

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER

FILIÈRE : TÉLÉCOMMUNICATION

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

- **Amrouche Soumaya**
- **Benmenni Soumaya**

Intitulé

Conception d'une antenne réseau réflecteur (Reflectarray)

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Établissement</i>
<i>M. Messaoudene Idris</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belazzoug Massinissa</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme Lakhlef Nora</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année universitaire 2022/2023

Contenu

Contenu	3
Listes des figures	7
Listes des tableaux	7
Listes des abréviations	8
Résumé	9
Abstrats	10
ملخص	10
<i>Introduction générale</i>	
Introduction Générale	12
<i>Chapitre 1 : Généralité sur L'Antenne à base d'un réseau réflecteur (Reflectarray)</i>	
I.1. Introduction	13
I.2. Vue d'ensemble des antennes réflectrices.....	124
I.3. Description des antennes à réflecteurs	134
I.4. Avantages et inconvénients des Reflectarrays	145
I.5. Aperçu des techniques d'analyse	147
I.6. Reflectarray multibande.....	18
I.6.1 Reflectarray monocouche à double bande avec éléments entrelacés	18
I.6.2 Reflectarray à double bande et à double couche avec éléments empilés...	19
I.6.3 Reflectarray au FSS,.....	20
I.7. Reflectarray monocouche	21
I.8. Analyse et conception des éléments d'antenne réflecteurs	21
I.9. La distribution de phase sur l'ouverture de l'antenne RA	23
I.10. État de l'art sur les antennes à réseau réflecteur	31
I.11. Conclusion	32
<i>Chapitre 2 : Conception d'antenne à base d'un réseau réflecteur (Reflectarray)</i>	
II.1. Introduction	33
II.2. Conception et analyse des éléments.....	33

II.2.1	Conception des éléments.....	34
II.2.2	Analyse Des Caractéristiques	35
II.3.	Résultats du Réflecteur proposé et Discussions	37
II.3.1	Prototype d'antenne et ses propriétés de rayonnement	39
II.4.	Procédure de conception	40
II.5.	Les différentes étapes de la validation et nos contributions	40
II.5.1	Validation de l'article [23]	41
II.6.	Conception des antennes reflectarrays à l'aide de Matlab	42
II.7.	Résultats et simulation de Matlab	43
II.8.	Conception des antennes reflectarrays manuellement	44
II.9.	Résultats et simulation de validation.....	46
II.10.	Antenne a réseau réflecteur en utilisant cellule patch biconcave monocouche intégrée avec fentes en forme L inversées	46
II.10.1	Géométrie de l'antenne en utilisant cellule patch biconcave	46
II.10.2	Dimensions de la cellule patch biconcave	47
II.10.3	Forme du patch biconcave	47
II.11.	Résultats de simulations d'une cellule patch biconcave.....	48
II.12.	Conception d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch biconcave ..	49
II.13.	Résultats issus des simulation d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch biconcave	51
II.14.	Antenne a réseau réflecteur en utilisant cellule patch hexagonale monocouche intégrée avec fentes en forme L inversées	51
II.14.1	Géométrie de l'antenne en utilisant cellule patch hexagonale.....	52
II.14.2	Dimensions de la cellule patch hexagonale	52
II.14.3	Forme du patch hexagonale	52
II.15.	Résultats de simulations d'une cellule patch hexagonale.....	53
II.16.	Conception d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch hexagonale	53
II.17.	Résultats et simulation d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch hexagonale	55
II.18.	Conclusion	55
<i>Conclusion générale</i>		
	Conclusion Générale	56
	BIBLIOGRAPHIE.....	59

Listes des figures :

Chapitre 1 :

Figure I.1 : Configuration d'une antenne Reflectarray.	14
Figure I.2 : Vue schématique du réflectarray	18
Figure I.3 : Configuration de l'antenne à double réflecteur proposée	19
Figure I.4 : schéma du réseau réflecteur soutenu par le FSS.	20
Figure I.5 : Un modèle typique d'une antenne RA.	21
Figure I.6 : Une antenne RA et son antenne d'alimentation.	22
Figure I.7 : « boîte » d'échantillonnage sur le terrain définie dans HFSS afin d'extraire (a). Les champs complexes de l'aliment, et (b). Les champs dispersés complexes du sous-réseau.	23
Figure I.8 : La phase de réflexion par rapport à la taille de l'élément calculée à 30 GHz avec inc comme paramètre, pour les éléments de demi-longueur d'onde.	24
Figure I.9 : La phase de réflexion par rapport à la taille de l'élément calculée à 30 GHz avec inc comme paramètre, pour les éléments de sous-longueur d'onde.	24
Figure I.10 : Graphiques de la phase de réflexion par rapport à la taille de l'élément calculée à 28 GHz pour le scénario TM (inc Variation dans le plan $x-z$).	24
Figure I.11 : Distribution du courant de simulation à la surface de la structure de l'élément à (a) 10 GHz et (b) 22 GHz.	26
Figure I.12 : Effet du couplage sur la réponse de phase de l'élément (a) Réponse de phase à 10 GHz pour différents L et (b) Réponse de phase à 22 GHz pour différents $L2CL3$	26
Figure I.13 : Déplacement de phase de simulation de l'élément à différents angles d'incidence obliques à (a) 10 GHz et (b) 22 GHz.	26
Figure I.14 : La structure de l'élément proposé.	27
Figure I.15 : Phases de réflexion contre PL1 pour l'élément dipôle croisé uniquement	27
Figure I.16 : Phases de réflexion par rapport à PL1 pour LR1 à 7,5 GHz.	27
Figure I.17 : Prototype assemblé du TA 6400.	28
Figure I.18 : Diagrammes de rayonnement co-polarisés et croisés simulés et mesurés du prototype TA 6400 : (a) 145 GHz, plan E ; (b) 145 GHz plans H ; (c) 150 GHz plan E, (d) 150 GHz plan H ; (e) 160 GHz plan E, (f) 160 GHz plan H.	28

Figure I.19 : Quelques configurations de réseaux réflecteurs (a) réseau réflecteur à Conducteur complet (b) réseau réflecteur DRA.	29
Figure I.20 : Phase de réflexion et amplitude de réflexion de l'élément fractal.	30
Figure I.21 : Géométrie du réseau de réflecteurs et système de coordonnées utilisés dans cette analyse.	31
Figure I.22 : Comparaison des diagrammes de rayonnement en champ lointain prédits.	31
Chapitre 2 :	
Figure II.1 : Interface graphique de CST.	34
Figure II.2 : (a) Géométrie de la conception de cellule unitaire proposée. (b) Réglage de la longueur de fente L pour variation de phase.	35
Figure II.3 : Courbes de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz pour W1 différent de l'élément	35
Figure II. 4 : Courbes d'amplitude et phase de réflexion par rapport à L à 10 GHz.	36
Figure II. 5 : (a) Disposition conventionnelle des éléments. (b) Disposition proposée des éléments.	37
Figure II. 6 : Distributions de courant de l'élément original et de l'élément réfléchi à 10 GHz.	37
Figure II. 7 : Diagrammes normalisés simulés du réseau réflecteur avec des dispositions d'éléments conventionnelles et proposées à 10 GHz et les dispositions d'éléments proposées à 10 GHz.	37
Figure II.8 : Prototype du réseau réflecteur proposé.	38
Figure II.9 : Modèles normalisés simulés et mesurés du réseau réflecteur proposé à 10 GHz proposés à 10 GHz (a) Plan E et (b) Plan H.	38
Figure II.10 : Diagrammes mesurés dans les plans E et H du réseau de réflexion proposé à différentes fréquences. À différentes fréquences. (a) Diagrammes Co-Pol du plan E. (b). (c) Diagrammes Co-Pol du plan H. (d) Diagrammes X-Pol du plan H.	39
Figure II.11 : Gain mesuré et efficacité d'ouverture du Reflectarray proposé.	39
Figure II.12 : Structure cellulaire de l'unité conçue.	40
Figure II.13 : Courbes de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz pour différents W1 de l'élément.	41
Figure II.14 : Outil de conception Reflectarray.	42
Figure II.15 : Première structure de l'antenne proposée.	42
Figure II.16 : La configuration d'antenne à cornet rectangulaire.	43

Figure II.17 : Deuxième configuration (conception des antennes Reflectarrays manuelle).....	44
Figure II.18 : La configuration d'antenne avec une nouvelle valeur de fréquence 10 GHz.	44
Figure II.19 : Le faisceau rayonné par l'antenne réflectrice de 23x23 éléments.	45
Figure II.20 : Modèles normalisés simulés du Reflectarray avec des arrangements conventionnels et des éléments proposés à 10 GHz.....	45
Figure II.21 : Modèles mesurés de plan E et de plan H du Reflectarray proposé à diverses fréquences. (a) Modèles de co-Pol de plan E. (b) E-plane X-Pol patterns. (c) H-plane co-Pol patterns. (d) H-plane X-Pol patterns.	46
Figure II.22 : Structure cellulaire de l'unité conçue en 3D.	47
Figure II.23 : Courbe de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz.	48
Figure II.24 : conception des antennes Reflectarrays.	48
Figure II.25 : Configuration d'antenne avec une nouvelle valeur de fréquence 10 GHz.	49
Figure II.26 : Disposition proposée des éléments.	49
Figure II.27 : Le faisceau rayonné par l'antenne réflectrice de proposition de 23x23 éléments.	50
Figure II.28 : Modèles normalisés simulés du Reflectarray avec des arrangements conventionnels et des éléments proposés à 10 GHz.....	50
Figure II.29 : Modèles mesurés de plan E et de plan H du Reflectarray proposé à diverses fréquences. (a) Modèles de co-Pol de plan E. (b) E-plane X-Pol patterns. (c) H-plane co-Pol patterns. (d) H-plane X-Pol patterns.	51
Figure II.30 : Une structure d'unité cellulaire conçue en 3 D.....	52
Figure II. 31 : Courbe de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz.	53
Figure II.32 : Configuration d'antenne avec valeur de fréquence 10 GHz.....	53
Figure II.33 : Disposition proposée des éléments.	54
Figure II.34 : Le faisceau rayonné par l'antenne réflectrice de 23x23 éléments.	54
Figure II.35 : Courbe de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz.	54
Figure II.36 : Modèles mesurés de plan E et de plan H du Reflectarray proposé à une seule fréquence. (a) Modèles de co-Pol de plan E. (b) E-plane X-Pol patterns. (c) H-	

plane co-Pol patterns. (d) H-plane X-Pol patterns.55

Liste des tableaux :

Tableau II. 1 : Paramètres de Géométrie de L'élément proposé41

Tableau II. 2 : Paramètres de Géométrie de L'élément proposé47

Tableau II. 3 : Paramètres de Géométrie de L'élément proposé52

Liste des Abréviations :

CPU : Central Processing Unit

CST : Computer Simulation Technologie

DRA : Résonateur diélectrique Antenne

FDTD : Finite Difference Time Domain

FEM : Finite Element Method

FSS : Surfaces sélectives en fréquence

HFSS : High Frequency Structure Simulator

RA : Réseau réflecteur (Reflectarray)

RSP: Retard Spatial De Phase

MoM: Method of Moments

SMCG: Sparse-Matrix Canonical Grid

CBFs: Characteristic Basis Functions

TDF: Temps de Déphasage Final

Résumé

Une antenne à réseau réflecteur, appelée aussi Reflectarray en Anglais, est une combinaison des deux antennes ; un réseau de cellules unitaires, conçues avec des déphasages bien spécifiques, sert à réfléchir l'onde émise par la source d'alimentation afin de former un faisceau dans la direction souhaitée. Le défi principal dans la conception d'une antenne Reflectarray est le nombre de cellules à concevoir, afin de rayonner l'onde incidente avec les phases requises. Plusieurs travaux de recherche ont été rapportés sur l'amélioration des cellules unitaires et leurs caractéristiques de réflexion par l'utilisation d'éléments monocouches, de cellules unitaires, de guides d'ondes et de cellules unitaires par couplage des fentes. Néanmoins, ces cellules nécessitent un processus de fabrication complexe et l'utilisation de matériaux coûteux.

Dans ce travail des nouvelles structures d'antennes à réseau réflecteur utilisant des cellules unitaires correctives de formes géométrique patch biconcave et hexagonale intégrés par des fentes en forme de L inversées.

Les trois formes ont été proposées pour avoir des cellules unitaires avec un intervalle de compensation de phase acceptable. Pour ce faire, une disposition spécifique des éléments est utilisée pour réduire le niveau de polarisation croisée. Finalement, de bons résultats ont obtenus.

Abstract

A reflector array antenna, also called Reflectarray in English, is a combination of the two antennas; a network of unit cells, designed with very specific phase shifts, is used to reflect the wave emitted by the power source to form a beam in the desired direction. The main challenge in designing a Reflectarray antenna is the number of cells to be designed, in order to radiate the incident wave with the required phases. Several research studies have been reported on the improvement of unit cells and their reflection characteristics through the use of single-ply elements, unit cells, waveguides and unit cells by coupling slits. However, these cells require a complex manufacturing process and the use of expensive materials.

In this work new structure of reflector array antennas using corrective unit cells of biconcave and hexagonal geometric patch shapes integrated by inverted L-shaped slots.

The three forms were proposed to have single cells with an acceptable phase compensation interval. To do this, a specific layout of the elements is used to reduce the level of cross-polarization. Finally, good results were achieved. Both shapes have been proposed to have unit cells with an acceptable phase compensation gap. To achieve this, a specific arrangement of elements is used to reduce the level of cross-biasing. Finally, good results were obtained.

ملخص

هوائي مصفوفة عاكسة، ويسمى أيضاً *reflectarray* باللغة الإنجليزية، هو مزيج من الهوائيين؛ وتستخدم شبكة من خلايا الوحدة، مصممة بتحويلات طور محددة جداً، لتعكس الموجة المنبعثة من مصدر الطاقة لتشكيل شعاع في الاتجاه المطلوب. التحدي الرئيسي في تصميم هوائي *reflectarray* هو عدد الخلايا التي سيتم تصميمها، من أجل إشعاع موجة الحادث بالمراحل المطلوبة. تم الإبلاغ عن العديد من الدراسات البحثية حول تحسين خلايا الوحدة وخصائصها الانعكاسية من خلال استخدام عناصر مفردة وخلايا وحدة وأدلة موجية وخلايا وحدة عن طريق اقتران الشقوق. ومع ذلك، تتطلب هذه الخلايا عملية تصنيع معقدة واستخدام مواد باهظة الثمن. في هذا العمل، تم دمج هياكل جديدة من هوائيات المصفوفة العاكسة باستخدام خلايا الوحدة التصحيحية لأشكال التصحيح الهندسية ثنائية الكونكاف والسداسية بواسطة فتحات مقلوبة على شكل حرف L. تم اقتراح الأشكال الثلاثة ليكون لها خلايا واحدة مع فترة تعويض مقبولة للمرحلة. للقيام بذلك، يتم استخدام تخطيط محدد للعناصر لتقليل مستوى الاستقطاب المتبادل. وأخيراً، تحققت نتائج جيدة.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les antennes à réseau réflecteur, appelées reflectarrays, constituent une thématique de recherche active, motivée par leur capacité à combiner les avantages des antennes réseau et des antennes à réflecteur. [1] Un réflecteur est constitué d'une source primaire placée devant un réseau de cellules contrôlant les propriétés du champ réfléchi. Cette source unique alimente le réseau et évite la mise en place d'un circuit de distribution complexe et dissipatif propre aux antennes à réseau réflecteur. Le réseau de cellules permet de réduire la taille de l'antenne par rapport aux antennes à réflecteur.

Une proposition a été faite pour un élément reflectarray utilisant une structure de chargement interdigitale. Cette structure permet à un élément dipôle d'avoir une large plage de phase de réflexion. De plus, toutes les cellules unitaires de cet élément ont la même taille et la phase de réflexion est ajustée en modifiant la longueur des doigts de l'écart interdigital. Cette approche permet d'éviter les variations de géométrie abruptes entre les cellules consécutives, comme on peut l'observer dans les reflectarrays traditionnels. Cependant, il est important de noter que bien que la plage de phases soit étendue, les courbes de phase ne sont pas linéaires et les performances en termes de bande passante de gain ne sont pas mentionnées. Par ailleurs, il est également mentionné un élément reflectarray monocouche qui présente la forme d'un dipôle en forme de L entouré d'un anneau circulaire.

L'objectif de ce mémoire est l'étude des antennes reflectarray en raison de leur caractéristique prometteuse, et également connu pour avoir un inconvénient majeur qui est les performances en bande étroite.

Ce mémoire est structuré en deux chapitres : Le premier chapitre nous allons présenter définitions, généralité, les avantages et inconvénients sans oublier les différents types de réflecteurs on a insisté sur un réseau réflecteur monocouche à double bande qui peut être intégré aux antennes réseaux notamment dans les réseaux 5G et les systèmes de communication par satellite.

Le deuxième chapitre présente la conception et l'analyse des éléments, les résultats du réflecteur proposé, les discussions et la procédure de conception. On commence par les différentes étapes de la validation et nos contributions : conception des antennes reflectarrays à l'aide de Matlab après manuellement. Des études sont menées pour optimiser l'élément pour une courbe de phase linéaire et un

fonctionnement à large bande. Basé sur l'élément proposé, un réflectarray de 529 éléments avec un espacement de grille de 0.3, centré à 10 GHz, est conçu et développé.

