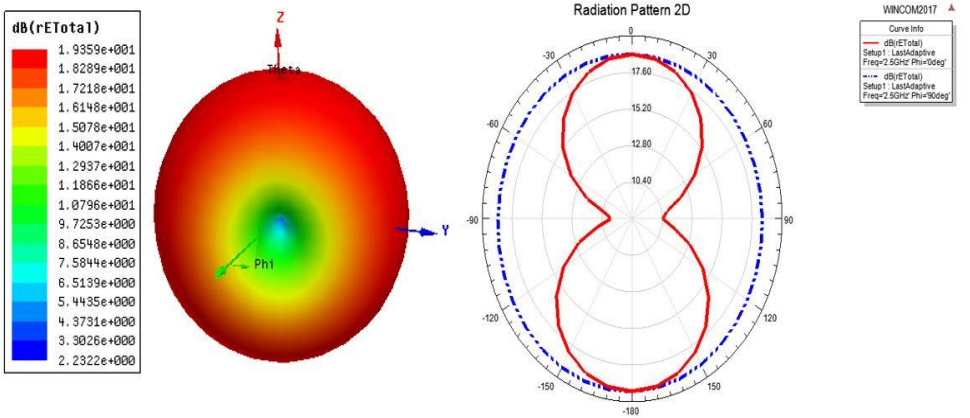


Fig. 5: diagramme de rayonnement en 2D et 3D [étape 02]

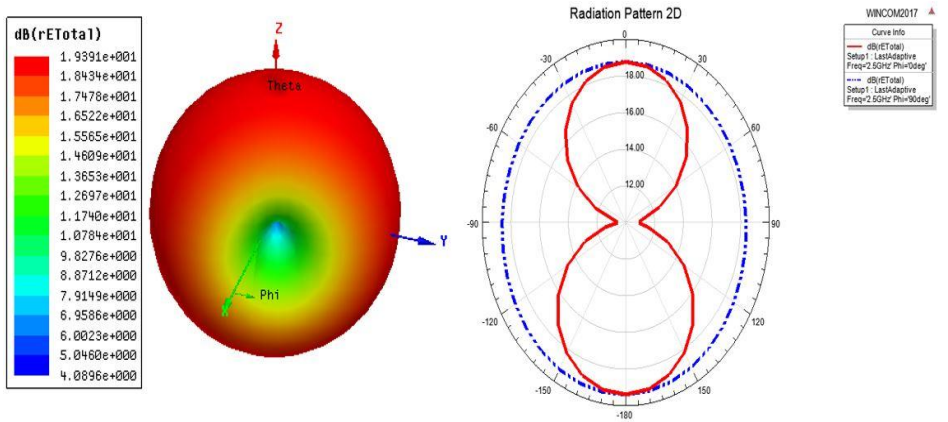


Fig. 6: diagramme de rayonnement en 2D et 3D [étape 03]

2. Amélioration du Gain par les éléments parasites

Dans notre 2ème contribution, une antenne patch de petite taille avec élément parasite est conçue et simulée par ANSYS HFSS 15.0 et CST Microwave Studio 2017 [4],. L'antenne proposée se compose de deux éléments rayonnants rectangulaires : le patch et un élément parasite. Il convient de noter que l'élément passif proposé est conçu pour améliorer le gain d'antenne à une fréquence de fonctionnement de 28 GHz. Les deux éléments rayonnants sont imprimés sur un substrat FR4 ayant les caractéristiques : taille 11,2×8,75 mm^2, constante diélectrique 4,4, tangente de perte 0,02 et épaisseur de 0,8 mm, voir Fig. 7.

Les deux antennes (MPA sans ou avec élément parasite) couvrent une large bande passante supérieure à 4,0 GHz autour d'une fréquence de fonctionnement de 28 GHz. Ces bandes passantes sont les suivantes : (1) L'RMPA seul résonne à une large bande allant de 26,1645 GHz à 30,4432 GHz, (2) Le RMPA-EPs fonctionne sur une très large bande passante allant de 26,95 GHz à 30,4279 GHz. Par conséquent, les deux antennes fonctionnent sur de très grandes bandes de fréquence dans la bande Ka, ce qui est prouvé par des ROS inférieurs à 2. D'autre part, les diagrammes de rayonnement sont unidirectionnels tandis que l'antenne avec élément parasite donne le gain le plus élevé à une fréquence de résonance de 28 GHz. L'élément parasite proposé améliore donc le gain à 28 GHz qui passe de 5,77 dB (RMPA seul) à 6,73 dB (RMPA-EPs) malgré sa très petite taille, voir Fig. 8. De plus, le RMPA-EPs proposé fonctionne sur une ultra large bande.

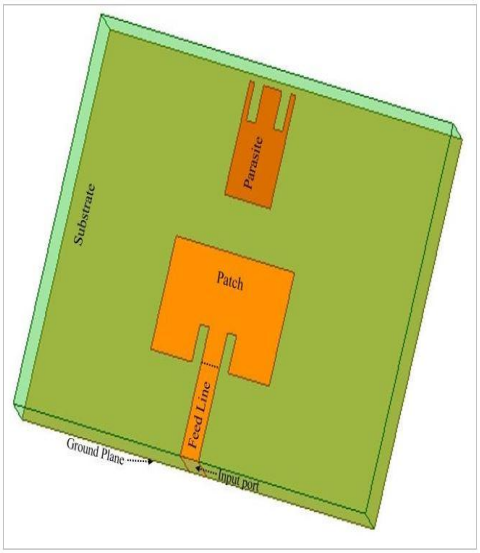


Fig. 7: Géométrie de l'antenne proposée

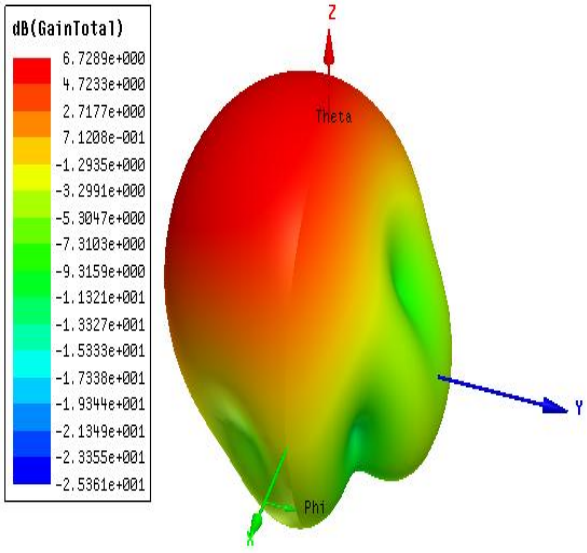


Fig. 8: gain totale à 28 GHz

Comparé aux résultats des travaux de W. Ahmed, où la bande passante est de 1,55 GHz et le gain est de 4,48 dB à 28 GHz [5], notre RMPA-EPs présente les meilleurs résultats. Le gain du notre antenne est donc amélioré en optimisant la largeur de l'élément parasite. Cela signifie que le gain et donc la directivité totale sont sensibles aux dimensions de l'élément parasite. Notons que les deux structures sans et avec élément parasite conviennent aux communications inter-satellitaires.

Par conséquent, à travers [2; 4], il est prouvé que d'une part la distance inter-éléments affecte la fréquence de résonance et donc la largeur de la bande passante, tandis que d'autre part les dimensions de l'élément parasite peuvent améliorer les gains des antennes planaires à très hautes fréquences.

Partie 03

MPA très compacte avec elements parasites pour des applications de communication Inter-Essaim cubesatellitaire

Cette partie présente donc la conception et la réalisation d'une antenne très compacte pour les communications inter-essaims. L'antenne proposée est conçue et fabriquée sur une très petite surface et permet d'atteindre un gain élevé et un grand angle d'ouverture à une fréquence de fonctionnement de 28,7 GHz [6]. Cette antenne est un MPA très compact avec un élément parasite proposé pour fournir des liaisons de communication entre les CubeSats d'un essaim à LEO. L'antenne proposée est conçue et analysée en utilisant ANSYS HFSS. Dans cette structure d'antennaire, l'antenne principale est couplée au patch parasite proposé afin d'améliorer le gain d'antenne à la fréquence de 28,70 GHz (bande Ka) pour les communications inter-satellites. Ainsi notre contribution a pour principaux objectifs la conception d'une MPA à gain élevé sur une très petite surface à 28,70 GHz utilisant un élément parasite et le substrat FR4. L'antenne proposée occupera très peu de place sur une face du CubeSat et nous pourrons alors intégrer une antenne par face pour une meilleure couverture car l'application souhaitée dans cette contribution est la communication inter-essaims. L'antenne conçue est un RMPA qui fonctionne à la fréquence de 28,70 GHz. Elle consiste en un élément rayonnant rectangulaire et une ligne d'alimentation qui sont des conducteurs électriques parfaits, imprimés sur un substrat FR4 qui est un diélectrique largement disponible à faible coût de fabrication. Ensuite, un élément parasite rectangulaire est ajouté à la RMPA pour mettre en forme l'antenne RMPA-EPs. Les paramètres de la nouvelle structure (RPMA-EPs) sont optimisés en mettant en interface le GAO avec ANSYS HFSS. L'antenne réalisée atteint de bonnes performances à trois valeurs différentes de W_e; 0 mm (modèle sans élément parasite), 1,26 mm et 3,26 mm. Cela signifie que le comportement de l'antenne proposée sera similaire à celui d'un Yagi-Uda planaire et que les trois cas actuels sont RMPA sans élément parasite, RMPA avec directeur (W_e = 1,26 mm) et RMPA avec réflecteur (W_e = 3,26 mm).

La fréquence de résonance couramment utilisée pour les applications satellitaires, est fr = 28,7 GHz. Comme le coefficient de réflexion (RL) obtenu par la RMPA à 28,70 GHz est de 15,07 dB, le EP doit être ajouté pour assurer que l'antenne fonctionne autour de la fréquence de fonctionnement souhaitée avec un RL maximal. Par conséquent, pour obtenir les meilleures caractéristiques de rayonnement, les dimensions, la position et l'orientation sont optimisées à l'aide du GAO. Dans notre programme d'optimisation, les variables de décision sont les dimensions de l'antenne et l'objectif est d'atteindre un RL maximal à 28,70 GHz. Les résultats obtenus prouvent que la largeur de l'élément parasite 'W_e' a un effet sur la fréquence de résonance, la bande effective et le maximum de l'RL. Lorsque la largeur 'W_e' augmente, le RL augmente et la bande passante diminue; on observe que la bande passante augmente de manière inversement proportionnelle à 'W_e'. De plus, la fréquence de résonance est augmentée lorsque 'W_e' diminue. La valeur optimisée de 'W_e' est de 1,26 mm, ce qui permet d'obtenir un RL de 22,22 dB et une bande passante ultra-large de 5,75 GHz (25,35-31,10 GHz), voir Fig. 10. Cela signifie que la contribution proposée permet d'obtenir une faible puissance réfléchie et donc une bonne adaptation d'impédance à 28.70 GHz. En effet, à W_e = 1,26 mm, l'EP agit en tant que directeur et un bon couplage électromagnétique avec l'élément principale est créé avec un seul mode résonant qui est excité à une fréquence de 28,70 GHz.