Ensuite, on passe à nos conceptions d'antenne à réseau réflecteur en utilisant cellule patch biconcave monocouche intégrée avec fentes en forme L inversées.

Ainsi que, la conception d'antenne à réseau réflecteur en utilisant cellule patch hexagonale monocouche intégrée avec fentes en forme L inversées. Afin d'obtenir les paramètres de rayonnement, courbe de phase de réflexion et modèles mesurés de plan E et de plan H du réflectarray proposé à diverses fréquences.

*Chapitre 1 : Généralité sur L'Antenne à base d'un
réseau réflecteur (Reflectarray)*

I.1. Introduction

Le terme antennes à réseau réflecteur, ou *reflectarray antennas (RA)* en anglais, décrit un groupe de structures de rayonnement qui sont composées d'un certain nombre d'éléments radiants qui reflètent l'énergie provenant d'une ou de plusieurs sources de radiation qui sont suspendues dans l'espace. Cependant, ces antennes avoir un inconvénient majeur qui est leur faible bande passante. De nombreuses recherches ont été faites pour résoudre ce problème.

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, les généralités et description sur les antennes RA, ainsi que leurs inconvénients et avantages. Nous donnerons ensuite un aperçu sur les techniques d'analyse, les différents types de RA. Finalement, nous passerons en revue l'état de l'art en matière d'antennes RA.

I.2. Vue d'ensemble des antennes réflectrices

Le réseau d'antennes est composé de sources de composants réparties sur une surface généralement plane, créant un réseau élémentaire. La capacité de contrôler l'amplitude et la phase de chaque composant permettent de contrôler le rayonnement de l'antenne.

L'antenne RA est composée d'une source primaire qui excite une surface réfléchissante. Elle bénéficie de l'utilisation d'une source unique, car elle réduit les pertes et les coûts de fabrication. [2]

L'inconvénient est la confusion causée par ces caractéristique inhérente tel que la bande passante étroite, la taille d'ouverture et la distance focale, etc. [2-3]

En 1961 le concept des antennes à réseau réflecteur, a été breveté par J. J. S. Duniam. De ce fait, le premier article sur les réseaux réflecteurs a été publié par D. G. Berry en 1963.

Des études ont été menées pour améliorer les performances du réseau réflecteur à l'avenir. Ce réseau est composé de cellules imprimées sur un substrat diélectrique et excitées par une source externe.

L'utilisation d'une source primaire empêche l'installation d'un réseau de distribution compliqué et dissipatif, ce qui est sûrement avantageux pour les performances des antennes RA. Plusieurs méthodes, comme l'ajout de stub microruban ou l'utilisation de patches de taille réglable, peuvent être utilisées pour influencer la phase de réflexion. [2]

I.3. Description des antennes à réseau réflecteur

L'antenne RA est une antenne composée d'une surface réfléchissante plane ou légèrement arrondie et d'une antenne d'alimentation, comme le montre la figure I.1.

Sur la surface réfléchissante, il y a de nombreux éléments rayonnants sans aucune ligne de transmission de division de puissance. En d'autres termes, les phases prédéfinies de tous les éléments sont utilisées pour compenser les différentes phases associées aux différentes longueurs de trajet à partir de l'antenne d'alimentation. Cette opération est similaire à l'utilisation d'un réflecteur parabolique qui utilise sa courbure unique pour réfléchir et former un front de phase planaire lorsqu'une source d'alimentation est placée à son point focal. Il existe plusieurs méthodes pour obtenir un front de phase planaire avec des éléments de réseau de réflexion. L'une d'entre elles consiste à utiliser des patches microstrip identiques auxquels sont attachées des lignes de retard de phase de longueur variable afin de compenser les retards de phase sur les différents trajets à partir de l'excitation. [3]

Éléments D'antenne à Gaine ouverte ou courte

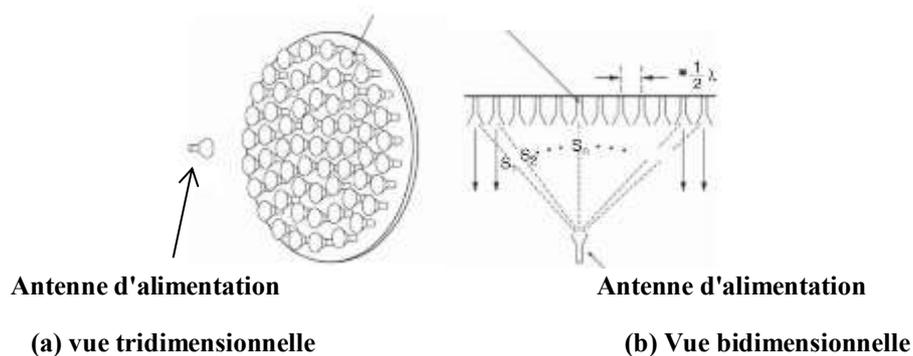


Figure I.1 : Configuration d'une antenne Reflectarray. [3]

I.4. Avantages et inconvénients des Reflectarrays

Il est important de discuter des avantages et des inconvénients des réseaux à réflecteur par rapport aux réseaux d'antennes conventionnelle. En fait, le principal avantage des antennes RA est de simplifier les systèmes d'alimentation des réseaux, car une seule source doit être alimentée. Cela réduit la complexité, les coûts et les pertes par rapport à un réseau d'antennes directement alimenté. De plus, la simplicité accrue des antennes RA permet d'inclure un grand nombre de composants, offrant ainsi une grande liberté dans la conception du maillage général.

L'inconvénient des antennes RA est leur plage de fréquences limitée (bande passante étroite) et la capacité de chaque cellule à compenser les différences de longueur de trajet entre la source principale et chaque cellule. Des techniques alternatives ont été mises en œuvre, telles que l'utilisation de cellules de "véritable temporisation", pour tenir compte des retards de réseau réels et atteindre une bande passante d'environ 10 %.

Un deuxième inconvénient spécifique aux réseaux d'antennes est l'apparition potentielle de lobes de réseau lorsque l'espacement entre les cellules dépasse une demi-longueur d'onde. Cette restriction peut être éliminée en utilisant des réseaux périodiques ou en ajustant l'espacement des cellules en fonction de la fréquence de fonctionnement de l'antenne et de la direction souhaitée.

De plus, la source principale des antennes RA a un effet indésirable sur l'efficacité de l'antenne. Cette limitation, qui est commune aux antennes à réflecteur, est causée par plusieurs facteurs, notamment le débordement - une partie du champ émis par la source sans interférer avec le réseau - et la répartition inégale du champ incident sur le réseau. Placer la source à l'extérieur de la zone de rayonnement est une méthode pour réduire cet effet de masquage. Plus le décalage est important, plus l'intensité du signal provenant de la source et reçu par le réseau est grande. [4]

I.5. Aperçu des techniques d'analyse

Une approche globale pour analyser et concevoir des antennes RA consiste à utiliser des courbes de conception qui relient la phase du champ réfléchi à un paramètre géométrique spécifique de l'élément de RA (unit cell), en supposant une incidence normale. Cette approche suppose que la réponse de phase reste constante

quel que soit l'angle auquel l'onde incidente frappe l'antenne RA. Toutefois, cette hypothèse ne vaut que pour les éléments alimentés au centre du RA, et ne pas être exacte pour les éléments du bord, ou pour les grands angles d'incidence.

La polarisation croisée est un aspect crucial de l'analyse d'antenne RA et doit être prise en compte. La polarisation croisée est principalement causée par les stubs courbés et attachés dans les éléments et par des plaques rectangulaires lorsque l'angle d'incidence s'écarte des plans principaux. Pour calculer la polarisation croisée, le champ incident doit être décomposé en deux composants orthogonaux parallèles à l'antenne RA, et une méthode d'analyse des ondes complètes est utilisée pour calculer le champ réfléchi par chaque élément.

Lors de l'analyse des éléments antennes RA à l'aide de techniques à ondes complètes, il est important de considérer que le champ rayonné est la combinaison du champ réfléchi par les patches et du champ réfléchi par le plan de masse. L'inclusion du deuxième élément est nécessaire dans la méthode d'analyse pour obtenir des résultats précis.

Diverses méthodes numériques peuvent être utilisées pour l'analyse en onde complète des structures périodiques, telles que la méthode des moments (MoM) dans le domaine spectral, la méthode des éléments finis (FEM) et le domaine de temps de différence finie (FDTD). Ces méthodes permettent une analyse et une prédiction précises du comportement antenne RA, en tenant compte de facteurs comme le couplage mutuel entre les éléments et l'épaisseur réelle du conducteur.

Pour les antennes RA avec des patches de taille variable ou des éléments avec des stubs de longueurs différentes, l'approche de la matrice infinie peut être utilisée. Cette approche considère une cellule périodique et intègre automatiquement le couplage mutuel entre les éléments.

Plusieurs techniques de calcul ont été proposées pour analyser efficacement et avec précision les antennes RA, y compris la méthode Sparse-Matrix Canonical Grid (SMCG), les fonctions de base caractéristique (CBFs) et les méthodes intégrales adaptatives. Ces techniques réduisent le temps de calcul et produisent des résultats précis.

Les outils logiciels commerciaux peuvent également être utilisés pour l'analyse et la conception des antennes RA, mais ils peuvent avoir des limites en termes d'efficacité informatique et d'intégration avec les routines d'optimisation.

En conclusion, la méthode des moments dans le domaine spectral avec périodicité locale est un choix privilégié pour une analyse efficace et précise des antennes RA. Cependant, d'autres techniques et méthodes numériques peuvent être utilisées en fonction des exigences spécifiques et de la complexité de la conception d'antenne RA. [3]

I.6. Antenne à réseau réflecteur multibande

Lors de la conception d'un RA multibande, il est important de choisir les composants réflecteurs en fonction de leur bande de fonctionnements. Ces composants peuvent être disposés de manière périodique sur la même couche ou sur des couches séparées. [5-6]

Une autre option pour créer des structures réfléchissantes multibandes consiste à remplacer le plan de masse par un FSS, puis à construire soigneusement un réseau de réflexion en cascade. [7-8]

En résumé, il existe différentes options pour créer des structures réfléchissantes multibandes qui dépendent des exigences de la bande passante et des contraintes de conception. Le choix des composants, la disposition et l'arrangement des couches dépendent des spécifications du système et des performances souhaitées.

I.6.1 RA monocouche à double bande avec éléments entrelacés

Un Reflectarray monocouche à bande double avec éléments entrelacés est un type de dispositif de réflexion d'ondes électromagnétiques. Il est généralement utilisé dans les applications de communication sans fil pour diriger les ondes radiofréquences dans une direction spécifique.

Plus précisément, un Reflectarray monocouche est une structure de surface plane composée d'une grille de petits éléments métalliques qui réfléchissent les ondes incidentes, comme illustré dans la figure I.2. Les éléments entrelacés sont disposés de manière à créer une réponse en phase pour les deux bandes de fréquences.

La double bande fait référence à la capacité du dispositif à traiter et refléter deux bandes de fréquences différentes [9]

Lors de l'utilisation des éléments entrelacés, le Reflectarray monocouche peut offrir une efficacité de réflexion plus élevée que les autres types d'antennes, tout en étant plus légère et plus facile à fabriquer. Ces avantages en font un choix populaire pour les applications de communication sans fil, notamment dans les réseaux 5G et les systèmes de communication par satellite.

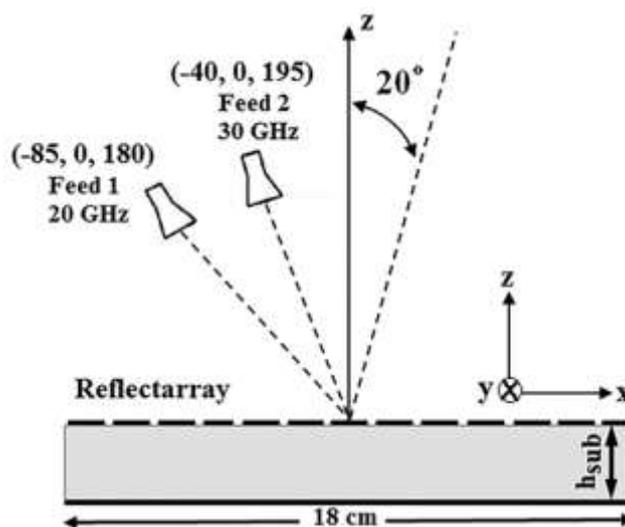


Figure I.2 : Vue schématique du d'antenne RA. [10]

I.6.2 RA à double bande et à double couche avec éléments empilés

Un RA à double bande et à double couche avec éléments empilés, tel qu'illustré dans la figure I.3, est une antenne à commande de phase qui permet de réfléchir les ondes électromagnétiques dans deux bandes de fréquence différentes en utilisant des éléments rayonnants empilés sur deux couches de substrats diélectriques. [6]

Les éléments rayonnants sont disposés de manière à produire une variation de phase continue qui permet de focaliser le faisceau dans une direction spécifique. La conception à double couche permet d'optimiser l'efficacité de la réflexion dans chaque bande de fréquence en utilisant des substrats de différentes épaisseurs pour chaque

couche. Ce type de Reflectarray est largement utilisé dans les applications de communication par satellite où des performances élevées en termes de gain, de directivité, et de bande passante. [11]

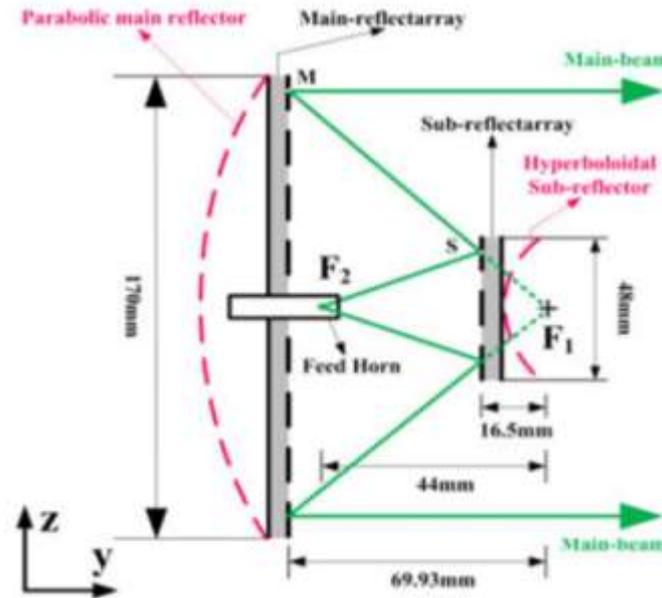


Figure I.3 : Configuration de l'antenne à double réflecteur proposée. [11]

I.6.3 Reflectarray au FSS,

Un Reflectarray intégré avec une structure FSS (Frequency Selective Surface) est un type de Reflectarray qui utilise un FSS à l'arrière des éléments de Reflectarray pour améliorer les performances de réflexion dans une bande de fréquence donnée. Le FSS est une structure périodique qui permet de filtrer les ondes électromagnétiques dans une plage de fréquences spécifiques, tout en laissant passer les ondes en dehors de cette plage de fréquences.

Dans ce cas, la structure FSS est placée à l'arrière des éléments de Reflectarray, et peut être conçue pour réduire la diffraction des ondes électromagnétiques hors la bande de fréquences de résonance. De plus, la structure FSS peut être utilisée pour ajuster les propriétés de polarisation du Reflectarray. [7–8]

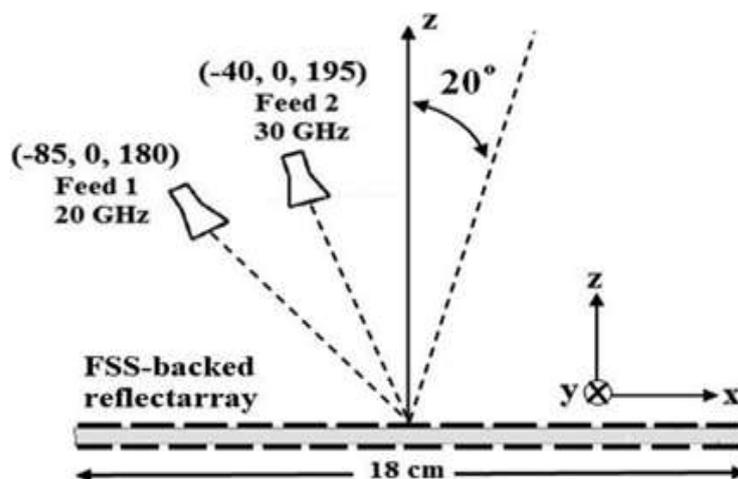


Figure I.4 : Schématisation d'antenne RA soutenue par le FSS. [7]

I.7. Reflectarray monocouche

Les techniques à large bande pour les antennes RA sont des méthodes qui permettent d'élargir la plage de fréquences de fonctionnement des antennes RA.

Il existe plusieurs approches possibles pour atteindre cet objectif, regroupées en deux grandes catégories : les méthodes basées sur la structure de la surface des réflecteurs, et les méthodes basées sur la conception d'antenne RA. [13]

Les méthodes basées sur la structure de la surface de réfléchissante peuvent inclure l'utilisation de matériaux diélectriques spécifiques, la modification de la forme ou de la taille des réflecteurs, ou la conception de réflecteurs multicouches. Par exemple, l'utilisation de matériaux diélectriques à haute permittivité peut permettre d'augmenter la longueur d'onde de résonance des réflecteurs, ce qui peut élargir la bande passante. De même, la modification de la forme ou de la taille des réflecteurs peut modifier les modes de résonance des réflecteurs et ainsi élargir la bande passante.

Enfin, la conception de réflecteurs multicouches peut permettre d'utiliser plusieurs couches de matériaux diélectriques à différentes permittivités pour élargir la bande passante. [14]

Par conséquent, ces techniques sont importantes pour de nombreuses applications, notamment la conception de RA non uniformes. Elles permettent de modifier les propriétés de diffusion des réflecteurs, ce qui élargit la bande passante. Par exemple, une antenne à RA non uniformes a été développée pour une application de radar, avec une plage de fréquences de 50%. Cet exemple démontre que ces techniques peuvent être utilisées dans divers domaines tels que la communication par satellite, le radar, la télémétrie et d'autres domaines de l'électronique. Les méthodes utilisées peuvent varier considérablement, allant de la modification de la structure de

la surface des réflecteurs à la conception d'antenne RA en passant par l'utilisation de matériaux diélectriques spécifiques.

I.8. Analyse et conception des éléments d'antenne réflecteurs

Une antenne RA est composée d'un ensemble d'éléments qui sont excités par une antenne d'alimentation. La figure I.5 représente un modèle courant d'une antenne RA. Chaque composant est conçu pour réfléchir une onde avec une phase spécifique lorsqu'il est excité par l'antenne d'alimentation. Ensuite, la distribution des phases sur l'ouverture de l'antenne aux réflecteurs est synthétisée pour que l'antenne puisse transmettre un faisceau dans la direction désirée. L'analyse et la conception des composants de l'antenne à réflecteurs sont cruciales.

La conception d'une antenne RA nécessite deux étapes essentielles : la conception des composants individuels puis la conception de l'antenne dans son ensemble. [2]

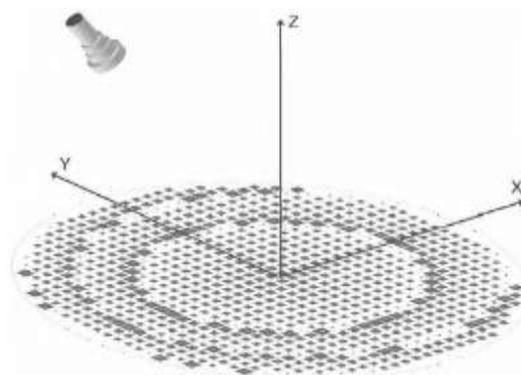


Figure I.5 : Un modèle typique d'une antenne RA. [2]

I.9. La distribution de phase sur l'ouverture de l'antenne RA

Une distribution uniforme des phases sur l'ouverture dans les réseaux d'antennes planaires classiques produit un faisceau focal avec un rayonnement transversal typique à l'antenne. Pour que les éléments orientent le faisceau dans une direction particulière, il est essentiel d'avoir une distribution précise de la phase [2]. En ce qui concerne les antennes RA, la position de l'antenne d'alimentation est également cruciale. L'antenne d'alimentation est positionnée par rapport à l'antenne RA, comme indiqué dans la figure I.6.

En général, les éléments de l'antenne se trouvent dans le champ éloigné de l'antenne d'alimentation, ce qui permet de considérer le champ électromagnétique

présent sur chaque élément comme une onde plane qui excite l'élément avec un certain angle d'incidence. La phase proportionnelle aux champs électromagnétiques à l'ouverture de l'antenne RA.

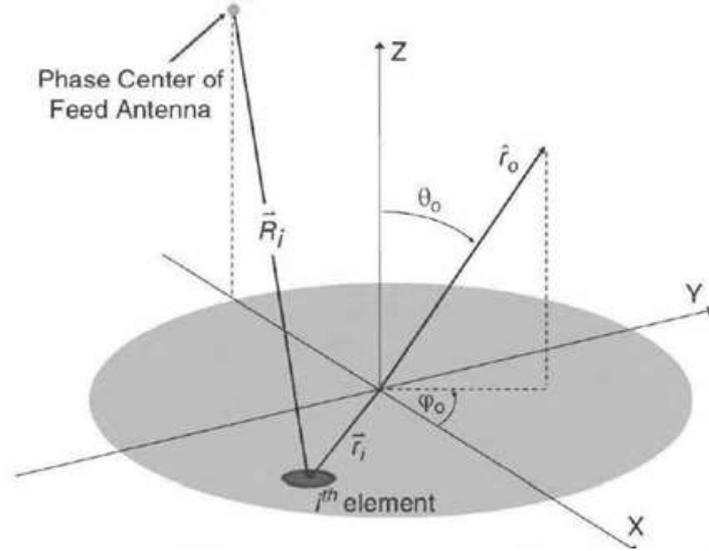


Figure I.6 : Une antenne RA et son antenne d'alimentation. [1]

Les (RSP) d'une onde émise par la source d'alimentation vers un élément RA doivent être compensés par la phase de l'onde réfléchi par cet élément. Mathématiquement, cela est donné par :

$$\Phi_{RSP} = -k_0 R_i \quad (I.1)$$

En utilisant la représentation des coordonnées cartésiennes dans la Figure II.2, la position de chaque élément peut être exprimée comme (x, y) .

Ainsi, pour un faisceau pointé dans une direction spécifique (θ_0, φ) , cette équation peut être simplifiée de la manière suivante :

$$\Phi_{pp} = -k_0 (x_i \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + y_i \sin \theta_0 \sin \varphi_0) \quad (I.2)$$

La combinaison d'un retard de phase spatiale et d'une phase progressive est exprimée par :

$$\Phi_{RA} = k_0 (R_i - (x_i \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + y_i \sin \theta_0 \sin \varphi_0)) \quad (I.3)$$

I.10. État de l'art sur les antennes à réseau réflecteur

Nous allons maintenant examiner quelques travaux antérieurs qui ont été réalisés. Ces travaux constituent une base solide sur laquelle nous pouvons appuyer pour développer nos propres recherches et apporter une contribution originale à notre domaine d'étude.

Dans [16], la recherche s'est concentrée sur la résolution de certains inconvénients persistants, la réévaluation de certains problèmes conceptuels et l'extension des fonctionnalités du réseau réflecteur. Une méthode a été utilisée pour diagnostiquer le fait que les lobes d'alimentation-image apparaissent à des fréquences décroissantes. Il a été découvert que ces lobes sont causés non seulement par l'interaction avec l'air au sol, comme on le croyait initialement, mais aussi par un déséquilibre des courants complexes sur les plaques et l'air au sol à ces fréquences. De plus, cet article étudie l'impact du fait que tous les éléments du RA n'ont pas le même angle d'incidence des champs d'alimentation, contrairement à l'hypothèse généralement formulée lors de l'utilisation de la phase de l'élément du réseau réflecteur par rapport aux données de taille de l'élément.

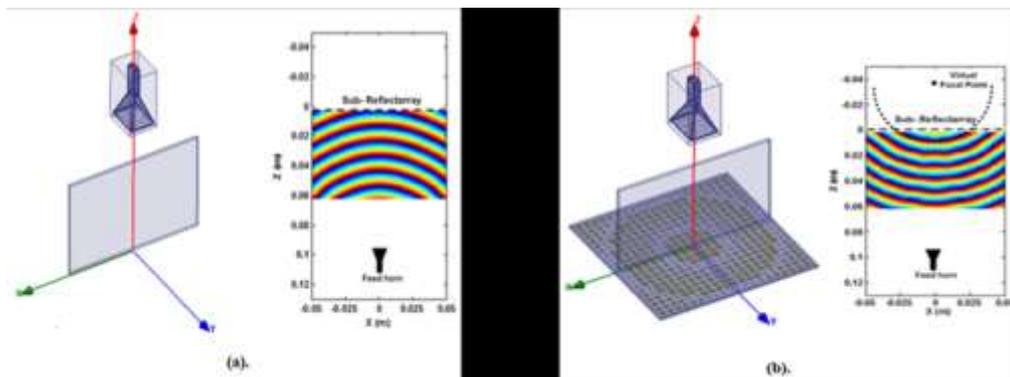


Figure I.7 : (a) Les champs complexes de l'aliment, (b) Les champs dispersés complexes du sous-réseau. [16]

- ✓ Des trous sont présents dans le plan XZ à l'intérieur des conteneurs d'émersion représentés sur les mêmes dessins, et les champs correspondants sont extraits.

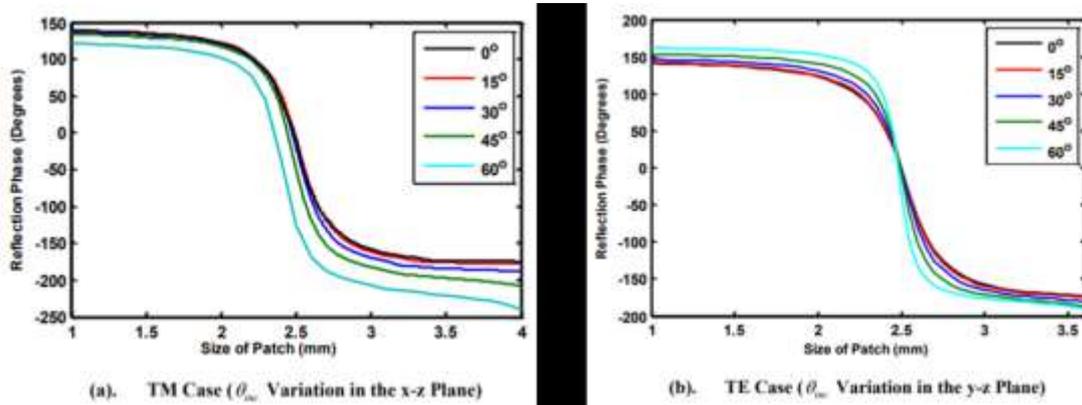


Figure I.8 : Graph de la phase de réflexion par rapport à la taille de l'élément calculée à 30 GHz avec θ_{inc} comme paramètre, pour les éléments de demi-longueur d'onde. [16]

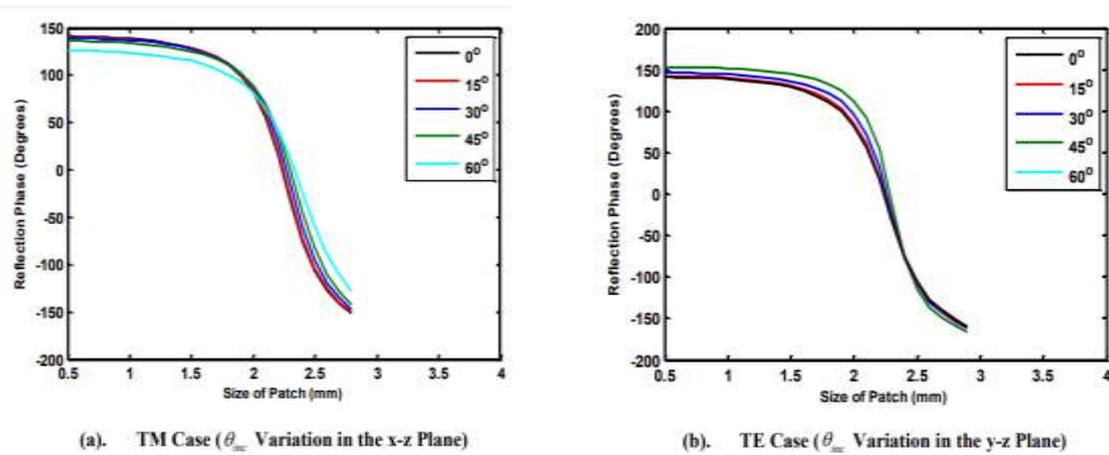


Figure I.9 : Graph de la phase de réflexion par rapport à la taille de l'élément calculée à 30 GHz avec θ_{inc} comme paramètre, pour les éléments de sous-longueur d'onde. [16]

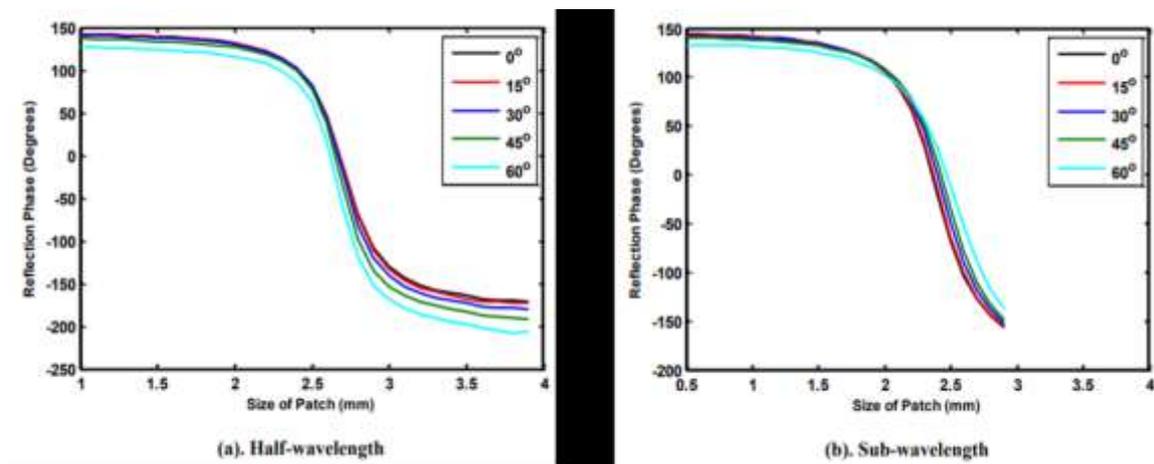


Figure I.10 : Graphiques de la phase de réflexion par rapport à la taille de l'élément calculée à 28 GHz pour le scénario TM (θ_{inc} Variation dans le plan x-z). [16]

- ✓ L'auteur suppose dans la figure I.10 que la valeur dépend beaucoup plus de l'angle d'incidence que dans le cas de la longueur d'onde secondaire.
- ✓ La taille de la cellule unique reste la même pour les éléments fonctionnant dans les gammes de fréquences 28 GHz et 30 GHz, respectivement.

Une base de données des réseaux réflecteurs demi-longueur sur l'axe a été établie et comparée aux concepts de réseaux réflecteurs demi-longueur sur l'axe pour $F/D = 1,0$ et $F/D = 0,5$. Cependant, l'auteur a remarqué que l'antenne RA surpasse la réflexion à mi-longueur d'onde, même lorsque l'angle de changement d'incidence est pris en compte dans ce modèle récent.

L'observation de l'immunité, a été rendue possible grâce à l'incorporation de sous-longueurs d'éléments d'onde dans la conception des sous-réseaux réflecteurs. La performance des sous-longueurs d'onde correspondantes ainsi que celle des demi-longueurs d'onde ont été comparée en étudiant leurs champs dispersés à proximité.

Dans l'article [17], un réflecteur à double couche à large bande avec polarisation orthogonale est conçu. L'antenne RA se présente comme un bon candidat pour les applications de polarisation à double bande à grand rapport.

Il est difficile d'obtenir une distribution des cellules correspondant à de larges bandes pour deux types d'éléments différents, ce qui entraîne des lobes latitudinaux plus élevés et une polarisation croisée plus élevée. Obtenir un simple ratio de grande bande à double bande est difficile car le réseau génère des lobes si la distance entre les éléments à haute fréquence est trop grande.

Le premier cas utilise deux éléments de résonance distincts qui fonctionnent dans différentes bandes sur un substrat diélectrique. Le second cas utilise un substrat diélectrique multicouche, avec les différents composants de résonance fonctionnant sur des bandes séparées situées sur des couches diélectriques distinctes. Dans le premier cas, les différents types d'éléments ont une polarisation indépendante. Par exemple, deux types d'éléments différents sont alternativement répartis dans la conception.

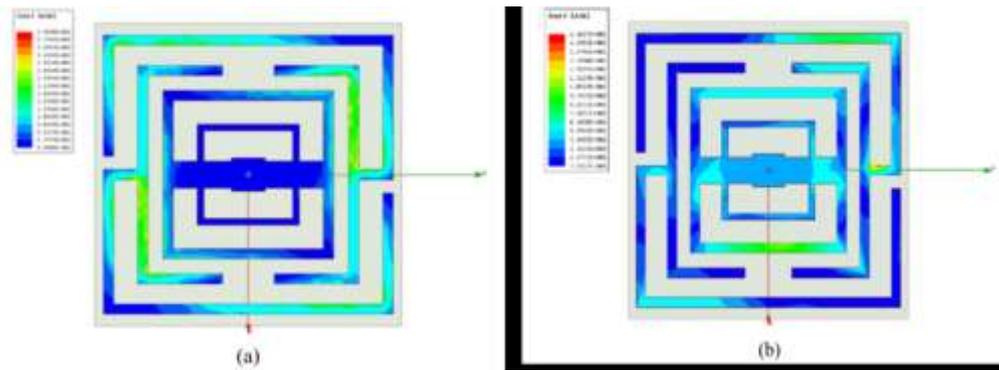


Figure I.11 : Distribution du courant de simulation à la surface de la structure de l'élément à (a) 10 GHz et (b) 22 GHz. [17]

- ✓ La structure externe est constituée d'un cylindre carré divisé en deux lignes carrées de retard de phase. Le décalage de phase dans la bande X est déterminé par la longueur des lignes carrées de retard attachées au cylindre carré divisé.
- ✓ La distribution actuelle de l'élément est principalement concentrée dans la structure interne à 22 GHz et dans la structure externe à 10 GHz, comme le montrent les figures I.11 (a) et (b).