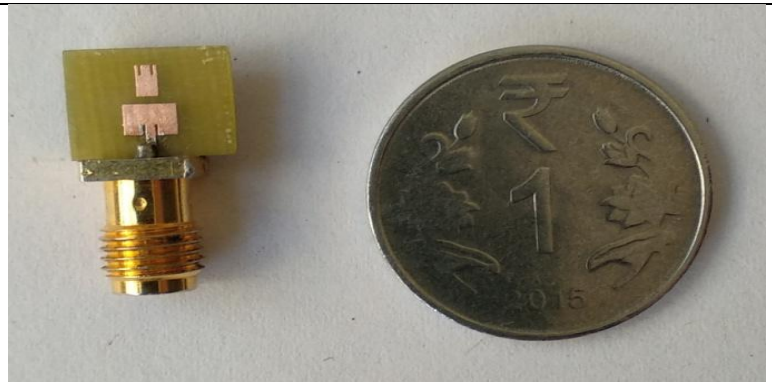


Fig. 9: Prototype d'antenne proposée

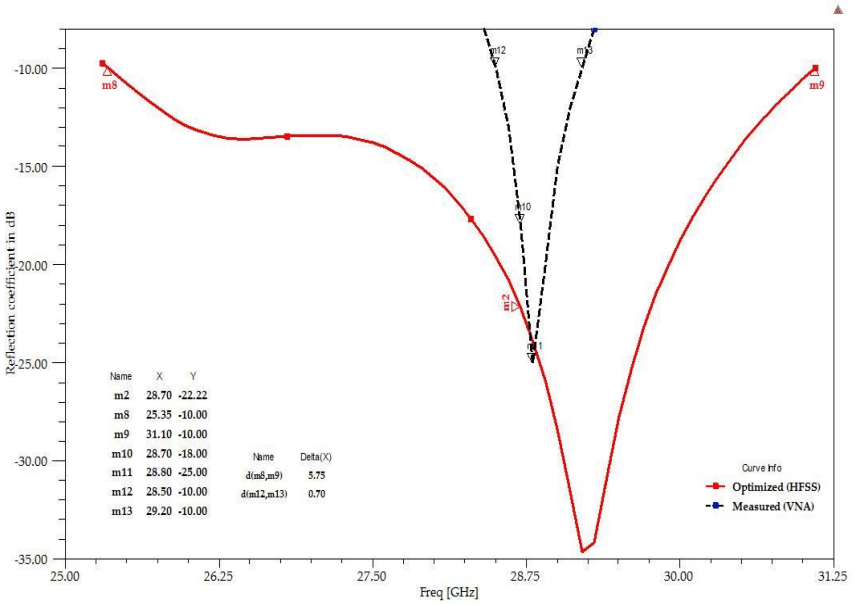


Fig. 10: Coefficient de réflexion (-RLs)

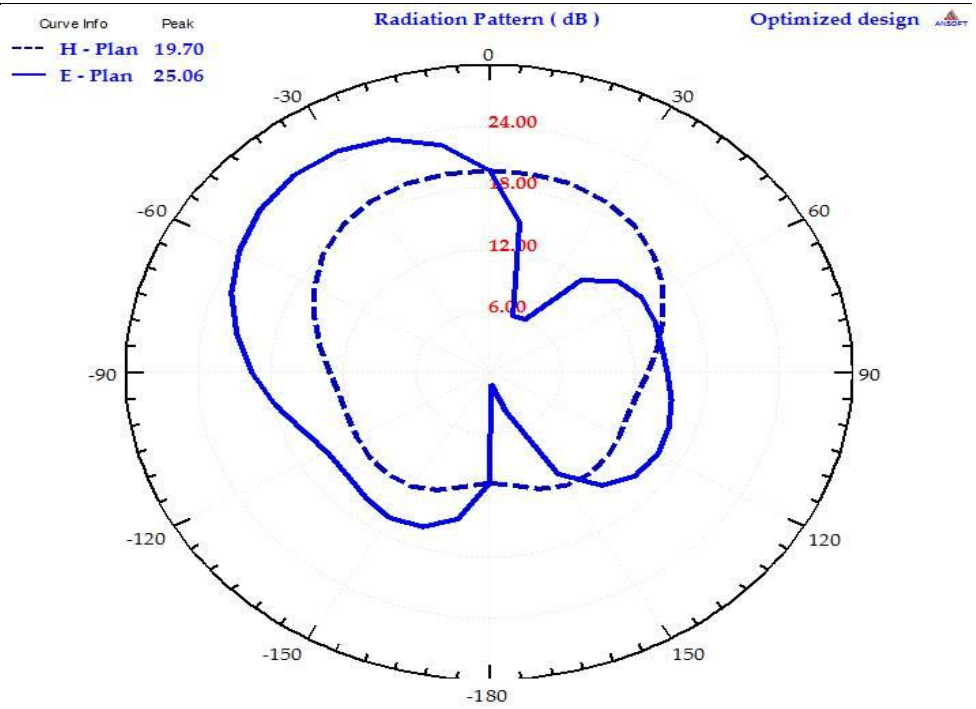


Fig. 11: Diagramme de rayonnement en 2D à 28.70 GHz.

Configuration		RL (28.7 GHz)	BP (GHz)	Gain (28.7 GHz)
Simulé	We=0 mm	18.07 dB	3.88	4.65 dBi
	We=1.26 mm	22.22 dB	5.09	7.16 dBi
	We= 3.26 mm	18.89 dB	5.75	5.53 dBi
Mesuré (VNA)		18.00 dB	0.7	---

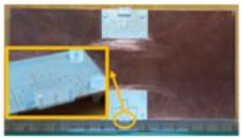
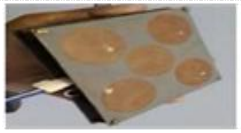
D'autre part, les résultats obtenus prouvent que l'utilisation des éléments parasites améliore significativement le gain total de 4,7 à 7,16 dBi après l'utilisation de l'algorithme génétique sur le paramètre 'We' (la largeur de l'élément parasite). Cela signifie que les dimensions géométriques de l'élément parasite ont un effet important sur le gain d'antenne et ainsi l'élément parasite permet de fournir plus de puissance rayonnante dans la direction principale de rayonnement. De plus, une distance de 0,6 mm est maintenue entre le patch principal et l'élément parasite, pour réaliser un bon couplage électromagnétique entre les éléments rayonnants. Cette distance est optimisée par l'algorithme génétique. Les résultats montrent qu'avec une distance de 0,6 mm et un élément parasite de largeur We=1,26 mm, l'antenne proposée atteint le gain le plus élevé de 7,2 dBi à notre fréquence de fonctionnement de 28,70 GHz. Le 7,20 dBi convient également aux communications entre le CubeSat et les stations terrestres et est très efficace pour les communications inter-cubesatellitaires. Comme nous l'avons démontré dans les parties précédentes, l'antenne convenable pour les CubeSats est celle qui occupe le moins de place et qui permet d'obtenir le gain le plus élevé à une fréquence de fonctionnement. Ceci est dû aux longues distances dans l'environnement spatial.

L'antenne proposée offre un gain élevé de 7,2 dBi, une directivité totale de 8,3 dBi à une fréquence requise de 28,70 GHz. Elle permet également d'obtenir un diagramme de rayonnement quasi omnidirectionnel en plan H et un grand angle d'ouverture dans le plan E, voir Fig. 11. Cependant, le lobe latéral bas dans le plan E est dû à la très petite taille et à l'utilisation de deux éléments rayonnants.

Afin de valider les résultats obtenus en utilisant HFSS, les auteurs ont fabriqué le RMPA-EPs, voir Fig. 9. Les performances de l'antenne sont mesurées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Un port d'antenne est relié au VNA à l'aide des connecteurs SMA mâles aux deux extrémités. La configuration de test est connectée à un kit d'étalonnage 50 Ω et à un adaptateur SMA femelle à N-connecteurs mâles spécifique. Le système situé dans le plan de référence du connecteur SMA de l'antenne. Les coefficients de réflexion simulés et mesurés sont en bon accord et atteignent des valeurs élevées à une fréquence requise de 28,70 GHz. Cela indique que le RMPA-EPs conçu est bien adapté à 28,70 GHz avec des RL> 10 dB. Le tableau ci-dessous récapitule les performances de l'antenne qui sont fonction de 'We'.

En analysant les résultats obtenus, on peut dire que la largeur de l'élément parasite a des effets importants sur les caractéristiques de rayonnement d'un RMPA-EPs. La plus petite largeur 'We' donne le gain le plus élevé et les autres paramètres de l'antenne sont affectés par la présence de l'élément parasite comme suit,

- ✓ Le RL à 28,70 GHz est amélioré de 18,07 dB à 22,22 dB lorsque l'élément parasite est ajouté avec ses dimensions optimisées.
- ✓ Les résultats mesurés prouvent que le RMPA-EP a un RL élevée et une large bande passante de 700 MHz.
- ✓ Le gain total est amélioré lorsque l'élément parasite est ajouté, et il évolue inversement avec 'We'.

Référence	Modèle Antennaire	Type d'antenne	Type de CubeSat	Bande de Fréquence	Gain	Volume [mm3]	Beam steering	Deployable	Application
[6]		Multilayer Yagi-Uda antenna	1U	Ka band (24 GHz)	8.9 dBi	25.1×14 ×12.33	Not required	No	Inter-Swarm of CubeSats communications
[7]		Beam-Steerable Antenna Array with Parasitic Elements	3U	Ka band (28.5 GHz)	7.5 dBi	150.1×7 5×3	phase shifters	No	Inter-Swarm of CubeSats communications
[8]		Reconfigurable beamforming MPA with PEs	3U	S band (2.4 GHz)	8.2 dBi	130.1×1 30×1.57	RF pin diode BAR5002v switch	No	imaging, and weather forecasting, …
[9]		patch antenna array with parasitic elements	1U	V band (60 GHz)	8.83 dBi	16.4×12 ×0.127	Proper phase Progression	No	Inter-Swarm of CubeSats communications
[10]		reconfigurable parasitic patch antenna	1U	S band (2.4 GHz)	NA	NA	proper phase of the positions of the feed points	No	---
[Notre Antenne]		RMPA with Parasitic Elements	3U CubeSat of UoW, Australia	Ka band (28.7 GHz)	7.2 dBi	7.4×9.7 ×0.8	Not required	No	Inter-Swarm of CubeSats communications

Les performances des MPAs peuvent donc être améliorées à l'aide des structures couplées par écart. Ces structures composées de formes différentes selon la catégorie du patch, peuvent être rectangulaires, circulaires, triangulaires, semi-circulaires, elliptiques, carrées, hexagonales, octogonales, fractales, etc. Les MPAs couplés sont utilisés pour les opérations multi-bandes ainsi que pour améliorer le gain total et la bande passante des MPAs classiques. Dans ces structures antennaires, des patchs parasites sont placés à proximité du patch principal et sont excités par le couplage électromagnétique entre les éléments rayonnants. Par conséquent, le patch principal est excité par une technique d'alimentation et l'élément parasite est excité par un couplage entre-éléments, puis des inductances mutuelles et des capacités ont été créées entre les éléments rayonnants. Par exemple, si les fréquences de résonance f1 et f2 de deux éléments rayonnants sont proches l'un de l'autre, on obtient une large bande passante. En effet, le coefficient de réflexion global (-RL) sera la superposition de ces deux réponses (2 résonateurs) résultant de l'amélioration de la bande passante de l'MPA conventionnel. De plus, le couplage entre les éléments rayonnant ainsi que d'autres méthodes d'amélioration de la bande passante, comme les fentes, peuvent être utilisés ensemble pour générer une bande ultra-large et la structure globale peut être une antenne à large bande comme le comportement du système antennaire proposé. Par conséquent, en utilisant différentes formes, tailles, plus d'un élément rayonnant et différents emplacements pour le système d'alimentation, on peut concevoir divers MPAs couplées par écart pour de nombreuses applications telles que les antennes à gain élevé et à large bande. Dans cette contribution, les structures couplées par écart, offrent une bande ultra-large, un gain élevé et occupe une très petite taille sur le châssis du CubeSat.

Le RMPA-EPs conçu est comparé à d'autres antennes avec éléments parasites. Nous observons que les antennes proposées dans [7 - 10] assurent la direction du faisceau à l'aide de déphaseurs, d'un commutateur BAR5002v à diode pin RF et d'algorithmes pour la formation de faisceau, respectivement. Néanmoins, cela entraîne des coûts et une complexité supplémentaires. L'antenne proposée dans [6] est une antenne multicouche Yagi-Uda qui atteint un gain de 8,9 dBi à 24 GHz sans qu'il soit nécessaire de diriger le faisceau. Son principal inconvénient est son grand volume qui engendre des coûts et une complexité supplémentaires. De plus, en termes de fréquence de fonctionnement, les auteurs de [7] proposent un bon réseau d'antennes avec éléments parasites dirigeables par faisceau mais avec une grande taille de 150,1 × 75× 3 mm3 et un diagramme de rayonnement bidirectionnel. Ce réseau d'antennes est alimenté à (180° ; 60°), (180° ; 60°), (150° ; 60°), (120° ; 90°), (90° ; 90°), (90° ; 90°), (90° ; 120°), (60°, 150°) et (60° ; 180°) pour assurer la direction du faisceau en utilisant des déphaseurs. Cependant, dans notre cas l'utilisation de l'optimisation par algorithme génétique (GAO) a permis de concevoir un MPAR-EP très compact avec un gain élevé.

Par conséquent, l'amélioration du gain d'une antenne patch très compacte obtenue grâce à cette étude a été atteint en utilisant les techniques GAO et EPs. Les résultats obtenus montrent que ce RMPA-EP donne une large bande passante de 5750 MHz, un gain de 7,2 dB et un RL de 22,22 dB, à une fréquence requise de 28,70 GHz. De plus, les coefficients de réflexion mesurés et simulés montrent que l'antenne construite a un RL bien inférieur à 10 dB à notre fréquence de 28,70 GHz et donne une bonne bande passante pour les communications inter-essaim. De plus, le gain obtenu rend cette antenne qui est très optimisée également adaptée aux communications CubeSat-Terre.

Partie 04

MPAs et antenne réseau avec éléments parasites et MSS pour les CubeSats 3U

Comme il est prouvé aux parties 2 et 3, les éléments parasites peuvent améliorer le gain et la bande passante sans augmenter la taille physique de l'antenne, qui reste très limitée sur le corps d'un CubeSat standard. Cette partie présente et analyse ensuite la conception de trois antennes patch et un réseau avec éléments parasites ou une MSS pour les communications Cubesatellitaires dans les bandes X et Ku.

1. MPA compacte avec element parasites pour les communications cubesatellitaires

Dans la référence [11], nous proposons une antenne patch microruban avec éléments parasites conçue pour résonner en bandes X et Ku pour des applications cubesatellitaires. Il s'agit d'un patch rectangulaire avec des encoches et trois éléments parasites (RMPA-EPs), voir Fig. 12. Les RMPA-EPs proposés sont conçus et analysés en utilisant ANSYS HFSS 15.0. Dans cette structure antennaire, les trois éléments parasites sont utilisés pour obtenir les meilleures performances possibles à nos fréquences de résonance sans augmenter la taille géométrique totale de l'antenne. Tous les éléments rayonnants sont des conducteurs électriques parfaits et sont imprimés sur un substrat Rogers RT Duroid 5880 de taille 35,89 × 26,5 mm^2. L'antenne conçue est re-simulée en utilisant le CST MWS 2017 pour vérifier les résultats de l'HFSS. Il est constaté que les deux résultats sont en bon accord et prouvent que les RMPA-EPs proposés peuvent fonctionner sur trois bandes effectives couvrant les bandes X et Ku pour les applications de CubeSats, voir Fig. 13. Ces bandes de fréquences sont les suivantes,

- ✓ La première bande se situe autour d'une fréquence de fonctionnement 8,23 GHz et va de 8,16 GHz à 8,31 GHz. C'est une bande de fréquence adaptée aux CubeSats et nanosatellites en bande X, (8,025 - 8,4 GHz). En outre, le spectre de la NASA prouve que cette bande peut être utilisée pour des applications EES et SES.
- ✓ La seconde bande effective va de 13,40 GHz à 14,3 GHz, se situe autour d'une fréquence de résonance 13,96 GHz et couvre donc parfaitement les fréquences cubesatellitaires en bande Ku pour des applications SRS et TDRS (13,400 GHz - 14,300 GHz).
- ✓ La troisième bande est située dans la gamme de fréquence allant de 14,91 GHz à 15,43 GHz. elle se situe autour d'une fréquence de résonance 15,14 GHz et convient aux applications passives EES/SRS CubeSat.

Les RMPA-EPs conçus se caractérisent également par leurs diagrammes de rayonnement unidirectionnels à notre première fréquence de fonctionnement 8,20 GHz (bande X). Il n'y a pas de lobes secondaires et le niveau très minimum de lobes arrières prouve que la puissance maximale est émise à l'extérieur du CubeSat châssis par le lobe principal. De plus, ces RMPA-EPs atteignent un large angle d'ouverture à 8,20 GHz et peuvent donc couvrir une large zone de communication avec plusieurs CubeSats adjacentes et stations terrestres. Ceci est très efficace pour partager les données, augmenter le nombre d'analyses scientifiques et mener à bien des missions nécessitant des données diverses. D'un autre côté, le bon RMPA-EPs offre un gain élevé de 7,80 dB et une directivité totale de 7,88 dB à 8,20 GHz, voir Fig. 14. Il est très évident que le gain et la directivité à la deuxième bande effective (13,96 GHz) seront supérieurs à ceux de la première bande. Cela signifie que la troisième bande effective aura le gain et la directivité les plus élevés.

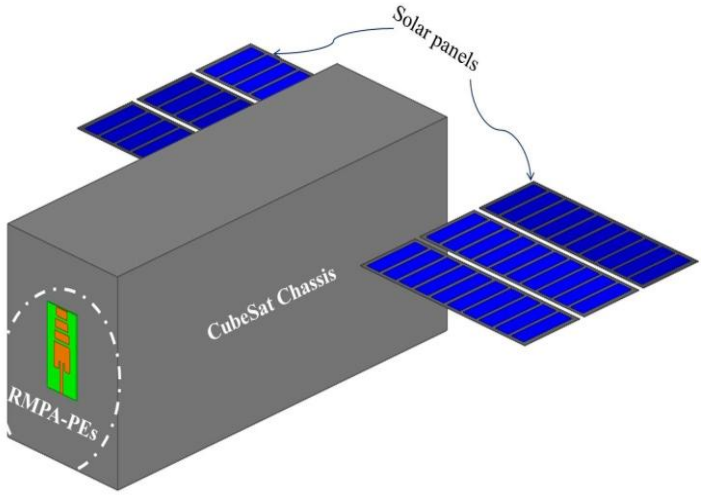


Fig. 12: Géométrie de l'antenne proposée + châssis d'un CubeSat 3U

Par conséquent, l'antenne RMPA-EPs proposée couvre trois bandes effectives en bandes X et Ku pour les applications cubesatellitaires. Cette antenne est compacte, atteint des gains élevé et des directivités élevés aux fréquences de fonctionnement souhaitées (8,20 GHz, 13,96 GHz et 15,14 GHz). Le grand angle d'ouverture obtenu de l'antenne conçus permet d'offrir une meilleure couverture sur de grandes surfaces de communication. De plus, l'antenne proposée convient à toutes les configurations cubesatellitaires, y compris la structure 3U qui est la configuration ciblé par cette thèse de doctorat.

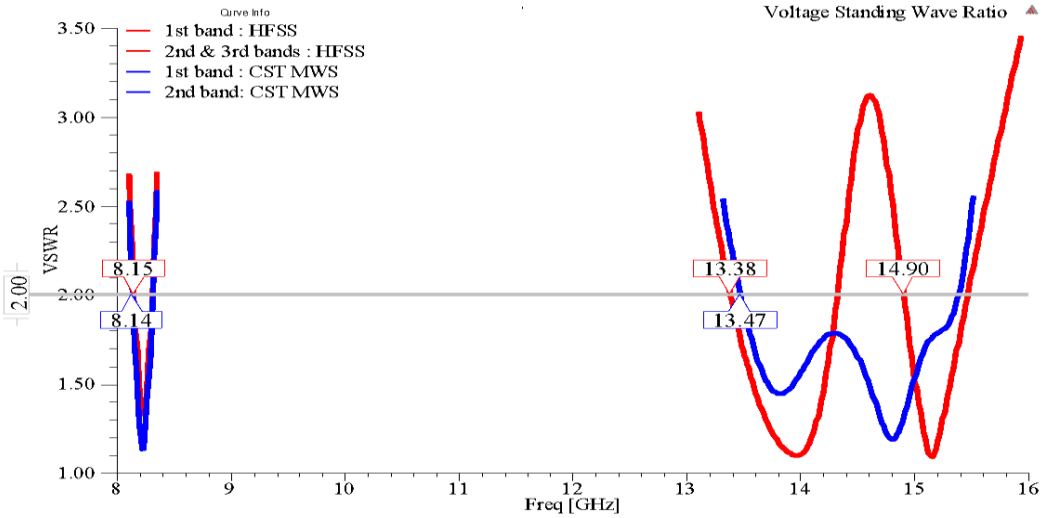


Fig. 13: Coefficient ROS [111]

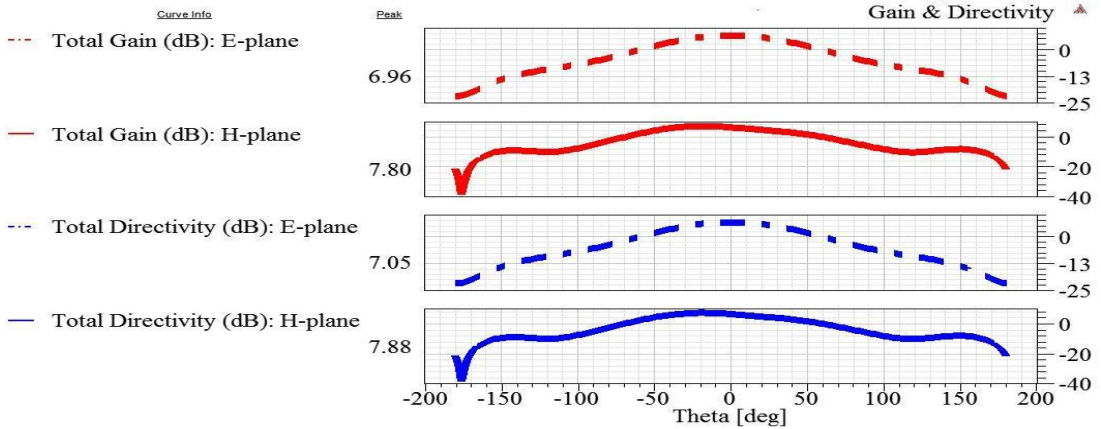


Fig. 14: Gain totale et directivité totale à 8.2 GHz

2. Nouveau RMPA-EPs à profil bas pour les communications cubesatellitaires

Dans notre contribution présentée dans la référence [12], un nouveau RMPA-EPs est conçu et optimisé pour être une structure antennaire bi-bande dans les bandes X (8,20 GHz) et Ku (13,90 GHz). Dans ce nouveau design, le quatrième élément parasite est utilisé pour produire une large bande effective en combinant la deuxième et troisième bande intérieure objet de la référence [11], voir Fig. 15. Ce nouveau RMPA-EPs est conçu sur le même substrat [11] afin de démontrer l'approche des éléments parasites pour l'amélioration de la bande passante. Notant que tous les paramètres géométriques des cinq patchs sont optimisés en utilisant QNM afin d'obtenir une structure bi-bande, une taille compacte, un gain élevé et une directivité maximale aux bandes X et Ku.