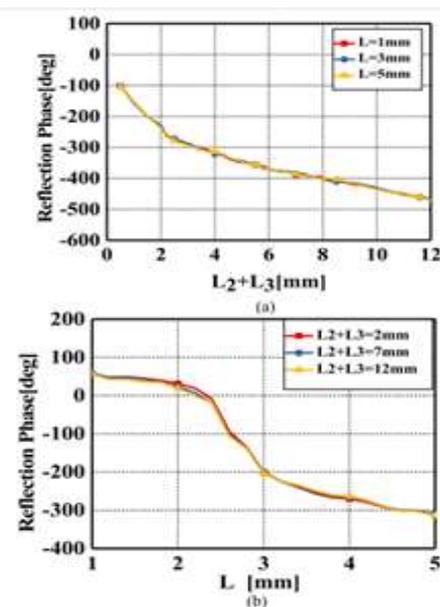


Figure II.12 : Effet du couplage sur la réponse de phase de l'élément (a) Réponse de phase à 10 GHz pour différents L et (b) Réponse de phase à 22 GHz pour différents L2CL3. [17]

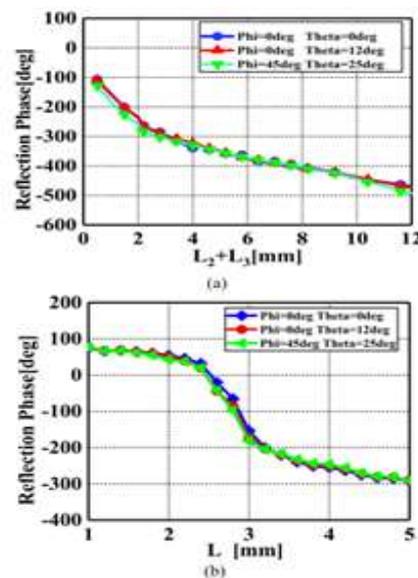


Figure I.13 : Déplacement de phase de simulation de l'élément à différents angles d'incidence obliques à (a) 10 GHz et (b) 22 GHz. [17]

- ✓ Le changement de mesure révèle que les décalages de phase à 10 GHz et 22 GHz sont inférieurs à 9 et 15, respectivement, avec des variations à L2 et L3, respectivement.

- ✓ Ces résultats suggèrent que le brouillage entre les bandes haute et basse peut être négligé.

Dans [18], un nouveau Reflectarray monocouche dans lequel l'élément spiral-dipôle peut atteindre une couverture de 360° en ajustant continuellement le TDF (Temps de Déphasage Final). Les résultats des mesures révèlent un gain de 26,5 dBi à 8 GHz, ce qui équivaut à un gain de 55 dB, avec un gain de 1 dB maintenu dans la bande passante.

La méthode suggérée ajuste en continu les deux degrés de liberté pour obtenir un changement de phase. Cela permet d'obtenir une réponse en phase linéaire et lisse couvrant 360 degrés. En ajoutant quatre recuits rectangulaires autour de dipôles en forme de spirale, il est possible d'obtenir un changement de phase relativement lent. Les différences maximales entre la phase idéale à 6,5 GHz et 9,5 GHz sont respectivement de 20° et 58° , ce qui élargit la bande de fonctionnement.

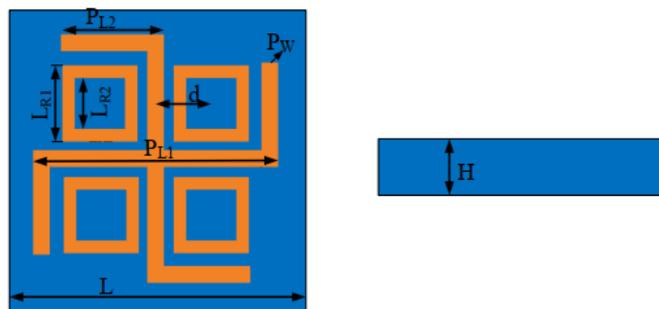


Figure I.14 : La structure de l'élément proposé. [18]

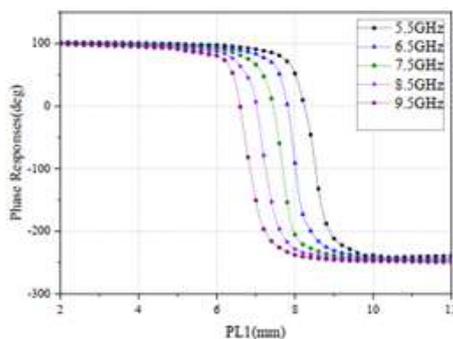


Figure I.15 : Phases de réflexion contre PL1 pour l'élément dipôle croisé uniquement. [18]

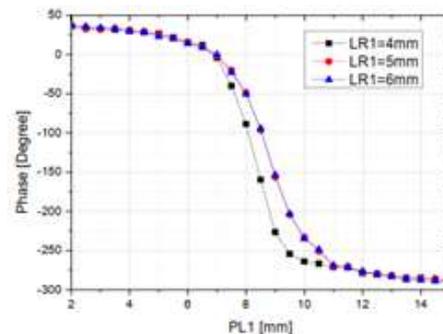


Figure I.16 : Phases de réflexion par rapport à PL1 pour LR1 à 7,5 GHz. [18]

- ✓ La structure ne répond pas aux exigences d'une conception de réseau de réflecteurs hautement efficace, car elle ne peut pas fournir un changement de

phase complet à 360° , comme le montre la figure I.15. Dans la figure I.16, les phases de réflexion par rapport à PL1 sont affichées pour différentes valeurs de LR1.

Dans [19], une description sur les exigences pour les antennes à utiliser avec de petites cellules à "Backhaul". Ce point de départ est crucial pour le développement des solutions d'antennes envisagées, jouant ainsi un rôle central.

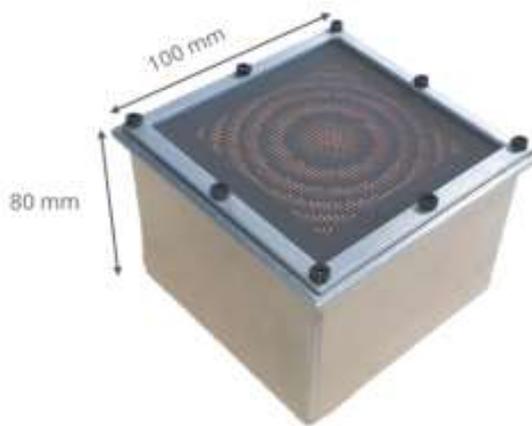


Figure I.17 : Prototype assemblé du TA 6400.
[19]

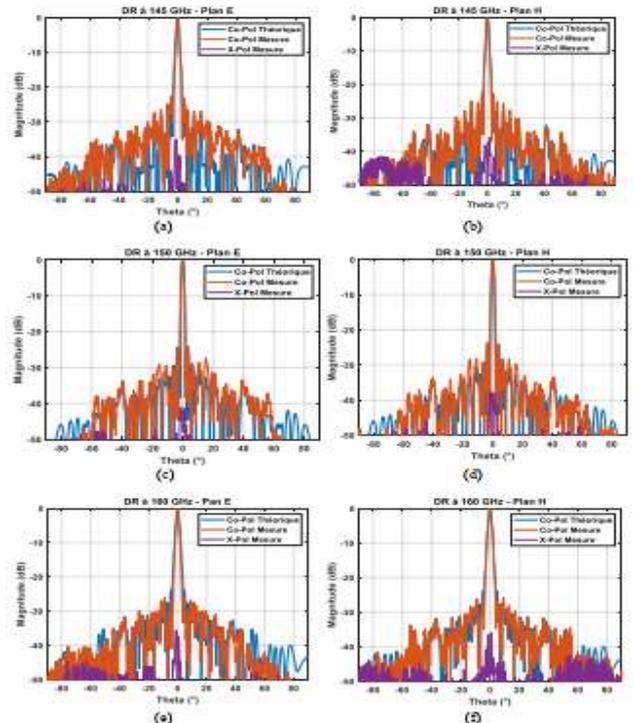


Figure I.18 : Diagrammes de rayonnement co-polarisés et croisés simulés et mesurés du prototype TA 6400 :
(a) 145 GHz, plan E ; (b) 145 GHz plans H ; (c) 150 GHz plan E, (d) 150 GHz plan H ; (e) 160 GHz plan E, (f) 160 GHz plan H. [19]

✓ Les données mesurées démontrent une atténuation constamment inférieure à -13 dB sur l'ensemble de la bande, ce qui correspond à une bande passante supérieure à 30 %.

✓ L'article suit le développement des modèles numériques et présentes les résultats de mesure pour deux antennes. Les caractéristiques de l'antenne comprennent une bande passante de 19,8 %, une variation de gain de -3 dB, un gain maximal de 32 dBi, ainsi qu'une petite différence systématique entre les

niveaux de gain simulés et mesurés, attribuée aux pertes de la source primaire. Sur l'ensemble de la gamme de fréquences, l'antenne présente une bonne adaptation. Les résultats démontrent un bon accord avec les résultats numériques.

Dans [20], les communications de cinquième génération (5G) sont présentées comme une technologie d'avenir qui vise à atteindre des débits environ 1000 fois plus rapides que ceux de la technologie Internet. Différentes bandes de fréquences ont été proposées pour la 5G, allant de 24,25 GHz jusqu'à 86 GHz.

La figure I.19 illustre l'architecture de base d'une antenne à réseau réflecteur avec des éléments rectangulaires.

L'analyse d'une antenne à RA peut être réalisée en utilisant la technique de l'onde plane, où un seul élément du réseau de réflexion peut être considéré comme une cellule unitaire, comme le montre la figure I.19.

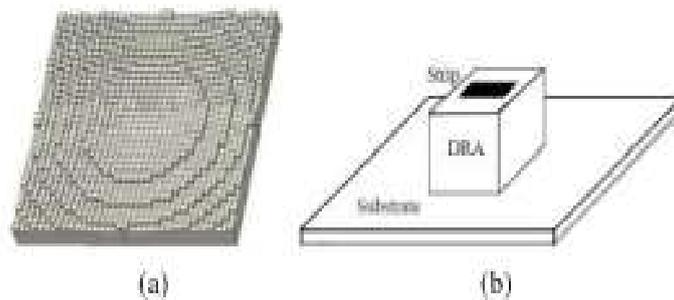


Figure I.19 : Quelques configurations de réseaux réflecteurs (a) réseau réflecteur à conducteur complet (b) réseau réflecteur DRA [20].

Un élément de résonance double hexagonale à couche unique. Sa réponse à la réflexion est décrite à la figure 4 en termes de phase et d'amplitude.

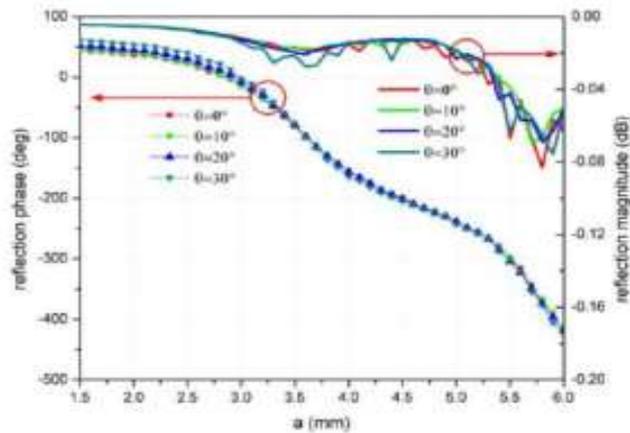


Figure I.20 : Phase de réflexion et amplitude de réflexion de

- ✓ La figure I.20 montre la réponse de réflexion de l'élément fractal en termes de phase et de magnitude.
- ✓ La magnitude de la réflexion confirme la présence d'une double résonance dans l'élément fractal.
- ✓ La réponse de double résonance est responsable de l'extension de la gamme de la phase de réflexion au-delà de 360 degrés.
- ✓ Une largeur de bande de 25,16 % a été obtenue avec un réseau linéaire de 112 éléments composés.

L'examen de plusieurs éléments de conception et d'architecture permet de déterminer s'il est possible d'augmenter la largeur de bande des RA pour les utiliser dans les futurs systèmes avancés.

Le problème fondamental des systèmes de communication 5G est l'augmentation de la sensibilité de conception à haute fréquence, qui peut être étendue en tant qu'opportunité de recherche future potentielle.

Dans [21], les antennes à formation de faisceau aux sont considérées comme une technologie prérequis pour une variété d'applications modernes. Les conceptions prédominantes se présentent sous la forme de structures réfléchissantes, telles que les antennes paraboliques. L'auteur a développé une approche de conception de réseaux réflecteurs qui modélise les patches comme des paires de dipôles à polarisation magnétique, en suivant un modèle de cavité standard de l'antenne à plaque métallique avec un plan de masse.

L'auteur a déterminé les polarisations de chaque patch en appliquant numériquement les principes d'équivalence de surface standard, ainsi qu'en effectuant des mesures expérimentales ou numériques du champ lointain.

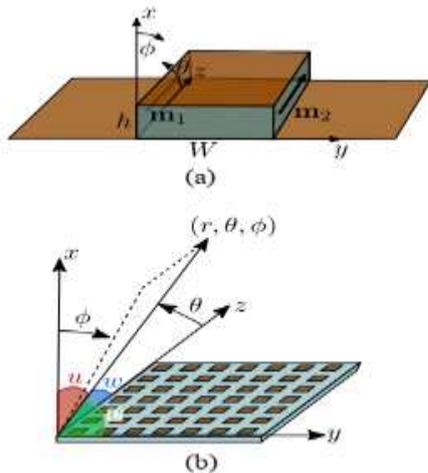


Figure I.21 : Géométrie du réseau de réflecteurs et système de coordonnées utilisés dans cette analyse. [21]

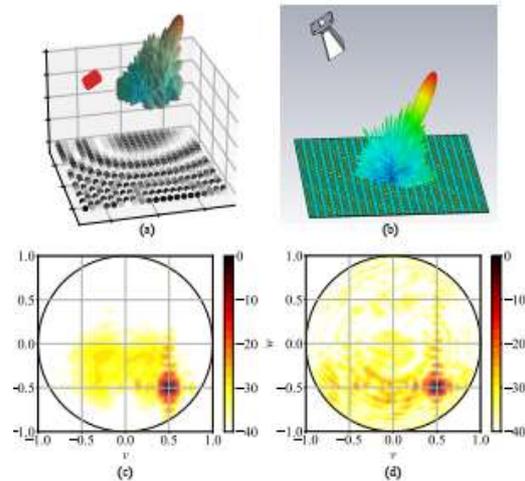


Figure I.22 : Comparaison des diagrammes de rayonnement en champ lointain prédits. [21]

- ✓ La figure I.21 illustre la capacité du modèle de polarisation à concevoir et à modéliser des réseaux réflecteurs à patches.
- ✓ Ce modèle de polarisation présente l'avantage d'avoir une complexité de calcul réduite.
- ✓ Il permet la conception de patches en niveaux de gris en prenant en compte à la fois l'amplitude et la phase des champs d'illumination, ainsi que l'amplitude et la phase des patches eux-mêmes.

À l'aide de ces polarisations récupérées, l'auteur a utilisé une méthode inverse holographique pour spécifier le réseau réflecteur du patch. Cette méthode a été appliquée à la conception d'un réseau réflecteur avec une taille de patch variable et des niveaux de gris, ainsi qu'à celle d'un réseau réflecteur à état binaire.

L'auteur a démontré que cette méthode permet de prédire avec précision les diagrammes de rayonnement, qui correspondent de manière raisonnable aux simulations à ondes complètes.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une introduction générale sur les antennes à réseau réflecteur, en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients. Nous avons également donné un aperçu des techniques d'analyse couramment utilisées pour étudier ces antennes.

Enfin, nous avons abordé spécifiquement les reflectarrays multibandes et les techniques utilisé pour élargir la bande passante. Nous avons discuté des différents aspects de leur conception et des défis qui y sont liés.

Dans le chapitre suivant, on va présenter les étapes de conception et de simulation d'antenne RA. Pour cela, nous utiliserons les outils CST Microwave Studio.

*Chapitre 2 : Conception d'antenne à base d'un réseau
réflecteur (Reflectarray)*

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons particulièrement la conception d'antenne à base d'un réseau réflecteur (antennes RA).

Premièrement, nous avons conçu une cellule unitaire monocouche constituée d'un patch rectangulaire intégrée avec deux fentes (slots) inversées en forme L. Sur la base de l'élément proposé, un réflecteur de 529 (23×23) composants est conçu avec un espacement réseau de 0.3λ , et son centre de 10 GHz.

Deuxièmement, nous abordons les différentes étapes de la validation et nos contributions : la conception des antennes reflectarrays à l'aide de Matlab, suivie d'une phase manuelle. Ensuite, nous passons à nos conceptions d'antennes RA en utilisant des cellules patch biconcaves et hexagonales monocouches intégrées avec des fentes en forme de L. Ces conceptions sont présentées et détaillées dans le chapitre 2. De plus, les résultats des simulations seront présentés en utilisant l'outil de simulation CST MICROWAVE STUDIO.