Avant d'entrer dans une analyse plus détaillée, la configuration proposée est subdivisée en quatre structures antennaires. Le design (a) est l'antenne sans encoches et sans éléments parasites. Le design (b) représente le MPA avec encoches et sans éléments parasites, et le design (c) est le quatrième et dernier MPAR-EP sans le quatrième élément parasite. Par conséquent, ce nouveau RMPA-EPs est appelé aussi design (d). Fig. 17 montre que la forme optimisée (design (d)) peut fonctionner de manière satisfaisante sur deux bandes effectives, X et Ku :

1. la première bande se situe autour de notre fréquence de fonctionnement 8,2 GHz (8,11 GHz - 8,28 GHz), et est convenable pour les CubeSats et les Nanosatellites en bande X ;
2. La 2ème bande s'étend de 13,40 GHz à 15,60 GHz et couvre parfaitement les fréquences des cubesatellitaires dans la bande Ku pour des applications SRS, surveillance et TDRS. Cela signifie que les deuxième et troisième bandes effectives de l'antenne précédente [11] sont combinées pour produire une bande ultra large et que la nouvelle structure antennaire est donc devenue bi-bande.

Le nouveau RMPA-EPs atteint un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel à 8,2 GHz (bande X) (grand angle d'ouverture), un gain plus élevé de 7,85 dBi et une directivité totale de 7,94 dBi, tandis que le gain maximal est de 8,80 dBi à 13,90 GHz, voir Fig. 16. Cela signifie que les patchs parasites améliorent la bande passante sans modifier la forme du diagramme de rayonnement, le gain et la directivité totale aux fréquences de résonance souhaitées. Ces résultats prouvent que les éléments parasites peuvent affecter significativement le coefficient de réflexion et donc l'impédance d'entrée et la largeur de la bande passante. Selon les résultats obtenus, nous pouvons résumer cette nouvelle contribution en tant qu'approche d'amélioration de la largeur de la bande passante en utilisant des patchs parasites. Les effets des éléments parasites sur les performances de l'antenne proposée sont analysés comme suit,

- ✓ À la première bande, les éléments parasites améliorent le RL à la fréquence requise 8,2 GHz de 16,83 dB (antenne (a)) à 21,09 dB (antenne (d)).
- ✓ La deuxième bande est améliorée de 640 MHz (antenne (b)) [ou 650 MHz (antenne (a))] (antenne sans EPs) à 1760 MHz (antenne avec EPs) [antenne (d)].
- ✓ La valeur absolue de la partie imaginaire d'impédance d'entrée à 8,20 GHz est diminuée de |Im {Zin}| = 12.31 (antenne (a)) à |Im {Zin}| = 4,46 (antenne (d)).
- ✓ La structure optimisée (antenne (d)) a un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel à 8,20 GHz (angle d'ouverture de 182,59 ° dans le plan E et de 173,06 ° dans le plan H), ce qui est souhaitable pour les applications CubeSats.
- ✓ Le gain et la directivité (dans les plans E et H) restent quasi constants pour toutes les antennes proposées (avec et sans éléments parasites).

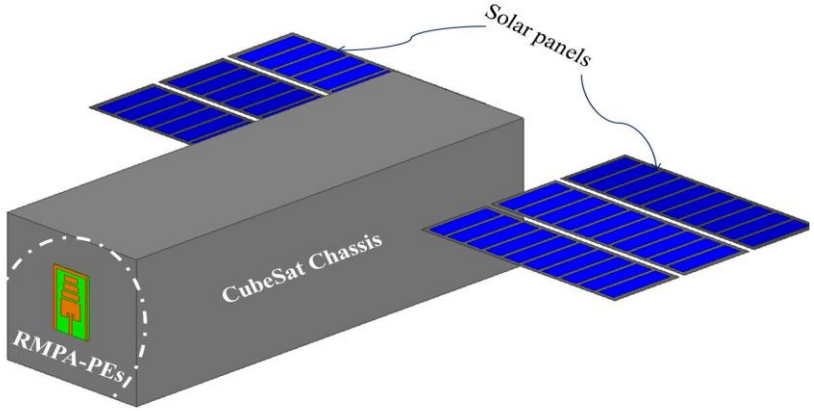


Fig. 15: Géométrie de l'antenne proposée +châssis d'un CubeSat 3U

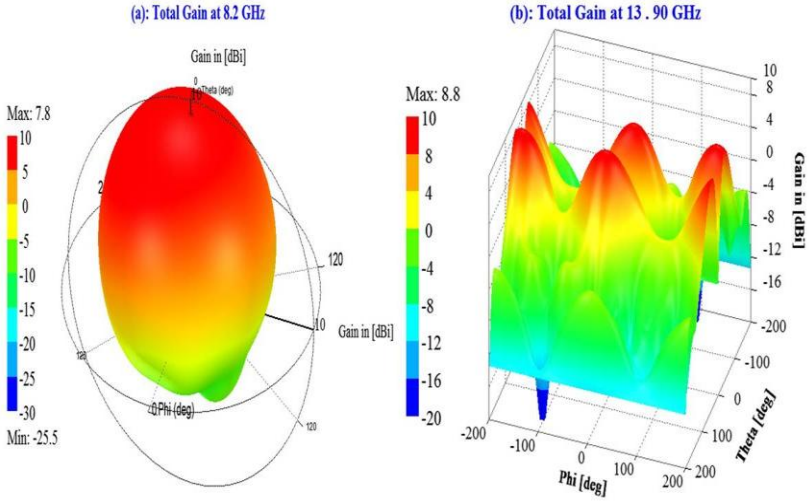


Fig. 16: *Gain totale à 8.20 et 13.90 GHz*

Configuration	Performance	Fréquence de résonance		Log |S11|		Bande passante	
		1st Bad	2nd Band	1st Band	2nd Band	1st Band	2nd Band
RMPA sans EPs	Design (a)	8.20 GHz	15.1 GHz	-16.83 dB	-28.53 dB	180 MHz	650 MHz
	Design (b)	8.20 GHz	15.1 GHz	-18.17 dB	-25.55 dB	180 MHz	640 MHz
RMPA avec PEs	Design (c)	8.20 GHz	13.9 GHz	-19.16 dB	-35.69 dB	180 MHz	1140 MHz
	Design (d)	8.20 GHz	13.9 GHz	-21.09 Db	-33.98 dB	180 MHz	1760 MHz

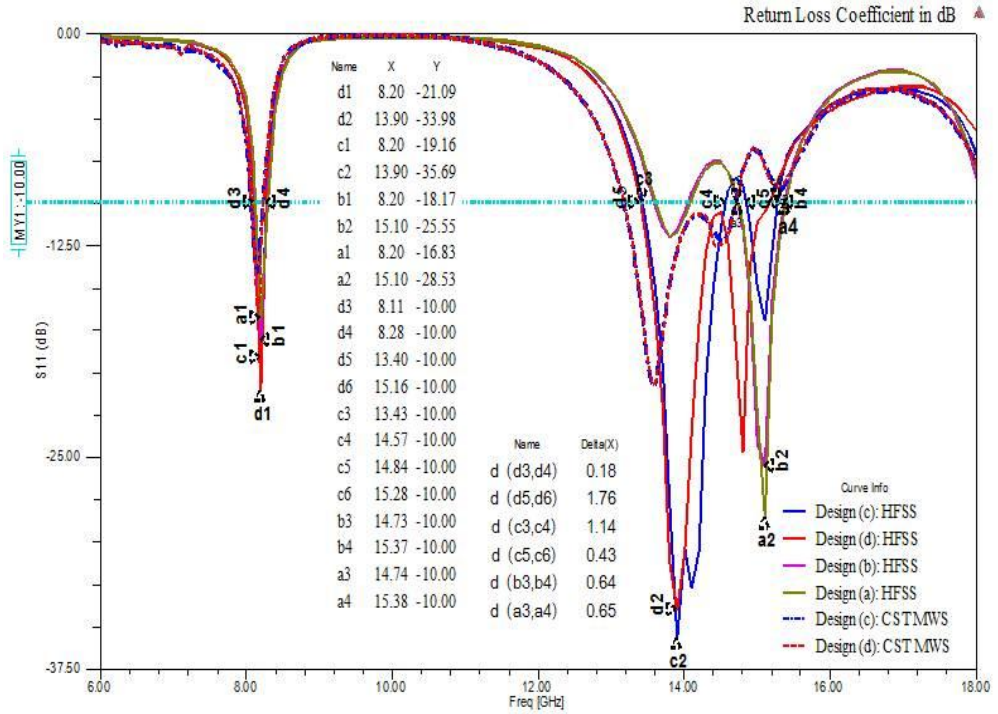


Fig. 17: Les coefficients S11 des antennes proposées.

3. Antenne réseau avec elements parasites pour les CubeSats

L'antenne précédente [13] est utilisée pour former une antenne réseau planaire à gain élevé et avec des éléments parasites pour les CubeSats 3U. Pour cela, quatre RMPA-EPs sont placés sur les bords d'un système d'alimentation spécifique combinant des lignes microruban de 50, 71,79 et 100 Ω. Ceci conduit à la conception d'une structure bi-bande ayant une taille adaptée aux CubeSats 3U, voir Fig. 18. Le gain total et la directivité totale sont augmentés de plus de 3 dBi à la fréquence de résonance 8,15 GHz. L'antenne proposée est conçue comme un réseau d'antennes planaires 2 × 2 avec éléments parasites (RAP-EPs) et est montée sur la grande face d'un CubeSat 3U. Les RAP-EPs proposées ont été conçus sur le même substrat en utilisant ANSYS HFSS. L'idée était de minimiser la taille du RAP-EPs, de minimiser les pertes, d'obtenir un gain élevé et une directivité maximale aux fréquences de fonctionnement souhaitées. Pour cela, le système d'alimentation proposé est excité au centre à l'aide d'une sonde coaxiale de 50Ω.

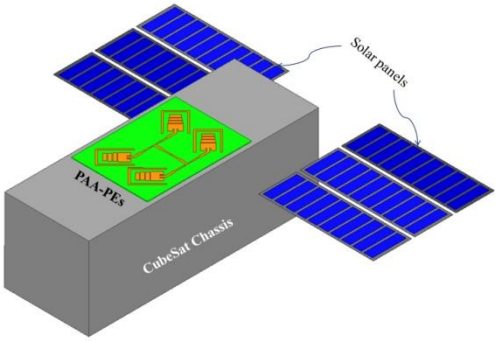


Fig. 18: *Géométrie de l'antenne proposée + châssis d'un CubeSat 3U*

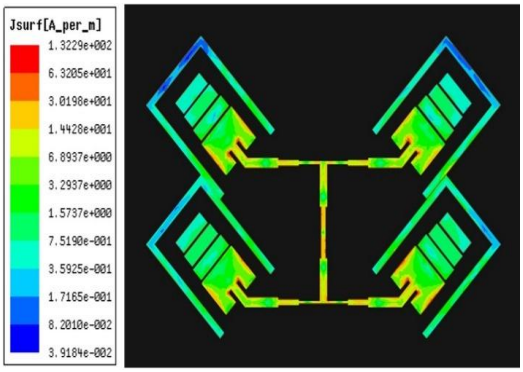


Fig. 19: *Distribution de courant*

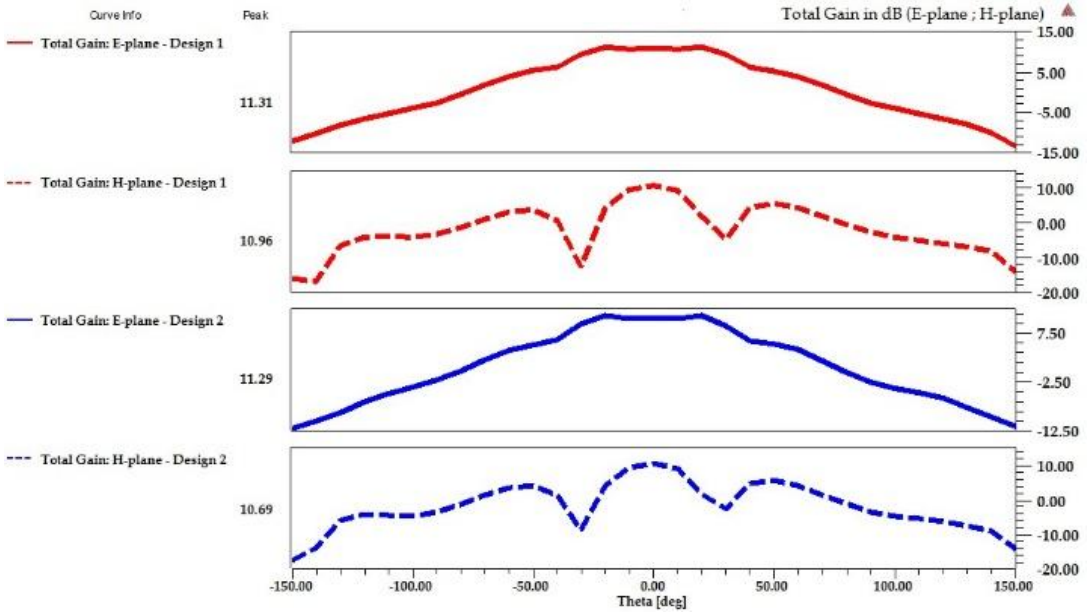


Fig. 20: *Gain totale et directivité totale à 8.15 GHz*

Il est à souligner que le RMPA-EPs seul résonne autour d'une fréquence minimale de 8,11 GHz avec un coefficient de réflexion de 31,13 dB. Sa bande passante est de 80 MHz (8,11 GHz - 8,19 GHz) ce qui est souhaitable pour les communications cubesatellitaires en bande X. De plus, il offre un diagramme de rayonnement unidirectionnel, un gain élevé de 8,14 dB et une directivité totale de 8,17 dBi à 8,15

GHz. D'autre part, la distribution du courant des RAP-EPs est uniforme sur toute la structure, et alors la quantité maximale de puissance est rayonnée par les éléments du réseau qui sont inclinés d'un angle de 45° pour transmettre ces énergies dans la direction principale à l'extérieur du châssis cubesatellitaire, voir Fig. 19.

Il est prouvé donc que les résultats du RAP-EPs changent en fonction des dimensions du système d'alimentation et donnent deux cas: la réseau 1 (design 1) résonne à 8,15 GHz avec un RL de 20,49 dB tandis que le réseau 2 (design 2) est bi-bande, atteint les RLs les plus élevés et couvre deux bandes efficaces aux bandes X et Ku pour les communications cubesatellitaires. Désormais, le réseau 2 (RAP-EPs ayant les dimensions du design 2) est privilégié au cours de cette étude. Le RAP-EPs proposé peut donc fonctionner sur deux bandes effectives et les résultats obtenus sont analysés en détail à travers les remarques suivantes,

- ✓ En bande X, le RAP-EPs résonne à 8,15 GHz avec un RL de 33,31 dB et une bande passante allant de 8,03 GHz à 8,24 GHz (210 MHz).
- ✓ En bande Ku, le RAP-EPs couvre une large bande passante allant de 12,87 GHz à 13,22 GHz (350 MHz) avec un RL de -32,11dB à 13,01 GHz.
- ✓ Le RAP-EPs a une impédance d'entrée de 51,18-j0,84 Ω à 8,15 GHz (bande X) et de 54,08 + j0,68 Ω à 13,01 GHz (bande Ku).

Le RAP-EPs a une distribution uniforme du courant, une bonne adaptation d'impédance, un gain élevé de 11,29 dBi et une directivité maximale de 11,34 dBi à la fréquence 8,15 GHz (bande X), voir Fig. 20. Dans cette structure antennaire, l'étude était axée sur l'amélioration du gain et de la directivité d'un RAP-EPs sur une taille miniaturisée (taille convenant aux CubeSats 3U). L'approche proposée conduit à la conception d'un RAP-EPs bi-bande offrant de bonnes performances de rayonnement dans les bandes X et Ku pour les communications CubeSat. L'efficacité de l'approche proposée pour les CubeSats peut être étayée comme suit,

- ✓ La première bande est autour de 8,15 GHz et est convenable pour les CubeSats et les nanosatellites en bande X (8,025 GHz - 8,4 000 GHz); normalisation EWC27 préparée par la société Syrlinks en collaboration avec le CNES français. Elle est aussi favorable aux systèmes d'exploration terrestre (EES).
- ✓ La deuxième bande va de 12,87 GHz à 13,22 GHz et est convenable pour les applications CubeSat en bande Ku (12,75-13,25 GHz).
- ✓ Aux fréquences 8,15 GHz et 13,01 GHz, l'impédance d'entrée du réseau planaire proposé a une partie réelle proche de 50Ω et une partie imaginaire proche de zéro, respectivement. Ensuite, les pertes d'énergie introduites par le système d'alimentation sont faibles et le réseau d'antennes donne une bonne adaptation d'impédance aux fréquences de résonance souhaitées.
- ✓ Le gain et la directivité à 8,15 GHz passent respectivement de 8,14 dB et 8,17 dB (RMPA-EPs unique) à 11,31 dB et11,37 dB (RAP-EPs).
- ✓ L'antenne réseau préféré présente un volume et une forme compatibles avec les CubeSats 3U.

Par conséquent, le réseau d'alimentation proposé et l'angle d'inclinaison de 45° choisis miniaturisent la taille du RAP-EPs et le rendent donc très adaptée aux CubeSats 3U. La miniaturisation de l'antenne est réalisée avec un gain élevé de 11,37 dBi à 8,15 GHz. De plus, le RAP-EPs est bi-bande et peut donc communiquer avec des stations de base sur la surface terrestre dans deux bandes de fréquences. Cela permettra également au CubeSat de partager des données avec plus d'une station terrestre.

4. MPA avec MSS a gain élevé pour les CubeSats et les très petits satellites

Dans notre contribution objet de la référence [14], une très petite MPA avec MSS est conçue et analysée en utilisant ANSYS HFSS pour fonctionner à 8,20 GHz pour les CubeSat et les très petits satellites, voir Fig. 21. Cette antenne est composée d'un MPA miniaturisé et d'une matrice MSS de 41 cellules élémentaires placées périodiquement dans la direction horizontale et au-dessus de l'antenne source. L'idée principale était d'utiliser le MSS pour améliorer les performances dune antenne très compacte sans augmenter sa longueur ni sa largeur. Cette antenne MSS occupe une très petite surface de 12,63 × 12,85 mm^2 et est conçue sur un substrat FR4 mince. L'antenne source (MPA sans métasurface) est alimentée par une ligne d'alimentation de 50Ω et tous ses paramètres sont optimisés en utilisant QNM, excepté les dimensions principales de l'MPA qui sont calculées numériquement. La métasurface proposée est imprimée sur un diélectrique FR4 peu coûteux (hauteur de 0,8 mm), a des dimensions de 12,63 x 9,53 mm2 et est montée au-dessus du MPA miniaturisé à une distance d'air de 4,45 mm. Une cellule unitaire de 1 mm × 1 mm est sélectionnée et optimisée en tant qu'élément de métasurface de forme carrée car elle offre de meilleures performances.

L'antenne MSS atteint une large bande de 410 MHz (7,99 - 8,40 GHz), un RL de 20,18 dB et un ROS de 1,22, à la fréquence de résonance 8,20 GHz. On peut dire donc que l'antenne source seule fournit une large bande passante, un RL élevé et un ROS proche de un. Néanmoins, le gain de l'MPA sans MSS n'est pas suffisant pour des liaisons de communications CubeSat-terre. Dans ce cas, l'antenne MSS offre un gain élevé de 5,8 dBi, une directivité de 6,83 dBi, une distribution uniforme du courant, et un grand angle d'ouverture à la fréquence 8,20 GHz, voir Fig. 22. Par conséquent, cette très petite antenne MSS fonctionne sur une large bande avec un gain élevé, une directivité maximale, et de très grands angles d'ouverture, voir Fig. 23. Ceci est dû au programme QNM utilisé pour optimiser les paramètres géométriques de l'antenne. Ces résultats peuvent être analysés à travers les remarques suivantes,

- ✓ La métasurface se trouve à une distance de 4,5 mm au-dessus de l'antenne source et alors l'antenne MSS occupe un très faible volume sur une très petite zone sur le châssis cubesatellitaire. Cette antenne MSS onc convient parfaitement à toutes les structures CubeSat et aux très petits satellites,
- ✓ Le réseau MSS proposé améliore le gain de 5,05 dBi (MPA miniaturisée sans MSS) à 5,75 dBi (antenne métasurfacée).
- ✓ Le lobe principal occupe un grand angle d'ouverture et alors l'antenne MSS peut couvrir une grande surface pour les FemtoSats et les CubeSats. Cette caractéristique rend l'antenne MSS très efficace pour les inter-essaims de CubeSats.
- ✓ Le réseau MSS présente une distribution uniforme du courant. De plus, il a un bon couplage électromagnétique avec le MPA miniaturisé pour renforcer la puissance dans la direction principale.

La contribution présentée démontre que le MSS se couple électromagnétiquement avec l'antenne source via des espaces d'air, puis atteint les objectifs souhaités en utilisant certaines méthodes d'optimisation comme la QNM. L'MSS améliore le gain et modifie les autres performances d'antenne à une fréquence de résonance souhaitée. Tandis que, les éléments parasitaires présentent de faibles effets sur les gains aux basses fréquences. Ils peuvent améliorer les RLs et les largeurs de bande d'impédance tandis que leurs effets sur les gains totaux peuvent être observés à des fréquences très élevées. A noter que les éléments parasites sont un cas typique de MSS, c'est-à-dire la structure coplanaire.