II.2. Conception et analyse des éléments

Dans cette section, nous décrivons d'abord la conception de l'élément proposé. Par la suite, nous examinons en profondeur ses caractéristiques. [22]

II.2.1 Conception des éléments

La géométrie de cellules unitaires proposée par [22] est illustrée dans la figure II.2(a), imprimé sur un substrat F4BM de 3,175mm avec un constant diélectrique de 2,22 et est soutenu par une base. Le patch comporte une paire de fentes et est espacé de 9 mm dans les axes x et y, respectivement. La taille du patch est $W \times L_1$; est la même pour chaque élément réflecteur, et la longueur L des grilles est ajustée pour changer la phase, comme le montre la figure II. 2 (b). Le changement de la longueur L des fentes, provoque à une résonance de l'élément (cellule unitaire), ce qui traduit une phase de réflexion variable.

Avec cette méthode, il est possible de contourner les éléments dans RA traditionnels pour les réseaux réflecteurs, changements de configuration, pour des changements de configuration rapides et d'obtenir un couplage mutuel presque égal entre les cellules voisines. La cellule est conçue pour une fréquence de 10 GHz, et les simulations sont réalisées à l'aide de CST Microwave Studio, où les conditions en limite sont bornées par le maître-esclave et le port Floquet. [22]

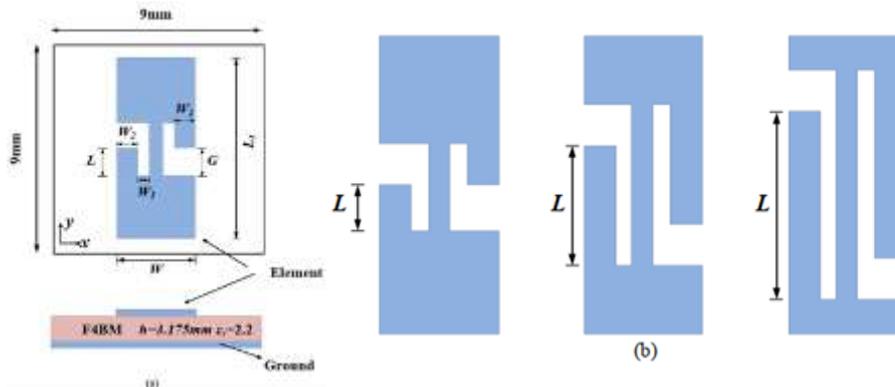


Figure II.2 : (a) Géométrie de la conception de cellule unitaire proposée. (b) Réglage de la longueur de fente L pour variation de phase. [22]

II.2.2 Analyse Des Caractéristiques

Pour obtenir une réponse de phase linéaire et une performance de fréquence large, une étude paramétrique est menée pour optimiser la cellule unitaire. Les simulations considèrent une onde plane polarisée dans la direction y avec une incidence normale. On observe dans la figure II.3, que les dimensions W_1 et W_2 des fentes, la longueur du patch rectangulaire (L_1), et la taille de la cellule unitaire ont le plus grand impact sur les performances de phase réfléchie. La valeur optimale pour W_1 est de 0,5 mm, ce qui donne une réponse de phase linéaire et une plage de phase suffisamment large.

En outre, comme mentionné précédemment, l'utilisation d'éléments de sous-longueur d'onde peut considérablement améliorer la bande passante de gain des RA. Outre l'hypothèse d'une incidence normale, l'étude examine également l'effet de différents angles d'onde incidente sur le rendement de la phase réfléchie. [22]

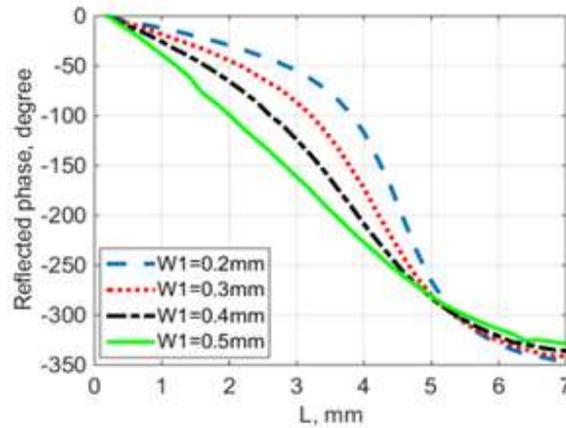


Figure II.3 : Courbes de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz pour W1 différent de l'élément [22]

L'amplitude et la phase de réflexion de l'élément sont simulées à 10 GHz, et leur relation avec la longueur (L) est représentée à la figure II.4. Les résultats démontrent clairement l'atteinte d'une réponse de phase linéaire et d'une magnitude de réflexion élevée. [22]

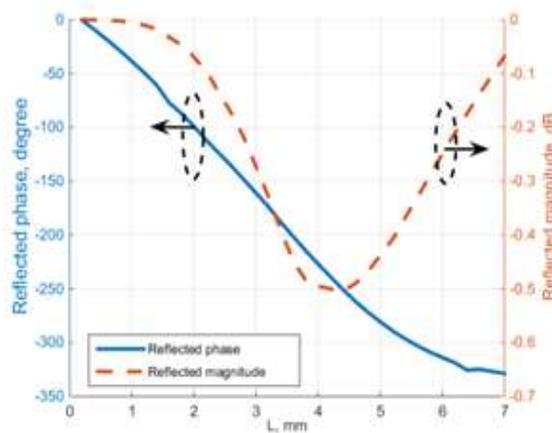


Figure II. 4 : Amplitude de réflexion et courbes de phase par rapport à L de l'élément avec dimensions finales à 10 GHz. [22]

II.3. Résultats et discussions du Réflecteur proposé

Dans cette section, un Reflectarray avec les éléments proposés est conçu et un arrangement d'élément spécial est adopté pour réduire la polarisation croisée. Les propriétés de rayonnement de RA fabriquée sont également fournies pour valider la mise en œuvre de la conception proposée.

Dans ce travail, une antenne cornet pyramidal à polarisation linéaire, est utilisée pour exciter le RA. Une méthode d'alimentation décalée ($\theta_i=25^\circ$) est utilisée, et le cornet est positionné à 147,9 mm (h) au-dessus du réseau de réflexion, le réseau réflecteur composé de 23×23 éléments avec un espacement de 9 mm et disposés de manière conventionnelle a été initialement conçu. Cependant, les simulations ont montré qu'une disposition traditionnelle des éléments entraînerait une forte polarisation croisée. Selon les conceptions proposées dans [22], la polarisation croisée pourrait être considérablement réduite en utilisant une disposition spéciale dans laquelle les éléments voisins sont mis en miroir dans les directions x et y.

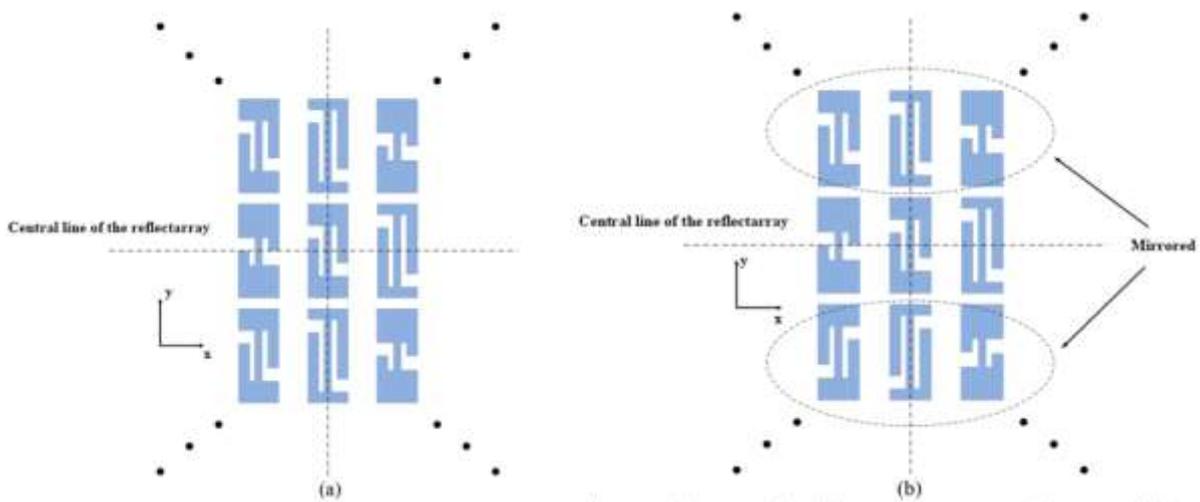


Figure II. 5 : (a) Disposition conventionnelle des éléments. (b) Disposition proposée des éléments. [22]

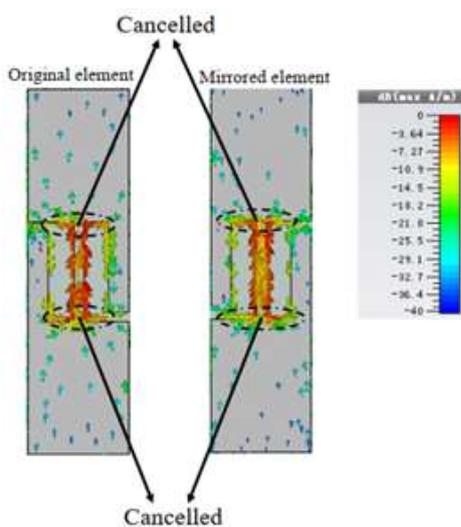


Figure II. 6 : Distributions de courant de l'élément original et de l'élément réfléchi à 10 GHz. [22]

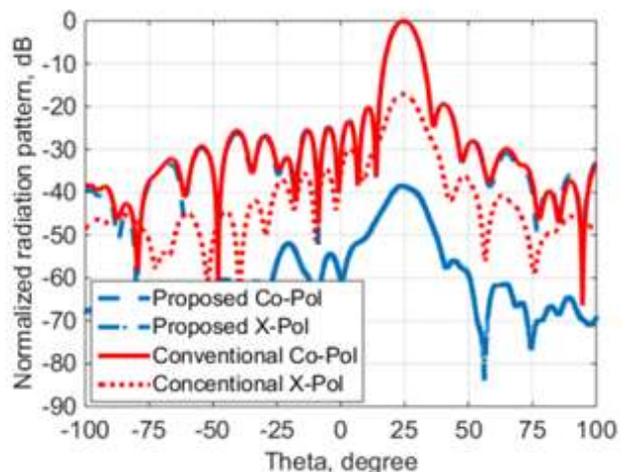


Figure II. 7 : Diagrammes normalisés simulés du réseau réflecteur avec des dispositions d'éléments conventionnelles et proposées à 10 GHz et les dispositions d'éléments proposées à 10 GHz. [22]

- ✓ La figure II.7 présente les diagrammes de rayonnement normalisés simulés des réflecteurs avec les dispositions conventionnelles et proposées des éléments à 10 GHz respectivement.
- ✓ De toute évidence, l'agencement proposé n'affecte guère le diagramme de Co-polarisation.
- ✓ Cependant, une amélioration significative de la polarisation croisée de plus de 20 dB dans la région autour du faisceau principal a été obtenue en adoptant la méthode d'arrangement des éléments proposés.

II.3.1 Prototypage d'antenne et ses propriétés de rayonnement

Le réseau réflecteur avec une ouverture carrée de 207 mm×207 mm accueillant 529 éléments et disposés selon un agencement spécial a été fabriqué.

La Figure II.8 montre le prototype de l'antenne proposée. Les performances de rayonnement du réseau ont été mesurées à l'intérieur d'une chambre anéchoïque, comme le montre la Figure II.9. [22]

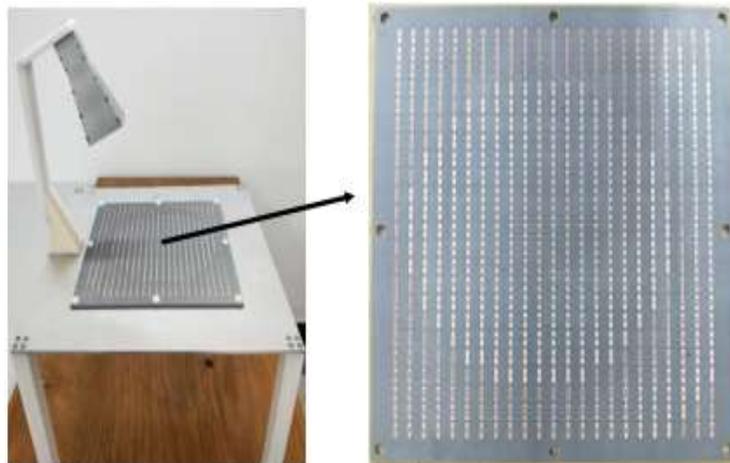


Figure II.8 : Prototypage du réseau réflecteur proposé. [22]

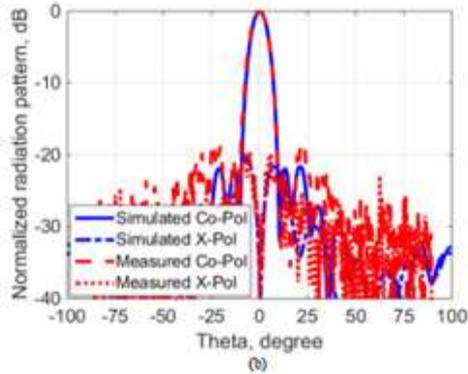
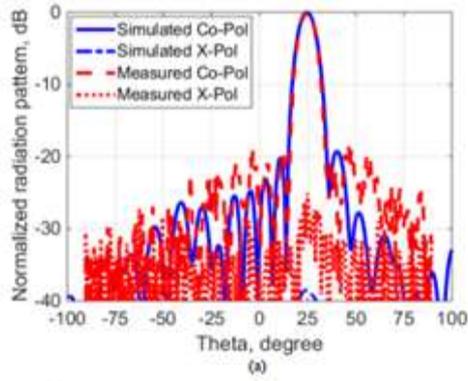


Figure II.9 : Modèles normalisés simulés et mesurés du réseau réflecteur proposé à 10 GHz proposés à 10 GHz (a) Plan E et (b) Plan H. [22]

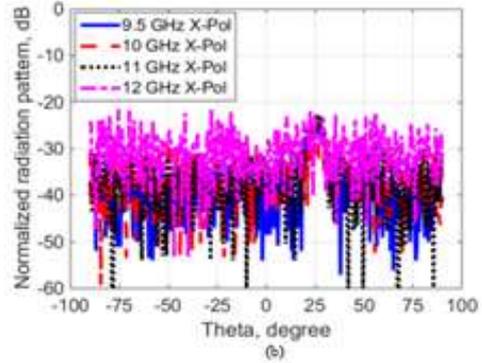
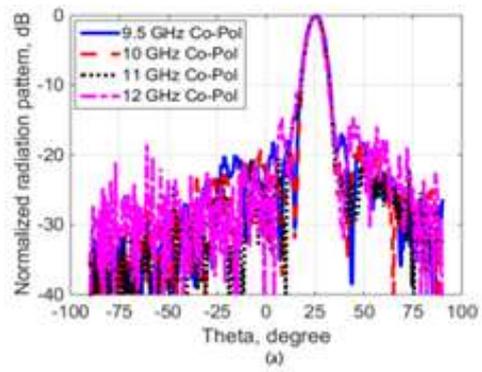


Figure II.10 : Diagrammes mesurés dans les plans E et H du réseau de réflexion proposé à différentes fréquences. (a) Diagrammes Co-Pol du plan E. (b) Diagrammes X-Pol du plan E. [22]

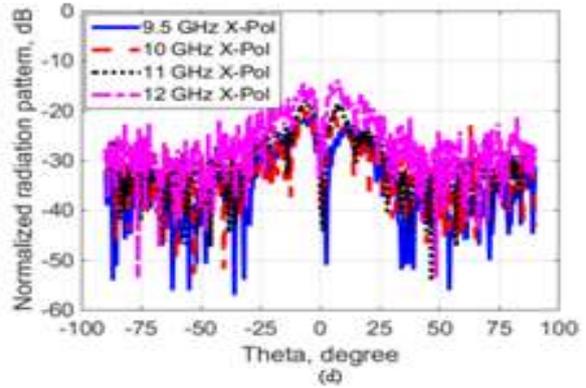
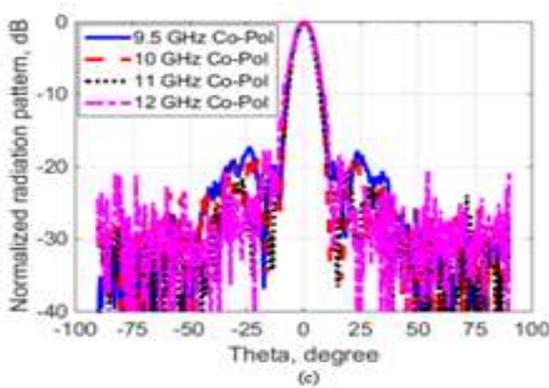


Figure II.10 : Diagrammes mesurés dans les plans E et H du réseau de réflexion proposé à différentes fréquences. (c) Diagrammes Co-Pol du plan H. (d) Diagrammes X-Pol du plan H. [22]