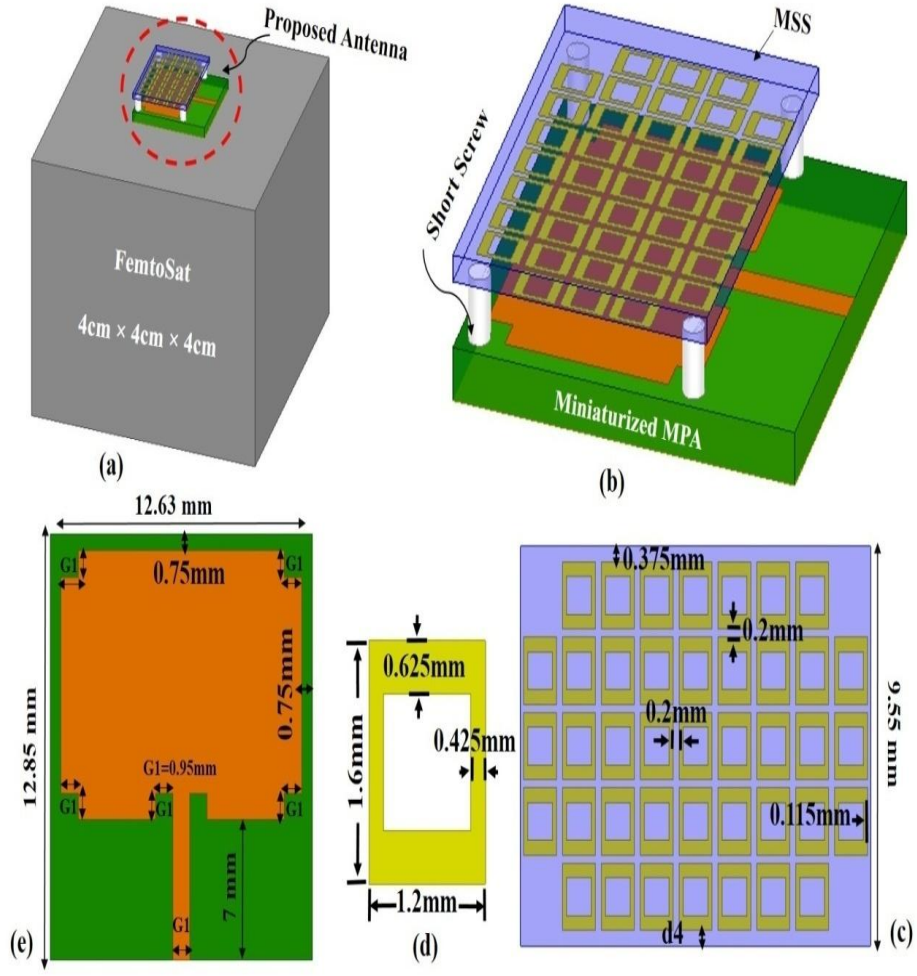


Fig. 21: (a) système complet (FemtoSat + antenne); (b) Vue 3D de l'antenne proposée; (c) MSS; (d) Cellule unitaire; (e) MPA miniaturisée

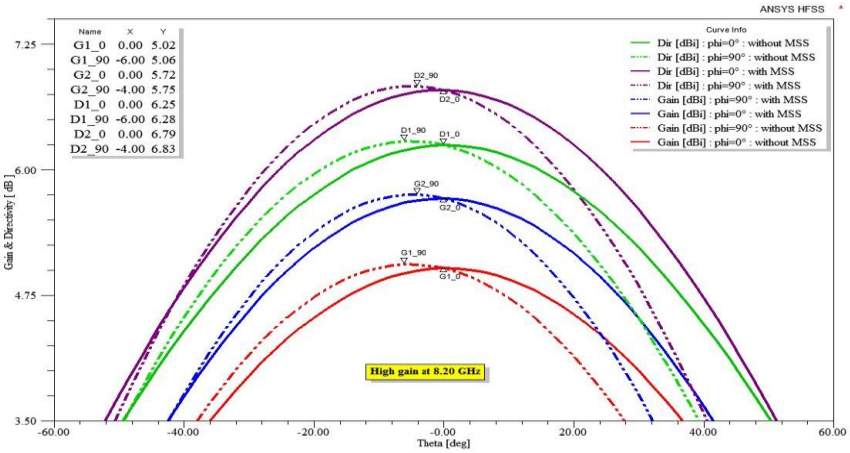


Fig. 22*: Gain totale et directivité totale à 8.20 GHz.*

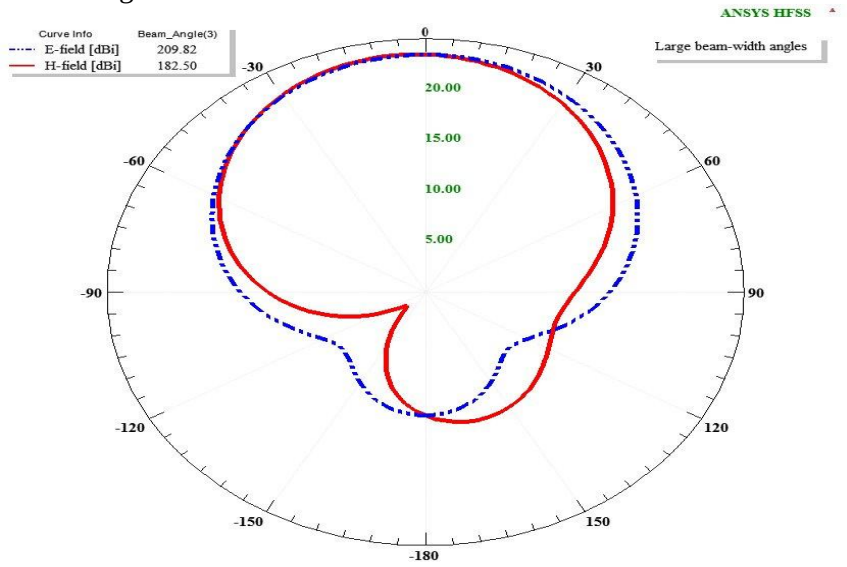


Fig. 23*: diagramme de rayonnement en 2D à 8.20 GHz.*

Partie 05

Antennes à fente avec MSS en bande S pour les CubeSats 3U

Cette partie traite l'utilisation des structures MSS au-dessus des antennes à fente pour augmenter le gain à une fréquence de fonctionnement de 2450 MHz pour les liaisons de communication CubeSat-Terre. En plus du MSS, une partie métallique du châssis du CubeSat 3U située au-dessous des antennes conçues, est utilisée comme réflecteur à cavité afin d'obtenir le gain maximum possible à la fréquence 2450 MHz.

1. Antenne à fente miniaturisée avec métasurface pour les CubeSats

Dans notre contribution objet de la référence [15], une antenne à fente avec MSS alimentée par un guide d'onde coplanaire a été conçue et analysée à l'aide ANSYS HFSS pour l'utilisation sur les CubeSats. L'antenne MSS se compose d'une antenne à fente alimentée par un guide d'ondes coplanaire de 50-Ω et un MSS placé au-dessus de la première à une distance d'air de 8 mm, voir Fig. 24. L'antenne à fente est gravée sur le substrat FR4 bas d'épaisseur de 1,6mm. La métasurface est une matrice 7×7 des cellules unitaires de forme circulaire de 3mm avec un espace de 1mm entre chaque élément. Il est imprimé sur un support FR-4 peu coûteux d'épaisseur de 0,8mm.

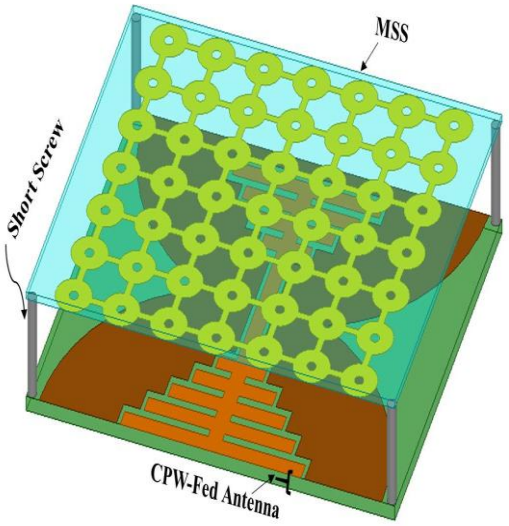


Fig. 24: *Antenne MSS proposée*

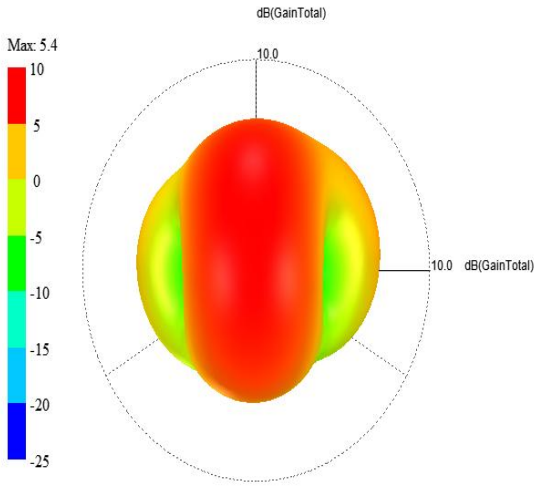


Fig. 25: *Gain total de l'antenne proposée.*

La bande passante est augmentée de 93,72 MHz (antenne à fente seule) à 261,47 MHz (antenne MSS). Cette nouvelle structure donne un RL élevé de 20,82 dB et un faible ROS de 1,20 à 2450 MHz. En outre, l'antenne SMS offre un gain élevé de 5,4 dBi et une directivité totale de 6,0 dBi à 2450 MHz, voir Fig. 25. Ceci est dû à l'utilisation de MSS qui concentre plus de puissance rayonnante dans la direction principale (l'axe Z).

Le MSS proposé améliore donc le gain de plus de 2,30 dBi à une fréquence souhaitée de 2450 MHz. Ceci est dû au fait que les cellules unitaires du MSS sont excitées par le couplage électromagnétique avec l'antenne source et concentrent ensuite plus d'énergie dans la direction de rayonnement principale. D'autre part, les cellules élémentaires créent des 1D-EBG entre elles après s'être excitées et augmentent ainsi l'énergie rayonnante transmise par l'antenne MSS dans l'espace.

Par conséquent, l'antenne MSS proposée occupe une taille adaptée à toutes les configurations cubesatellitaires, peu coûteuse et offre de bonnes performances à la fréquence 2450 MHz. De plus, cette contribution montre l'efficacité de la métasurface pour l'amélioration du gain pour les CubeSats aux basses fréquences et plus particulièrement dans les bandes de fréquences ISM.