Le gain mesuré et l'efficacité d'ouverture de la proposition Reflectarray sont tracés à la figure II.11. Il montre que le gain de crête est 25,6 dBi à 10 GHz, correspondant à une efficacité d'ouverture de 67 %. Utilisation d'une bande passante de gain, le Reflectarray proposé peut atteindre 23 %, 30 %, et plus de 38 % de bande passante, respectivement. Comme on peut également le voir sur la figure II.11, l'efficacité de l'ouverture est supérieure à 43 % dans le gain de 1 dB bande passante allant de 9,7 GHz à 12 GHz, et la maximum valeur de 67 % se produit à la fréquence de conception 10 GHz. En utilisant d'un rendement d'ouverture de 50 % comme critère, l'antenne proposée peut atteindre une largeur de bande relative de 23 % de l'ouverture d'efficacité. [22]

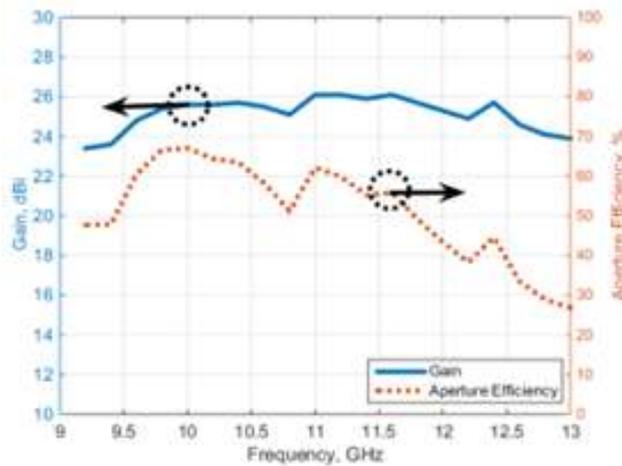
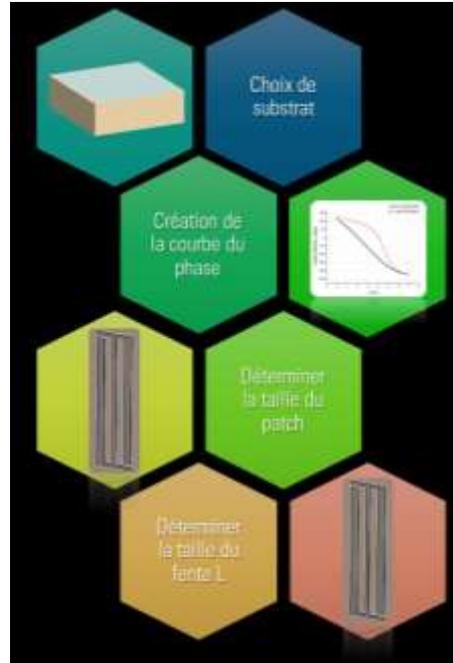


Figure II.11 : Gain mesuré et efficacité d'ouverture du réflectarray proposé. [22]

II.4. Procédure de conception

Le processus complet de création d'une cellule d'antenne RA est décrit ci-dessous :



II.5. Les différentes étapes de la validation et nos contributions

II.5.1 Validation de l'article [22]

Figure II.12 montre la cellule unitaire conçue. La structure est constituée d'un patch et d'un substrat Rogers RT5880 carré avec un plan de masse.

La conception consiste à dimensionner la structure de la cellule en se basant sur certains critères établis après l'analyse de la phase de réflexion, le paramètre électrique le plus important. En conséquence, il est essentiel de choisir la fréquence de fonctionnement afin de répondre à cette analyse.

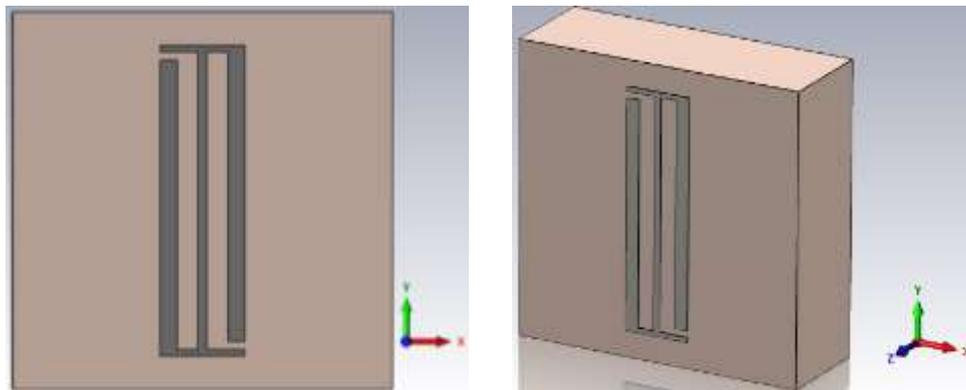


Figure II.12 : Structure de cellule unitaire conçue.

- Ses dimensions sont donc 9 mm × 9 mm
- La fréquence de fonctionnement souhaitée est 10 GHz.
- Les dimensions de l'élément proposé sont listées dans le tableau II. 1.

Paramètres	Valeur
W	2 mm
W_1	0.5 mm
W_2	0.4 mm
L_1	7.4 mm
G	0.2 mm

Tableau II. 1 : Paramètres de Géométrie de L'élément proposé

A. Résultats de simulations

Comme on le voit sur la figure II.13, lorsque W_1 augmente, la pente de la courbe de phase de réflexion devient plus linéaire même si la gamme de phases est légèrement plus étroite. Avec une gamme de phases suffisamment et une réponse en phase linéaire, la valeur optimale de W_1 est de 0,5 mm.

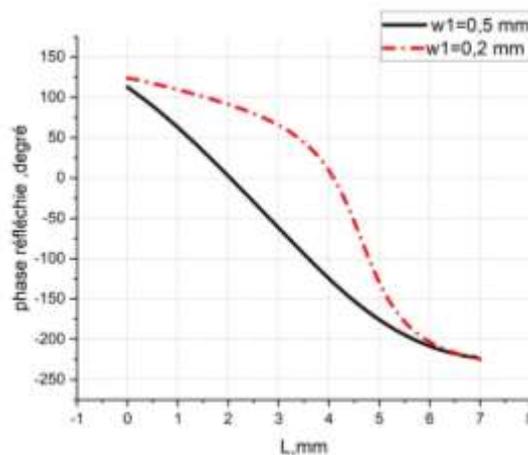


Figure II.13 : Courbes de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz pour différents W_1 de l'élément.

II.6. Conception des antennes reflectarrays à l'aide de Matlab

Le logiciel Matlab permet la conception d'une antenne RA au biais d'un script API (application interface), connectant automatiquement avec le simulateur (CST Microwave Studio) comme illustre sur la figure II.14. De plus, ce programme est un outil indispensable pour étudier et concevoir des antennes à réseau réflecteur sans l'intervention de l'utilisateur.

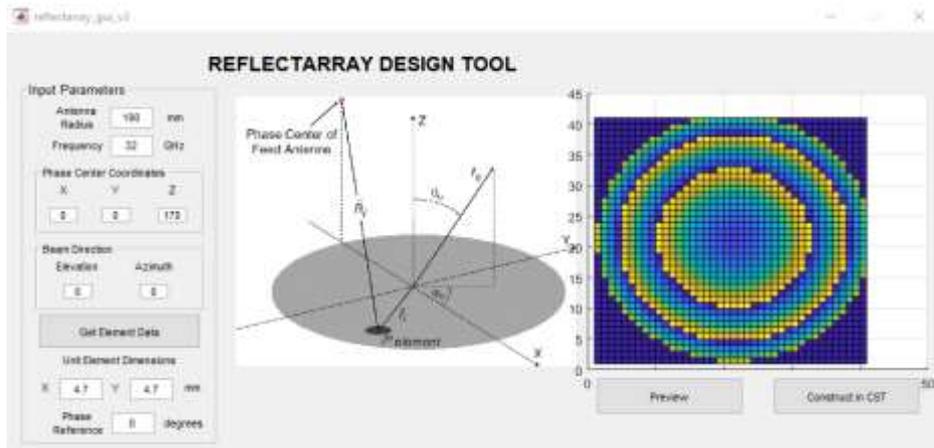


Figure II.14 : Outil de conception Reflectarray.

Nous n'avons pas pu créer l'antenne RA automatiquement, c'est pourquoi nous avons effectué des recherches pour trouver un code Matlab . Cependant, ce code présentait plusieurs erreurs et nous avons fait tout notre possible pour les corriger afin d'extraire l'antenne.RA.

Dans ce cas, la conception du Reflectarray a été réalisée en utilisant des cellules de forme rectangulaire conventionnelle avec différentes tailles.

II.7. Résultats et simulation de Matlab

La figure II.15 montre la première structure de l'antenne proposée à l'aide du code Matlab.

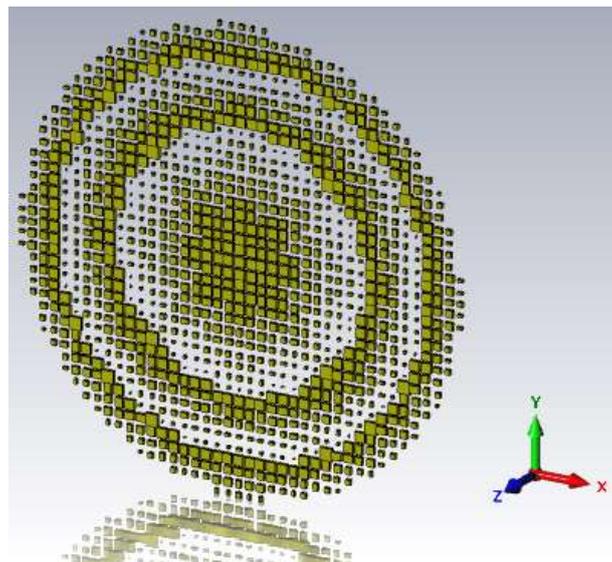


Figure II.15 : Première structure de l'antenne proposée.

Pour créer la source d'alimentation dans cette configuration, une antenne cornet rectangulaire a été utilisée. La distance entre l'antenne RA et la source est de 147.9 mm le long de l'axe z et de 69 mm (voir la formule II.4) le long de l'axe x du centre du système de coordonnées, ce qui correspond au point central de la surface.

Dans ce cas, la même cellule unitaire est utilisée pour avoir un rayonnement maximal dans la direction inclinée de 25°, comme elle est illustrée dans la figure II.16.

$$x = h \times \tan \theta \quad (\text{II.4})$$

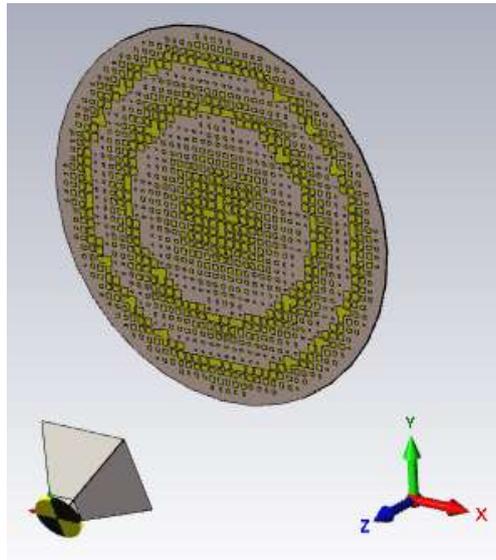


Figure II.16 : La configuration d'antenne à cornet rectangulaire.

Malheureusement, aucun résultat n'a été obtenu, malgré l'arrangement exacte des éléments de RA et le développement du code Matlab, mais il y a eu plusieurs erreurs qui ne nous ont pas permis d'exploiter ce code pour créer une antenne à réseau réflecteur d'une manière automatique.

II.8. Conception des antennes reflectarrays manuellement

La deuxième configuration est la surface réflectrice de 23x23 éléments, qui est illustrée sur la figure II.17. Nous avons d'abord fait un substrat et un plan de masse de 207 mm×207 mm pouvant accueillir 529 éléments et disposés dans une disposition spéciale a été fabriqué.

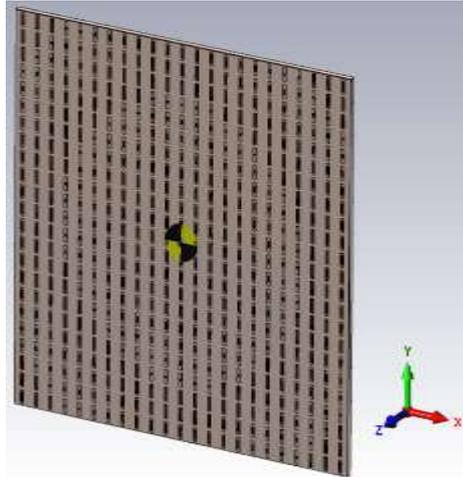


Figure II.17 : Deuxième configuration (conception des antennes Reflectarrays manuelle).

Après avoir créé la source d'alimentation, nous avons modifié la valeur de fréquence dans notre source et effectué les simulations correspondantes, comme le montré dans la figure II. 18

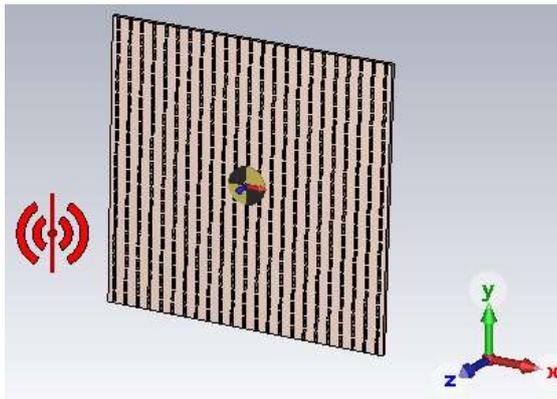


Figure II.18 : La configuration d'antenne avec une nouvelle valeur de fréquence 10GHz.

II.9. Résultats et simulation de validation

Les diagrammes de rayonnement normalisés pour les RA utilisant des éléments conventionnels sont présentés dans la figure II.20 pour une fréquence de 10 GHz. Il convient de noter que seul le modèle de co-polarisation peut varier dans cette configuration.

En utilisant la méthode d'agencement des éléments suggérée, une réduction significative de la polarisation, dépassant les 15 dB à proximité du faisceau principal, a été obtenue, comme le montre la figure II.19.

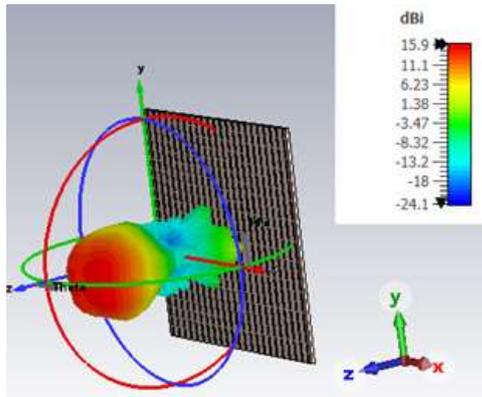


Figure II.19 : Le faisceau rayonné par l'antenne réflectrice de 23x23 éléments.

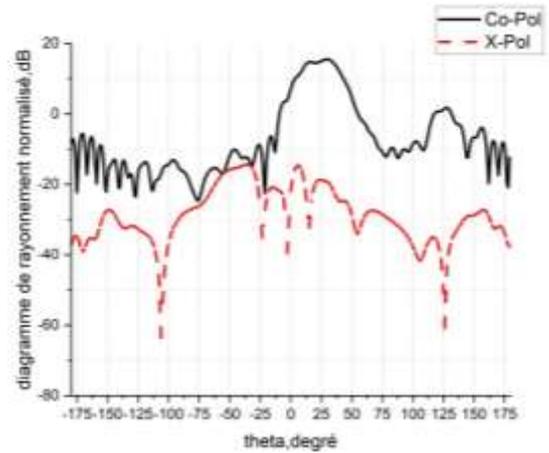


Figure II.20 : Modèles normalisés simulés du réflectarray avec des arrangements conventionnels et des éléments proposés à 10 GHz.

La figure II.21 présente les tendances à travers la bande mesurées à différentes fréquences. Comme on peut l'observer, les diagrammes d'antenne dans le plan E maintiennent des trajectoires stables sur l'ensemble de la bande, avec des trajectoires principales orientées à 25 degrés hors largeur. Les fréquences des lobes principaux diffèrent légèrement pour le diagramme dans le plan H. De plus, on a remarqué qu'à mesure que la fréquence augmente, les diagrammes de rayonnement se dégradent légèrement et présentent des niveaux légèrement plus élevés de section efficace de polarisation.

Dans l'ensemble, des performances raisonnables ont été obtenues en termes de lobes latéraux, de niveaux de polarisation croisée et d'orientations des lobes principaux.