2. Antenne à fente circulaire à gain élevé en bande S pour les CubeSats

Dans notre contribution objet de la référence [16], l'antenne proposée a été conçue pour fonctionner à une fréquence de 2450 MHz. Cette antenne est imprimée sur un substrat Rogers RO 4003 de taille 90 mm × 90 mm, voir Fig. 26. C'est une antenne à fente avec un nouveau réseau MSS de 9 × 9 cellules unitaires. Le MSS est au-dessus de l'antenne source à une distance d'air de 16,7 mm. L'antenne source est une antenne à fente circulaire de rayon Rs = 28,83 mm et entourée par un plan de masse à une distance d0 = 6 mm. L'élément rayonnant de l'antenne source est alimentée par un guide d'ondes de 50Ω de largeur Wf = 3,4 mm et est placée à d1 = 0,8 mm du plan de masse. L'énergie électromagnétiques passe de la ligne d'alimentation à l'élément rayonnant a travers une ligne de transition de largeur Wf = 2,4 mm, ce qui permet une bonne adaptation d'impédance avec une impédance d'entrée de 49 Ω. Cela signifie que de faibles puissances sont réfléchies vers l'émetteur de CubeSat. L'antenne est fendue par 4 trous ayant des dimensions géométriques de Ws = 3mm et d2 = 8mm, optimisées pour focaliser la puissance maximale dans l'axe Z et ainsi maximiser le gain à la fréquence de fonctionnement requise (2450 MHz). L'antenne source est à large bande passante, atteint un gain maximal de 4,10 dB, et son diagramme de rayonnement est bidirectionnel. Cela entraîne la perte d'une quantité importante d'énergie électromagnétique par le rayonnement du lobe arrière. Ces radiations du lobe arrière peuvent être réduites lorsque la métasurface proposée est montée sur l'antenne à fente à une distance d'air optimisée.

La matrice métasurfacique proposée est choisie comme un réseau 9 × 9 des anneaux fermés carrés (AFC). Les paramètres géométriques de l'AFC sont les suivants: Ru = 3,5 mm, d3 = 1,2 mm. La forme carrée est sélectionnée en tant que cellule unitaire car elle offre de meilleures performances et surtout pour le gain. L'AFC réalise une réflexion en phase des ondes incidentes et fournit une distribution de courant uniforme sur les cellules unitaires qui circulent dans une direction unique. Ceci est important car il entraîne une augmentation du gain et de la directivité de l'antenne à la fréquence requise. La dernière étape consiste à mettre en œuvre l'antenne proposée sur le châssis du CubeSat. Pour éviter tout contact direct entre le diélectrique de l'antenne et le boîtier satellite, une distance de 4,8 mm est maintenue entre les deux et est optimisée en utilisant QNM.

Dans la contribution d'antenne MSS précédente, il a été prouvé qu'une antenne à fente alimentée par un guide d'ondes avec métasurface peut donner un gain élevé avec un RL bien supérieure à 15 dB à la fréquence 2450 MHz. Les RL de l'antenne à fente proposée sans MSS, de l'antenne MSS et du système complet sont respectivement de 16,35 dB, 25,83 dB et 27,75 dB à 2450 MHz. Cela signifie qu'un seul mode est excité et que la fréquence de résonance de 2450 MHz n'a pratiquement pas changé. Le RL augmente lorsque la métasurface et le châssis de CubeSat sont intégrés avec l'antenne source. De plus, le système complet présente une bonne adaptation d'impédance à 2450 MHz avec une impédance d'entrée de 53.66+j2.15Ω.

Grâce à ces résultats, nous pouvons affirmer que le boîtier de notre CubeSat a des effets significatifs sur les lobes secondaires et arrière, la bande passante et l'impédance d'entrée à 2450 MHz. A noter qu'un RL supérieur à 15 dB et une bande passante de quelques centaines de MHz sont acceptables pour les CubeSats. Cela est dû à la mise en œuvre de l'antenne conçue à l'extérieur du boîtier cubesatellitaire. Cependant, le gain à la fréquence de fonctionnement 2450 MHz constitue le paramètre d'antenne le plus important pour cette contribution.

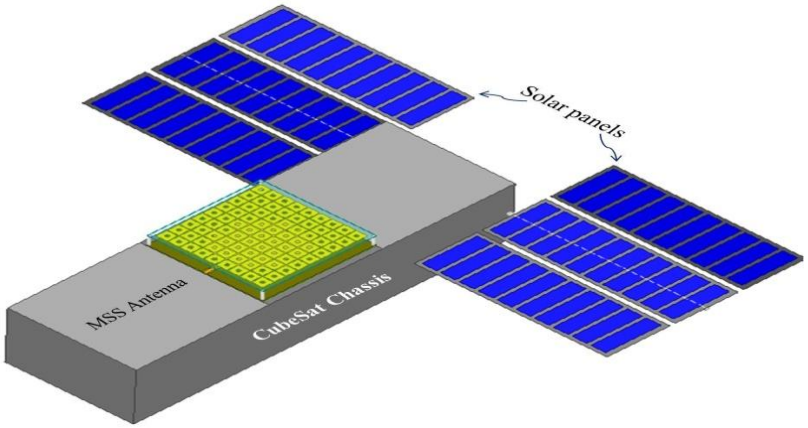


Fig. 26: Antenna MSS montée sur un châssis du CubeSat 3U

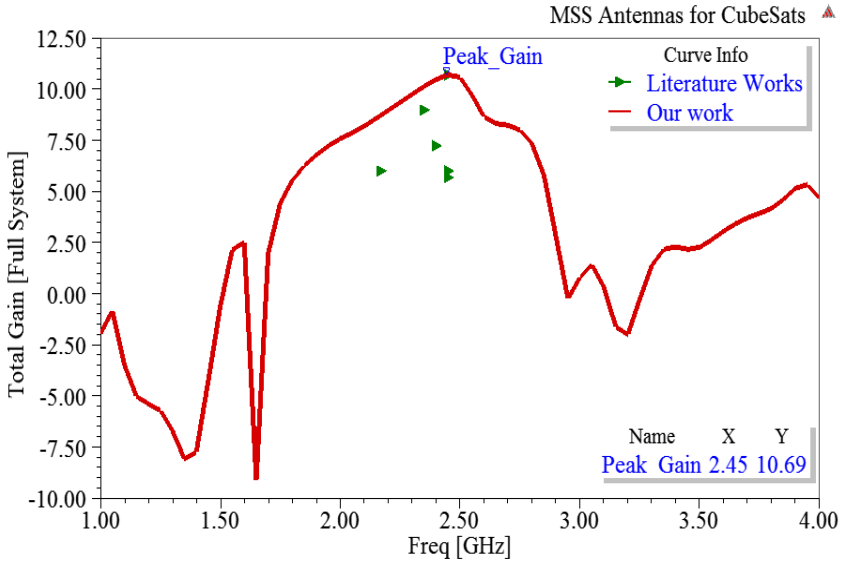


Fig. 27: Total gain vs. Frequency

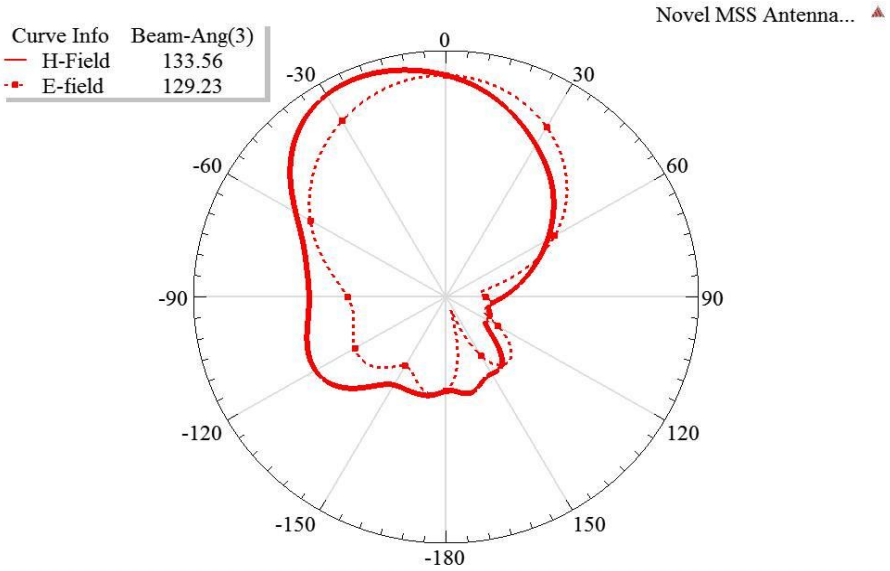


Fig. 28: Diagramme de rayonnement en 2D : Système complet

	Fréquence	Taille	Gain	CubeSat
[18]	2450 MHz	96.5×96.5 mm^2	5.69 dBi	3U
[19]	2450 MHz	80 ×80 mm^2	~6.0 dBi	3U
[20]	2450 MHz	120 ×120 mm^2	~ 6.0 dBi	6U
[21]	2400 MHz	76 × 100 mm^2	7.23 dBi	3U
[22]	2170 MHz	110×110 mm^2	6.0 dBi	6U
[23]	2350 MHz	160×60 mm^2	8.97 dBi	6U
[16]	2450 MHz	90 ×90 mm^2	10.7 dBi	3U

L'antenne à fente sans MSS atteint un gain élevé de 4,10 dBi pour l'FR4 et de 5,50 dBi pour le RO 4003 à 2450 MHz, tandis que le diagramme de rayonnement est bidirectionnel dans les deux cas et prend le plan horizontal comme référence de symétrie. Cela signifie qu'une quantité importante de puissance réfléchie peut être redirigée à l'extérieur du CubeSat à l'aide d'un réflecteur à cavité ou d'une métasurface. Cela peut nous permettre de maximiser le gain total à 2450 MHz. Par conséquent, la matrice MSS proposée qui représente la clé de notre contribution améliore le rayonnement dans le plan principal et réduit le niveau des lobes arrière de l'antenne source. On constate que la mise en œuvre d'un MSS à une distance d'air de 16,7 mm au-dessus de l'antenne source permet d'obtenir le bon couplage électromagnétique entre les deux avec un seul mode résonant excité à 2450 MHz. Il donne le gain le plus élevé avec une bonne adaptation d'impédance (RL élevé) à la fréquence de fonctionnement requise (2450 MHz). Par conséquent, le gain de l'antenne passe de 4,10 à 7,80 dBi et le niveau du lobe arrière diminue lorsque le MSS est implémenté. La raison est que les cellules unitaires du MSS sont excitées par un couplage électromagnétique avec l'antenne à fente, puis réémettent;

En raison d'un gain élevé de 10,70 dBi (supérieur à 10 dBi) et du très grand angle d'ouverture à 2450 MHz, voir Figs. 27 and 28, l'antenne MSS proposée revêt une importance considérable pour les missions cubesatellitaires de type 3U. Dans cette contribution, la métasurface est appliquée pour modifier le diagramme de rayonnement, puis pour améliorer le gain des antennes à fente proposées à une fréquence ISM de 2450 MHz. Il a été constaté qu'en utilisant une matrice MSS spécifique et une petite surface du châssis du CubeSat, le diagramme de rayonnement était devenu unidirectionnel et le gain passait de 4,1 dBi (antenne source) à 10,70 dBi (système complet) à 2450 MHz. L'antenne proposée donne un RL de 27,75 dB, et une impédance d'entrée de 53,66 +j2,15Ω à 2450 MHz et une bande passante de 130 MHz. L'antenne conçue est légère, et de taille convenable pour toutes les configurations CubeSat.

Dans cette partie, l'objectif principal est de maximiser le gain des antennes planes pour surmonter certains problèmes de communication rencontrés dans les CubeSats. A savoir, l'exigence de RSB élevé pour la liaison montante / descendante, ainsi que l'adéquation de CubeSats pour des missions dans l'espace lointain. À travers cette partie, il est démontré que la combinaison d'antennes planaires avec un SMS peut atteindre un gain élevé de 10,7 dBi en bande S. Pour compléter notre étude, la deuxième antenne MSS [16] a été comparée à des antennes similaires pour les CubeSats et il a été constaté que notre antenne [16] permettait d'obtenir le meilleur gain en bande S avec une taille adaptée à toute configuration cubesatellitaire.