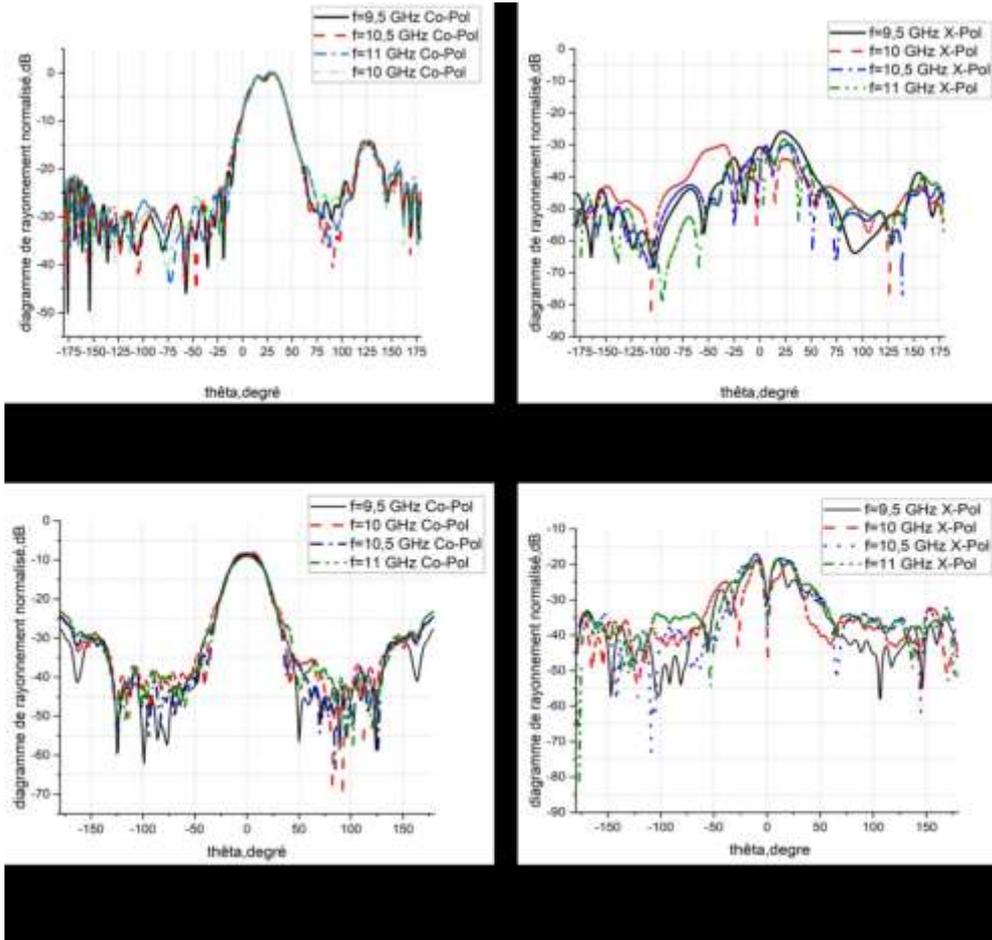


Figure II.21 : Modèles mesurés de plan E et de plan H du Reflectarray proposé à diverses fréquences. (a) Modèles de co-Pol de plan E. (b) E-plane X-Pol patterns. (c) H-plane co-Pol patterns. (d) H-plane X-Pol patterns.

II.10. Antenne à réseau réflecteur en utilisant cellule patch biconcave monocouche intégrée avec fentes en forme L inversées

II.10.1 Géométrie de l'antenne en utilisant cellule patch biconcave

La cellule unitaire, désignée par la Figure II.22, est constituée d'un patch biconcave sur un substrat Rogers RT5880 avec un plan de masse.

L'objectif est de déterminer la taille de la cellule en se basant sur un ensemble de normes établies après une analyse approfondie du paramètre électrique le plus significatif lors de la phase de réflexion. Pour mener à bien cette analyse, le choix de la fréquence de travail est crucial.

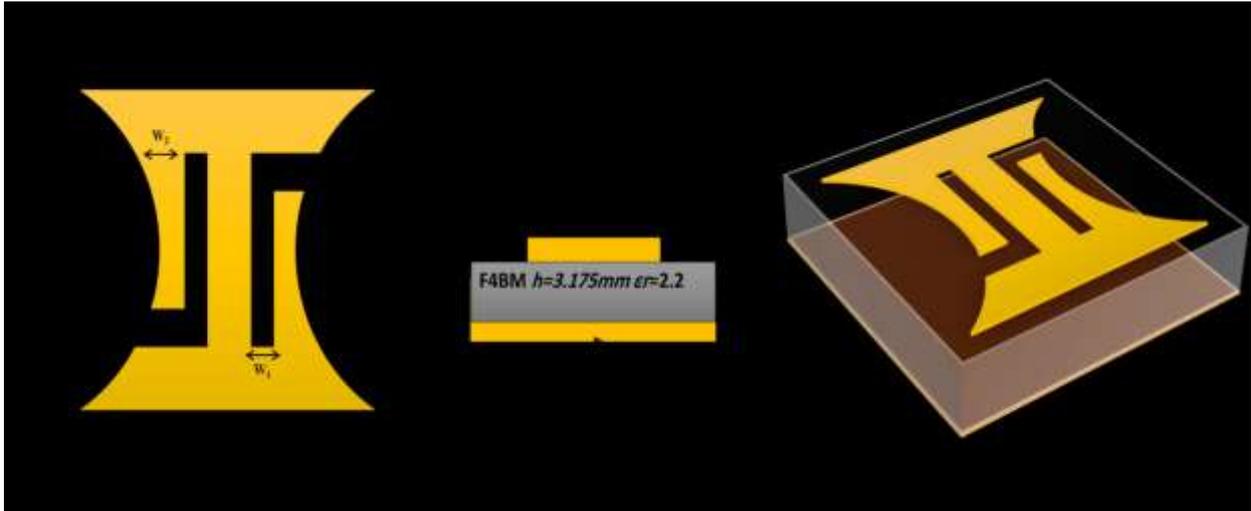


Figure II.22 : Structure de la cellule unitaire conçue en 3D.

II.10.2 Dimensions de la cellule patch biconcave

La cellule conçue présente une forme biconcave avec un patch positionné au centre. Cela permet de respecter les exigences relatives à l'espacement entre les éléments.

II.10.3 Forme du patch biconcave

La forme géométrique du patch a un impact direct sur les performances de la cellule unitaire. Étant donné qu'il n'existe pas de règle générale pour choisir la forme, les performances de cette structure ne peuvent être déterminées qu'après évaluation et analyse des résultats de la simulation de la phase de réflexion de l'élément.

- Les dimensions de l'élément proposé sont répertoriées dans le tableau II.2.

Paramètres	Valeur
W	2 mm
W_1	0.5 mm
W_2	0.4 mm
L_1	7.4 mm
G	0.2 mm

Tableau II. 2 : Paramètres de Géométrie de L'élément proposé

II.11. Résultats de simulations d'une cellule patch biconcave

- ✓ Sur la figure II.23, lorsque W_1 augmente, la pente de la courbe de traitement de la phase devient plus linéaire même si la gamme de phases est légèrement plus étroite.
- ✓ La valeur idéale de W_1 est de 0,5 mm lorsqu'il y a une plage de phase suffisante et une réponse linéaire.

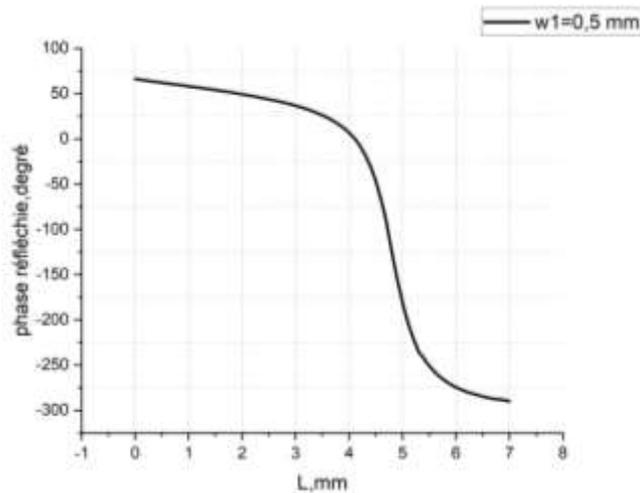


Figure II.23 : Courbe de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz.

II.12. Conception d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch biconcave

La configuration consiste en une surface réfléchissante de 23×23 éléments, comme illustré dans la figure II.24. Nous avons commencé par fabriquer un substrat et un plan de masse de $207 \text{ mm} \times 207 \text{ mm}$, pouvant accueillir 529 éléments. Ces éléments ont ensuite été disposés selon un agencement spécial.

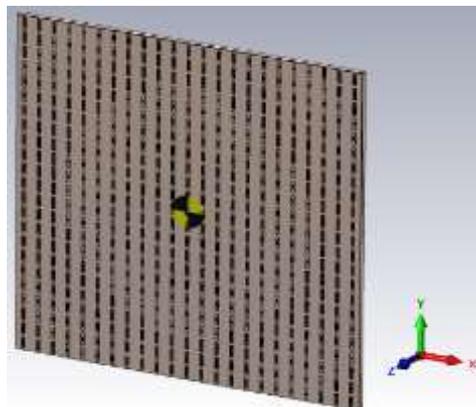


Figure II.24 : conception des antennes Reflectarrays.

La source d'alimentation a été configurée, puis nous avons ajusté la valeur de fréquence dans le fichier de modèle de notre projet et exécuté une simulation. Les résultats de cette simulation sont présentés dans la figure II.25.

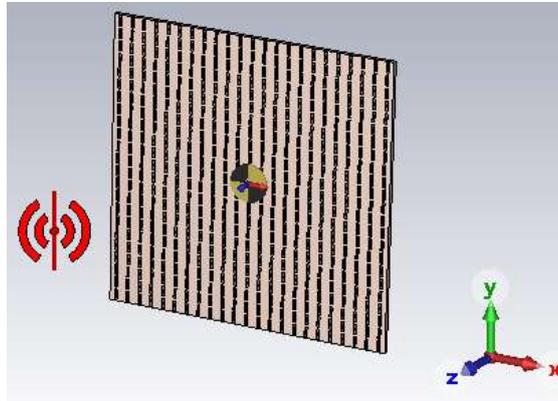


Figure II.25 : Configuration d'antenne avec une nouvelle valeur de fréquence 10 GHz.

II.13. Résultats issus des simulation d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch biconcave

Les diagrammes de rayonnement normalisés des réseaux élémentaires conventionnels avec réflecteurs sont présentés dans la Figure II.28 et sont applicables à 10 GHz. Il est clair que la seule variable dans cet agencement est le modèle de co-polarisation.

Lorsque la méthode suggérée de placement des éléments a été utilisée, une réduction significative de la polarisation - qui dépassait auparavant les 15 dB près du faisceau principal - a été obtenue.



Figure II. 26 : Disposition proposée des éléments.

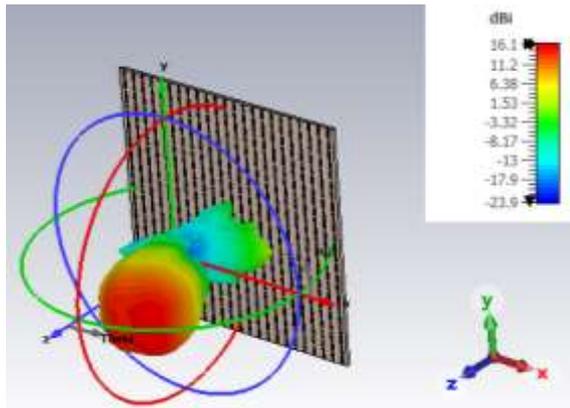


Figure II.27 : Le faisceau rayonné par l'antenne réflecteur de proposition de 23x23 éléments.

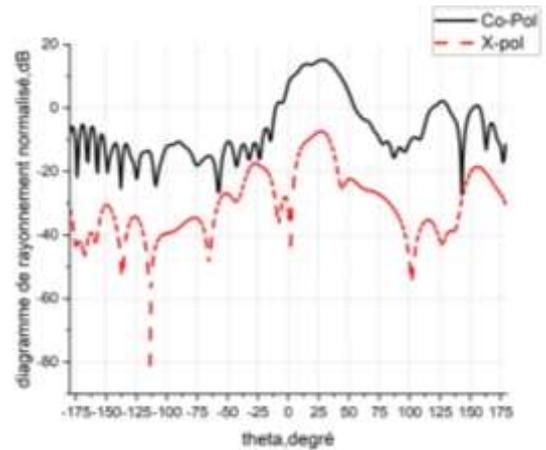


Figure II.28 : Modèles normalisés simulés du réflectarray avec des arrangements conventionnels et des éléments proposés à 10 GHz.

Les tendances à travers la bande, mesurées à différentes fréquences, sont présentées dans la figure II.29. Comme on peut l'observer, les trajectoires de vol des modèles mesurés de plan E sont stables sur l'ensemble de la bande, avec des trajectoires de vol principales générées à une distance de 25 degrés.

Pour le plan H, les fréquences des lobes principaux diffèrent légèrement. De plus, il a été constaté qu'à mesure que la fréquence augmente, les modèles de résonance se dégradent légèrement et présentent des niveaux légèrement plus élevés de section de polarisation effective.

Dans l'ensemble, des performances raisonnables ont été démontrées en termes de lobes latéraux, de niveaux de polarisation croisée et d'orientations du faisceau principal.

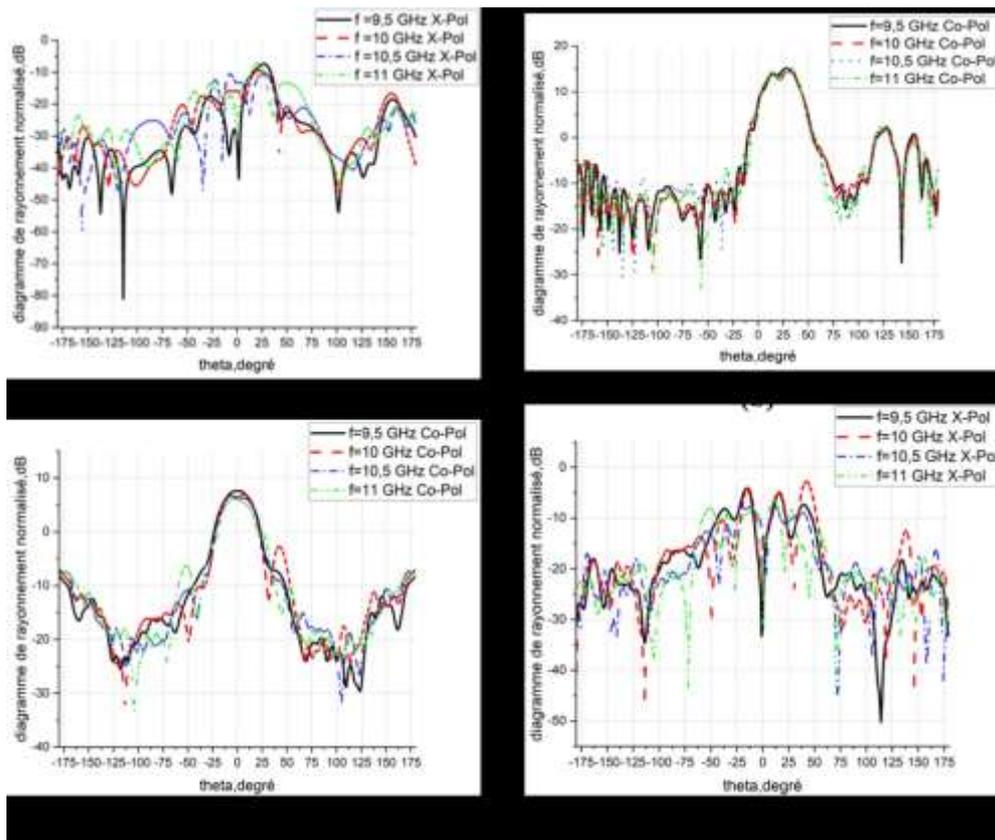


Figure II.29 : Modèles mesurés de plan E et de plan H du réflectarray proposé à diverses fréquences. (a) Modèles de co-Pol de plan E. (b) E-plane X-Pol patterns. (c) H-plane co-Pol patterns. (d) H-plane X-Pol patterns.

II.14. Antenne a réseau réflecteur en utilisant cellule patch hexagonale monocouche intégrée avec fentes en forme L inversées

II.14.1 Géométrie de l'antenne en utilisant cellule patch hexagonale

Comme indiqué dans la figure II.30, la structure est composée d'un patch hexagonal sur un substrat Rogers RT5880 avec un plan de masse.

Pour concevoir la structure de la cellule, des critères ont été établis après une analyse approfondie du paramètre électrique le plus significatif, à savoir la phase de réflexion. Ainsi, pour répondre à cette analyse, le choix de la fréquence de travail est crucial.

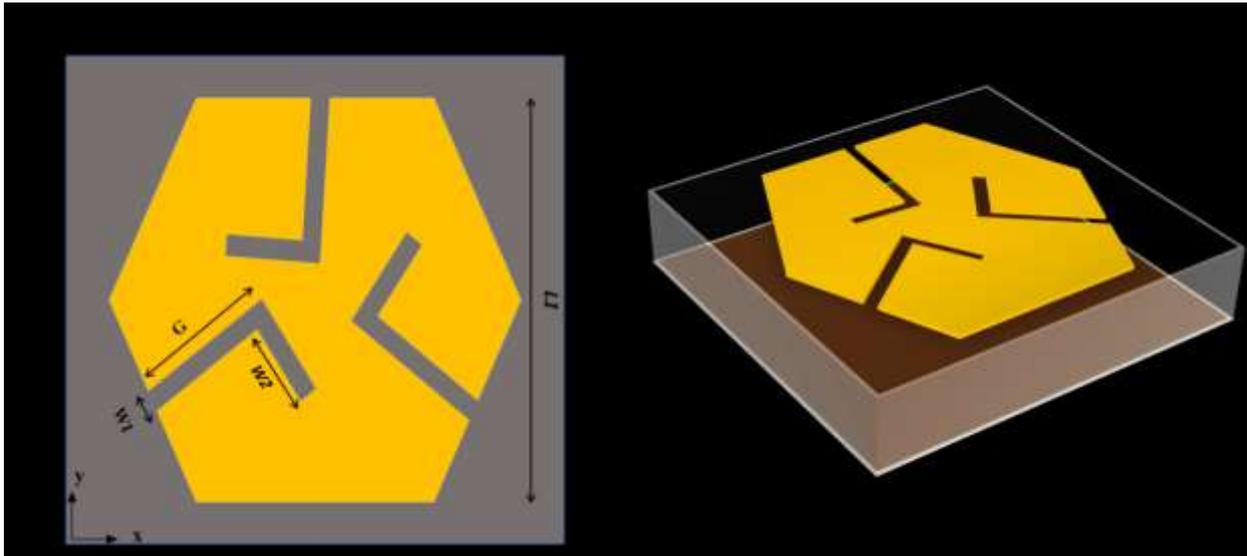


Figure II.30 : Une structure d'unité cellulaire conçue en 3D.