Cette partie présente donc l'utilisation de l'SMS pour améliorer le gain totale d'une antenne à une fréquence ISM de 2450 MHz pour les communications cubesatellitaires. En plus, le châssis du CubeSat est utilisé pour obtenir un diagramme de rayonnement unidirectionnel, puis pour maximiser le gain à 2450 MHz. Les résultats obtenus montrent des RL élevés et une bonne adaptation d'impédance à la fréquence de fonctionnement requise. A noter que les deux antennes MSS proposées sont légères, compactes, et offrent des gains élevés et conviennent à toute configuration cubesatellitaire.

Partie 06

Conclusion

Antennes pour les CubeSats doivent être petites, avoir une bonne bande passante et le plus important génèrent des gains élevés aux fréquences de fonctionnement requises. Ces exigences visent à maximiser l'espace sur la surface de CubeSat pour les panneaux solaires et à assurer la communication avec les stations terrestres. Notant que des gains élevés sont nécessaires pour avoir des débits de données élevés. Désormais, cette thèse présente la première étude complète sur les MPAs, RAPs, et antennes à fente avec éléments parasites et MSS pour les CubeSats de type 3U.

Comme il est mentionné lors de la présentation de cette thèse de doctorat, le principal inconvénient des antennes planaires sans éléments parasites ni MSS est qu'elles ont de faibles gains et une bande passante étroite. Cela signifie qu'ils ne peuvent être utilisés que pour les communications à courte distance comme le cas des essaims de CubeSat qui nécessitent plus de CubeSats. Par conséquent, cette thèse a introduit les éléments parasites ou MSS à côté ou au-dessus de l'antenne principale afin de relever ces défis et de réaliser ainsi la communication entre le CubeSat sur son orbite et une station terrestre à la surface de la Terre.

Les résultats présentés dans la deuxième partie montrent que les éléments parasites ont des effets significatifs sur le gain aux très hautes fréquences (bande Ka). Toutefois, dans les basses fréquences (bande S), les effets des éléments parasites ne sont pas suffisants pour les communications à longue distance. Cela signifie que les éléments parasites peuvent être utilisés comme une bonne approche pour l'amélioration de la bande passante à des fréquences plus élevées qui permettent d'obtenir des gains élevés.

La troisième partie montre qu'une très petite surface sur le châssis du CubeSat peut être utilisée pour établir des liaisons de communication avec les autres CubeSat du même essaim. A noter que les basses fréquences sont autorisées sans licence pour l'utilisation dans les applications cubesatellitaires. Cette partie présente la conception et l'optimisation d'un RMPA-EPs sur une très petite surface de $7,4 \times 9,7$ mm^2. Cette antenne donne un gain de 7,2 dBi à 28,70 GHz pour les communications inter-Essaim cubesatellitaire.

La quatrième partie présente deux MPAs et un réseau antennaire avec éléments pour les communications cubesatellitaires sur les bandes X et Ku. Le réseau antennaire proposé offre un gain de 11,3 dB à 8,2 GHz et convient aux CubeSats 3U. Cette partie présente la première génération de métasurface avec une antenne source sur une très petite surface de 12,85 mm × 12,63 mm. Le MPA proposé avec MSS donne un gain élevé de 6 dBi et une bonne adaptation d'impédance en bande X. Cela est dû au fait que le MSS redirige le lobe arrière du diagramme de rayonnement vers l'avant, ce qui entraîne une amélioration du gain à la fréquence de fonctionnement souhaitée.

Le cinquième partie présente la conception et l'analyse de deux antennes à fente avec MSS et alimentées par des guide d'ondes coplanaires utilisées sur des CubeSats 3U à une fréquence de fonctionnement de 2450 MHz. Les résultats obtenus montrent que la deuxième antenne proposée atteint un gain élevé de 10,7 dB et une bande passante de 109 MHz. De plus, cette antenne offre le meilleur gain en bande S avec une taille adaptée à toute configuration cubesatellitaire.

Toutes les antennes proposées sont de petite taille et ne nécessitent pas de mécanisme de déploiement. Ils réalisent des gains élevés et ont des tailles physiques adaptées à la configuration cubesatellitaire de type 3U.

Perspectives de travaux futurs

Conception d’une antenne à fente avec MSS qui convient au moins à une structure 3U et offre un gain à 2450 MHz adaptée aux applications de CubeSat dans l'espace lointain.

Conception d’un réseau antennaire avec un système d’alimentation intelligent pour les applications des Essaims

Représentation mathématique permettant de définir les exigences de conception des antennes pour tous les éléments d'essaim conformément aux liens inter-essaims.

Proposer un numéro spécial sur la conception des antennes avec Metasurface et Métamatériaux pour les communications de CubeSat dans une revue internationale.

Références

[1] University of Wollongong (UoW), New South Wales, Australia: https://www.uow.edu.au/, accessed 01 October 2019.

[2] M. El Bakkali; Y. El Gholb; A. Mounssef; I. Tabakh; and N. El Amrani El Idrissi; A G-shaped antenna with parasitic element for 5G Applications; 2017 4th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Rabat, Morocco, November 2017; pp. 1-4.

[3] U.S. Modani, A. Garhwal, Design and Fabrication of a Compact G-shaped Dual Band Antenna for WLAN/Wi-MAX and RFID Applications International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol. 8, Issue 3, March-2017

[4] M. El Bakkali, Y. El Gholb, I. Tabakh, A. Mounssef, N. A. El Idrissi, A 28 GHz Rectangular Patch Antenna with Parasitic Element for Small Satellite Applications, the 2nd International Conference on Computing and Wirless Communication Systems (ICCWCS'17), Larache, Morocco, pp. 1−5, November 2017.

[5] W. Ahmad, A. Ali, and W. T. Khan, Small form factor PIFA antenna design at 28 GHz for 5G applications, 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, PR, USA, pp. 1747-1748, 2016.

[6] M. El Bakkali, G. S. Gaba, F. Tubbal, L. Kansal, N. A. El Idrissi, "Analysis and Optimization of a Very Compact MPA with Parasitic Elements for Inter-Swarm of CubeSats Communications," in Communications in Computer and Information Science, Springer, Singapore, vol. 1076, pp. 128 – 143, September 2019, (ISSN=1865-0929), Doi: 10.1007/978-981-15-0111-1_13.

[6] Ramos, T. Varum, J.N. Matos, Compact Multilayer Yagi-Uda Based Antenna for IoT/5G Sensors, Sensors 2018, 18, 2914.

[7] S. Zhang, I. Syrytsin, and G. F. Pedersen, Compact Beam-Steerable Antenna Array With Two Passive Parasitic Elements for 5G Mobile Terminals at 28 GHz, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 10, pp. 5193-5203, Oct. 2018

[8] M. Jusoh, T. Sabapathy, M. F. Jamlos, M.R. Kamarudin, Reconfigurable four-parasitic-elements patch antenna for high-gain beam switching application, IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 13, pp. 79-82, 2014,

[9] Y. Hong, and J. Choi, 60 GHz Patch Antenna Array with Parasitic Elements for Smart Glasses, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 7, pp. 1252-1256, July 2018

[10] D. Pinchera, M. Lucido, M.D. Migliore, F. Schettino, G. Panariello, Experimental Characterization of a Dual-Polarised Parasitic Patch Antenna. Electronics 2017, 6, 108,

[11] M. El Bakkali, N. A. El Idrissi, F. Em. Tubbal, and G. S. Gaba, Optimum design of a triband MPA with parasitic elements for CubeSat communications using Genetic Algorithm; the 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Marrakesh, Morocco, October 2018; pp. 1-4.

[12] M. El Bakkali, F. Tubbal, G. S. Gaba, L. Kansal, N. A. El Idrissi, "Low-Profile Patch Antenna with Parasitic Elements for CubeSat Applications," in Communications in

Computer and Information Science, Springer, Singapore, vol. 1076, pp. 116 – 127, September 2019, ISSN=1865-0929, DOI: 10.1007/978-981-15-0111-1_12.

[13] M. El Bakkali, G. S. Gaba, F. Em. Tubbal, N. A. El Idrissi, High Gain Patch Antenna Array with parasitic elements for CubeSat Applications, the 1st InCAP 2018, Hyderabad, India, December 2018; pp. 1-5.

[14] Mohamed El Bakkali, Faisel Tubbal, Gurjot Singh Gaba, Lavish Kansal, Najiba El Amrani El Idrissi, "High Gain Miniaturized MPA with MSS for FemtoSat Communications," in Communications in Computer and Information Science, Springer, Singapore, vol. 1076, pp. 357 – 369, September 2019. {CCIS, ISSN=1865-0929};

[15] M. El Bakkali, F. Tubbal, G. S. Gaba, L. Kansal, N. A. El Idrissi, S-Band CPW-Fed Slot Antenna with 2D Metamaterials for CubeSat Communications, in Communications in Computer and Information Science, Springer, Singapore, vol. 1076, pp. 344 – 356, September 2019.

[16] M. El Bakkali, F. Tubbal, R. Raad, P. I. Theoharis, M. S. Raheel, N. A. El Idrissi, Saeid Iranmanesh and Suhila Abulgasem, A Novel High Gain CPW-Feed Circular Slot Antenna with MSS for 3U CubeSats, in TSSA 2019, Bali, Indonesia, pp. 3 – 4, October 2019.

[17] F. Em. Tubbal, R. Raad, K.-W. Chin, L. Matekovits, B. Butters, G. Dassano, A high gain S-band slot antenna with MSS for CubeSat, Annals of Telecommunications, pp. 1-15, 09 November 2018.

[18] L. d. S. Paiva, J. P. da Silva, A. L. P. d. S. Campos, and H. Dionísio de Andrade, Using metasurface structures as signal polarisers in microstrip antennas, IET Microwaves, Antennas Propagation, vol.13, n. 1, 2019, pp.23-27, doi:10.1049/iet-map.2018.5112,

[19] S. Chaimool, T. Hongnara, C. Rakluea, P. Akkaraekthalin, and Y. Zhao, Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications, International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2019, pp. 1-7, 2019, 72163224.

[20] H. Naqvi and S. Lim, Microfluidically Polarization-Switchable Metasurfaced Antenna, in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 12, pp. 2255-2259, Dec. 2018.

[21] X. Liu, D. R. Jackson, J. Chen, J. Liu, P. W. Fink, G. Y. Lin, and N. Neveu, Transparent and Nontransparent Microstrip Antennas on a CubeSat: Novel low-profile antennas for CubeSats improve mission reliability, in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 59, no. 2, pp. 59-68, April 2017.

[22] Y. Yao, S. Liao, J. Wang, K. Xue, E. A. Balfour, and Y. Luo, A new patch antenna designed for CubeSat: Dual feed, l/s dual-band stacked, and circularly polarized." IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 58, no. 3, pp. 16{21, June 2016.

[23] F. Y. Zulkifli, N. A. Saputro, B. Basari, E. T. Rahardjo, Left-Handed Metamaterial (LHM) Structure Stacked on a Two-Element Microstrip Antennas Array, IJTech, vol.7, n. 4, 2016, pp. 683-690.