II.14.2 Dimensions de la cellule patch hexagonale

La cellule conçue dispose d'une forme hexagonale avec une pièce centrale, qui assure la conformité aux exigences d'espacement des éléments.

II.14.3 Forme du patch hexagonale

La performance d'une cellule individuelle est directement liée à la forme géométrique de la pièce. Comme il n'existe pas de règle générale pour le choix de la forme, la performance d'une telle structure ne peut être déterminée que par l'évaluation et l'analyse des résultats de simulation de phase de réflexion de l'élément.

- ✓ Les dimensions de l'élément proposé sont répertoriées dans le tableau II.3.

Paramètres	Valeur
R	4.4 mm
W_1	0.4 mm
W_2	1.75 mm
L_1	7.4 mm
G	3.5 mm

Tableau II. 3 : Paramètres de Géométrie de L'élément proposé

II.15. Résultats de simulations d'une cellule patch hexagonale

À mesure que W_1 augmente, la pente de la courbe de phase devient plus linéaire, comme le montre la figure II.31, mais avec une plage de phase légèrement condensée. La valeur optimale pour W_1 est de 0,5 mm, ce qui fournit à la fois une plage de phase suffisante et une réponse linéaire.

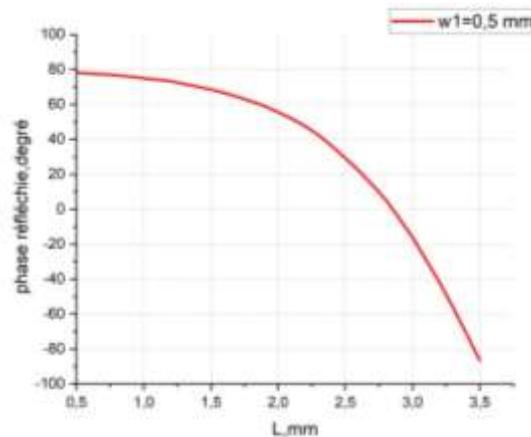


Figure II. 31 : Courbe de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz.

II.16. Conception d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch hexagonale

La source d'énergie a été réglée à 25° , puis nous avons ajusté la valeur de fréquence dans le fichier modèle de notre projet et effectué une simulation. Les résultats sont illustrés à la figure II.32.

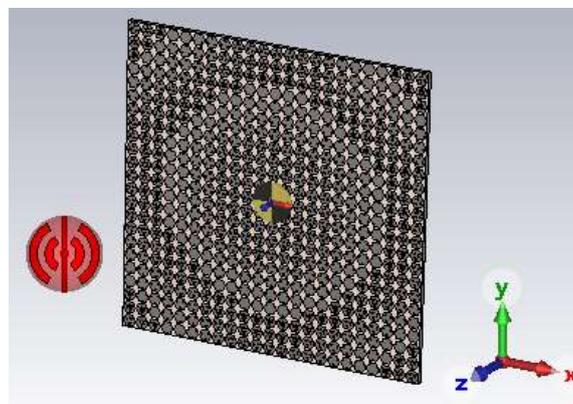


Figure II.32 : Configuration d'antenne avec valeur de fréquence 10 GHz.

II.17. Résultats et simulation d'antenne Reflectarray en utilisant cellule patch hexagonale

Les schémas de rayonnement normalisés suggérés pour les réseaux élémentaires classiques avec réflecteurs sont présentés à la figure II.35 et s'appliquent spécifiquement à 10 GHz. De toute évidence, la seule variable dans l'arrangement est le modèle de co-polarisation. En utilisant la méthode suggérée de placement des éléments, on a obtenu une réduction significative de la polarisation, qui avait atteint un sommet de 15 dB près du faisceau principal.

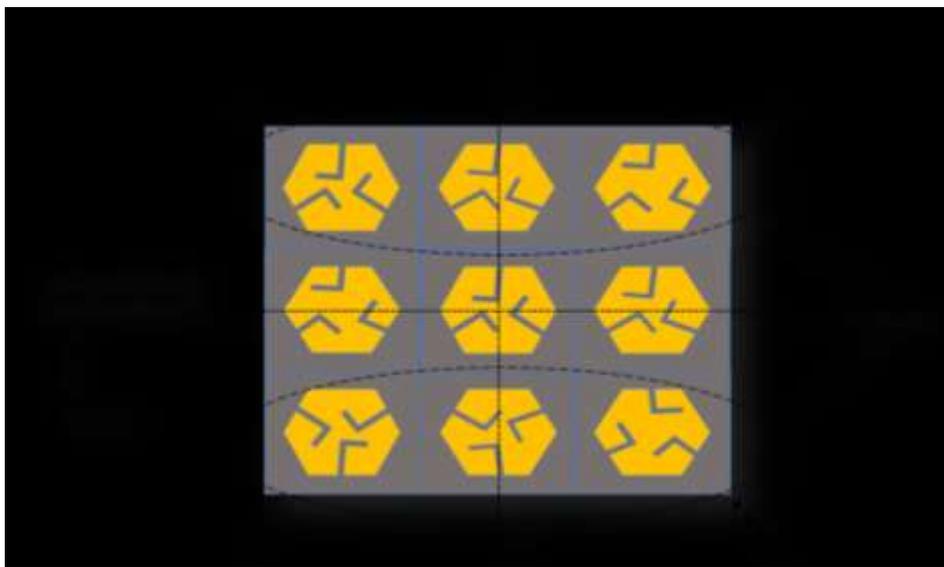


Figure II. 33 : Disposition proposée des éléments.

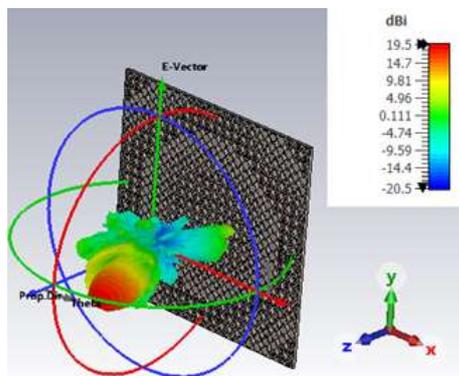


Figure II.34 : Le faisceau rayonné par l'antenne réflectrice de 23x23 éléments.

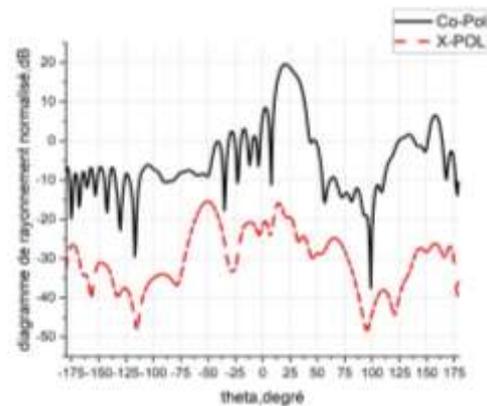


Figure II.35 : Courbe de phase de réflexion par rapport aux longueurs de fentes L à 10 GHz.

Les mesures de tendance à différentes fréquences sont présentées à la figure II.36. Il est évident que les schémas du plan E restent stables sur toute la largeur de bande, les trajectoires du faisceau primaire étant générées à une distance de 25 degrés. En outre, dans le plan H, on a observé qu'à mesure que la fréquence augmente, les modèles de résonance se dégradent légèrement et présentent des niveaux légèrement plus élevés de polarisation efficace. Dans l'ensemble, il a été démontré que les orientations du faisceau primaire, les niveaux de polarisation et les latitudes des lobes sont tous dans des limites raisonnables.

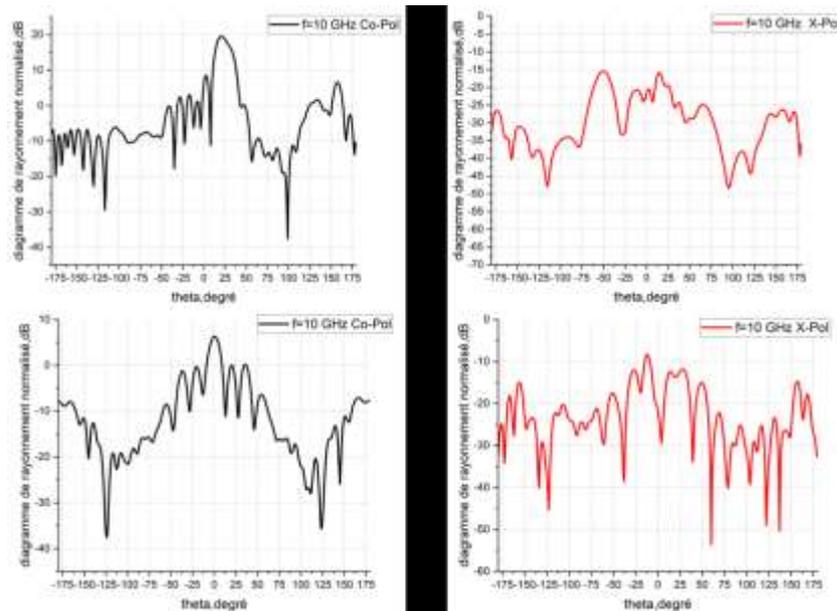


Figure II.36 : Modèles mesurés de plan E et de plan H du réflectarray proposé à une seule fréquence. (a) Modèles de co-Pol de plan E. (b) E-plane X-Pol patterns. (c) H-plane co-Pol patterns. (d) H-plane X-Pol patterns.

II.18. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure de conception des antennes Reflectarray. Trois structures différentes ont été conçues, simulées et étudiées, et une comparaison a été faite entre les courbes de phase de réflexion de ces trois cellules. Nous avons utilisé deux logiciels, Matlab et CST Studio, pour démontrer plusieurs concepts d'antennes Reflectarray. De plus, nous avons mis en œuvre des simulations pour des configurations comprenant 23 x 23 éléments. Les résultats ont montré l'efficacité de la méthode de conception et les performances de compensation de phase réalisées par la cellule unitaire proposée. Les trois structures ont réussi à obtenir un faisceau rayonné dans la direction de 25° avec des niveaux acceptables de lobes secondaires.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans cette thèse a porté sur l'étude, la conception et la simulation d'une antenne Reflectarray en utilisant une cellule unitaire géométrique proposée à l'aide d'un programme Matlab ensuite, en appliquant des cellules unitaires de forme géométrique biconcave et hexagonale.

D'abord, nous n'avons pas pu développer le réflecteur automatique, donc nous avons cherché un code Matlab pour y parvenir. Cependant, il y était un certain nombre des erreurs, et tous les efforts ont été faits pour les corriger afin de préserver l'antenne réfléchissante. Ensuite, nous avons introduit la procédure de conception d'une cellule unitaire, basée sur des critères de performances et de faisabilité. En plus, la technique de simulation des cellules unitaires a été introduite en utilisant le logiciel CST. Trois structures différentes sont conçues, simulées et étudiées.

Les courbes de phases de réflexion des trois cellules sont comparées. Après avoir fixé un support F4BM de 3,175 mm avec un constant diélectrique de 2,22 et est soutenu par une base, le patch a une paire de fentes qui sont inversées en forme de L. Les composants sont espacés par un 9 mm dans les axes x et y, respectivement. Les deux formes de patch biconcave et hexagonale de la cellule unitaire ont pu couvrir un intervalle de phase de 360°.

Ensuite, nous avons présenté la procédure de conception des antennes Reflectarray. La cellule unitaire au patch biconcave et hexagonale a été proposée pour déterminer la taille de la cellule sur la base d'un ensemble de normes qui ont été établies après analyse du paramètre électrique le plus significatif lors de la phase de réflexion.

De plus, les résultats de simulation des configurations 23 x 23 éléments ont été mises en œuvre. Les résultats ont montré l'efficacité de la méthode de conception et des performances de compensation de phase achevée par la cellule unitaire proposée. Un faisceau rayonné vers la direction de 25° avec un niveau des lobes secondaires acceptables a été obtenu par les deux structures.

Comme perspective, il serait intéressant de valider les résultats de simulation obtenus de l'antenne Reflectarray conçue en fabriquant un prototype pour profiter des performances et des avantages de ce type exceptionnel des antennes pour des applications de communication sans fil à large bande.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. BEN TERKI, Abdennour. *Conception d'une antenne réseau réflecteur pour les systèmes de communications sans fil pour le standard 5 G*. 2019. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [2]. MENER, Simon. *Conception d'une cellule déphaseuse pour réseau réflecteur reconfigurable à deux polarisations circulaires indépendantes*. 2013. Thèse de doctorat. INSA de Rennes.
- [3]. HUANG, John et ENCINAR, Jose Antonio. *Reflectarray antennas*. John Wiley & Sons, 2007.
- [4]. YANN, Clément. *Modélisation électromagnétique de cellules actives environnées-Application à l'analyse et la synthèse d'une antenne reflectarray à balayage électronique*. 2012. Thèse de doctorat. INSA de Rennes.
- [5]. HAN, Chulmin, HUANG, John, et CHANG, Kai. A high efficiency offset-fed X/Ka-dual-band reflectarray using thin membranes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, vol. 53, no 9, p. 2792-2798.
- [6]. ENCINAR, Jose A. et BARBA, Mariano. Design manufacture and test of Ka-band reflectarray antenna for trasmitting and receiving in orthogonal polarization. In: *2010 14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics & the American Electromagnetics Conference*. IEEE, 2010. p. 1-4.
- [7]. SHAKER, Jafar et CUHACI, Michel. Multi-band, multi-polarisation reflector-reflectarray antenna with simplified feed system and mutually independent radiation patterns. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 2005, vol. 152, no 2, p. 97-101.
- [8]. CHAHARMIR, M. R., SHAKER, J., et LEGAY, H. Dual-band Ka/X reflectarray with broadband loop elements. *IET microwaves, antennas & propagation*, 2010, vol. 4, no 2, p. 225-231.
- [9]. TARGONSKI, Stephen D. et POZAR, David M. Analysis and design of a microstrip reflectarray using patches of variable size. In: *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*. IEEE, 1994. p. 1820-1823.

- [10]. COSTANZO, Sandra, VENNERI, Francesca, BORGIA, Antonio, *et al.* A single-layer dual-band reflectarray cell for 5G communication systems. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, vol. 2019.
- [11]. ABDOLLAHVAND, M., FOROORAGHI, K., ENCINAR, Jose A., *et al.* Design and fabrication of a novel single-layer Ka-band reflectarray antenna. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2020, vol. 12, no 5, p. 409-418.
- [12]. ZHAO, Jianing, LI, Tianming, CUI, Xinhong, *et al.* A low-mutual coupling dual-band dual-reflectarray antenna with the potentiality of arbitrary polarizations. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, p. 3224-3227.
- [13]. ENCINAR, Jose A. *et* ZORNOZA, J. Agustin. Broadband design of three-layer printed reflectarrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, vol. 51, no 7, p. 1662-1664.
- [14]. ROEDERER, Antoine. *Reflector antenna comprising a plurality of panels*. U.S. Patent No 6,411,255, 25 juin 2002.
- [15]. MCNAMARA, Derek, *et al.* *Reflectarray Antennas: Operating Mechanisms and Remedies for Problem Aspects*. 2014. Thèse de doctorat. Université d'Ottawa/University of Ottawa.
- [16]. LI, Xi *et* YANG, Lin. Single-layer dual-band wide band-ratio reflectarray with orthogonal linear polarization. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 93586-93593.
- [17]. LI, Xi, LUO, YaYa, WEI, GengMing, *et al.* A novel single layer wideband reflectarray design using two degrees of freedom elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, vol. 69, no 8, p. 5095-5099.
- [18]. SALEH, Wassim. *Étude de nouvelles technologies d'antennes pour application 5G dans la bande millimétrique*. 2021. Thèse de doctorat. Nantes.
- [19]. DAHRI, Muhammad Hashim, JAMALUDDIN, Mohd Haizal, ABBASI, Muhammad Inam, *et al.* A review of wideband reflectarray antennas for 5G communication systems. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, p. 17803-17815.
- [20]. DIEBOLD, Aaron V., PANDE, Divya, GREGG, Christine, *et al.* Reflectarray Design Using a Discrete Dipole Framework. *IEEE Open*

Journal of Antennas and Propagation, 2023, vol. 4, p. 216-228.

- [21]. ASMA, BOUAKA, LOUIZA, TEMMAR, et NACEUR, AOUNALLAH. Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio.
- [22]. GUO, Lu, YU, Huiting, CHE, Wenquan, *et al.* A broadband reflectarray antenna using single-layer rectangular patches embedded with inverted L-shaped slots. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no 5, p. 3132-3139.