

UNIVERSITE DE LIMOGES
ECOLE DOCTORALE Science – Technologie – Santé
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2009

Thèse N° 06-2009

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : "Electronique des Hautes Fréquences, Optoélectronique"

Spécialité : "Télécommunications"

présentée et soutenue par

Hassan CHREIM

le 06 mars 2009

**Etude d'antennes BIE multifaisceaux agiles.
Amélioration de la couverture omnidirectionnelle en azimut**

Thèse dirigée par Monsieur Bernard JECKO

JURY :

Monsieur	S. VERDEYME	Président
Monsieur	H. AUBERT	Rapporteur
Monsieur	R. LOISON	Rapporteur
Monsieur	B. JECKO	Examineur
Monsieur	T. MONEDIERE	Examineur
Monsieur	T. KOLECK	Examineur
Monsieur	P. DUFRANE	Examineur
Monsieur	D. PELLETIER	Examineur

A ma chère famille

Remerciements

Ce travail a été effectué à la faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Limoges, au sein du laboratoire XLIM, dirigé successivement par messieurs Pierre Yves GUILLON et Dominique CROS. Je leur exprime toute ma gratitude pour m'avoir accueilli dans ce laboratoire.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Bernard JECKO, Professeur à l'université de Limoges et responsable du département Ondes et Systèmes Associés (O.S.A), de m'avoir accueilli dans son équipe, d'avoir bien assuré l'encadrement de mes travaux mais aussi d'avoir participé au jury de ma thèse.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Serge VERDEYME, Professeur à l'université de Limoges, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je remercie très sincèrement Monsieur Renaud LOISON, Maître de conférence-HDR à l'université de RENNES 1, et Monsieur Hervé AUBERT, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, Electronique, Informatique et d'hydraulique de Toulouse pour avoir accepté de juger ce travail et assurer la tâche de rapporteurs.

J'exprime mes remerciements particuliers à Monsieur Thierry KOLECK, Ingénieur au Centre National d'Etudes Spatiales à Toulouse, et Monsieur Thierry MONEDIERE, Professeur à l'université de Limoges, pour leur participation à ce jury de thèse. Dans ces remerciements, je n'oublie pas Monsieur Daniel PELLETIER, Directeur Général de RADIALL SYSTEMS, et Monsieur Philippe DUFRANE, Responsable R&D de RADIALL SYSTEMS. Je suis heureux de les compter parmi les membres de jury de thèse.

Je tiens à associer à ces remerciements Christophe DALL'OMO et Hervé PARVERY de RADIALL SYSTEMS pour leur sympathie et leur aide.

Je remercie chaleureusement Patricia LEROY et Nadine AYMARD pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur bonne humeur.

Un grand merci à Monsieur Eric ARNAUD, ingénieur d'études au CNRS et bientôt docteur, qui m'a offert son aide et son temps pour les diverses mesures. Bon courage pour la rédaction.

Depuis six ans, je partage avec eux des moments plus qu'agréables. Merci Majed « eskifone » et Ouss « we are in the noise ;-) » pour les soirées inoubliables et les discussions intéressantes.

Un grand merci à mes collègues du département O.S.A, Momo (fils de la capital), Sayyed (dame de pique), Kanso (ligne rouge), Manu, Régis, Agnès, Lina, Dina, Choumane, Nico, Seb, Emilien et tous les autres. Bon courage à ceux qui me suivent...

Enfin un clin d'œil à Elisa POINTERAU qui a partagé avec moi le bureau. Merci pour l'ambiance et les discussions agréables.

Que puis-je dire de Hana « ma psycho ☺ » ? Merci pour ton soutien pendant les bons et les mauvais moments.

Mes chers parents, ma sœur et mon frère, Merci pour tout. Je ne serai jamais arrivé sans votre support pendant toutes ces années. Je vous souhaite le meilleur ...

SOMMAIRE

<u>GLOSSAIRE.....</u>	<u>1</u>
<u>INTRODUCTION GENERALE.....</u>	<u>5</u>
<u>CHAPITRE I CONTEXTE ET PRESENTATION DE L'ETUDE</u>	<u>11</u>
I.1. INTRODUCTION.....	13
I.2. LES DIFFERENTS TYPES D'ANTENNES	15
I.2.1. LES ANTENNES DIRECTIVES	16
I.2.1.1. Les antennes à ouverture rayonnante	16
I.2.1.2. Les réseaux d'antennes	18
I.2.2. LES ANTENNES SECTORIELLES.....	20
I.2.2.1. Les réseaux d'antennes	20
I.2.2.2. Les antennes à résonateur BIE planaire	21
I.2.3. LES ANTENNES OMNIDIRECTIONNELLES.....	22
I.2.3.1. Les antennes omnidirectionnelles élémentaires.....	22
I.2.3.2. Les réseaux linéaires d'antennes.....	23
I.2.3.3. Les antennes à résonateur BIE cylindrique.....	24
I.2.4. LES ANTENNES AGILES	25
I.2.4.1. Les réseaux d'antennes actifs.....	26
I.2.4.2. Les antennes multifaisceaux agiles à résonateur BIE	28
I.3. ETAT DE L'ART SUR LES ANTENNES BIE CYLINDRIQUES	29
I.3.1. LES MATERIAUX BIE	30
I.3.1.1. Définition.....	30
I.3.1.2. Caractérisation d'un matériau BIE à défaut.....	32
I.3.2. APPLICATION DES BIE AU DOMAINE DES ANTENNES	33
I.3.2.1. Propriétés du matériau BIE utilisé	33
I.3.2.2. L'antenne BIE bi-directive	34

I.3.2.3.	L'antenne BIE directive	35
I.3.2.4.	L'antenne BIE sectorielle	36
I.3.3.	HISTORIQUE DES ANTENNES BIE CYLINDRIQUES	37
I.3.3.1.	Les antennes BIE omnidirectionnelles en azimut	37
I.3.3.2.	Les antennes BIE cylindrique multifaisceaux agiles	43
I.4.	PRESENTATION DU SUJET DE THESE	44
I.5.	MOYENS MIS A DISPOSITION.....	46
I.5.1.	LE LOGICIEL DE SIMULATION CST MICROWAVE STUDIO	46
I.5.2.	LA BASE DE MESURES DU LABORATOIRE XLIM.....	47
I.6.	CONCLUSION	51

CHAPITRE II METHODE DE CONCEPTION DE L'ANTENNE BIE COAXIALE MULTIFAISCEAUX. APPLICATION A UNE ANTENNE BIE COAXIALE AGILE 4 X 90°. 53

II.1.	INTRODUCTION.....	55
II.2.	METHODE DE CONCEPTION D'UNE ANTENNE BIE COAXIALE MULTIFAISCEAUX	57
II.2.1.	PRESENTATION DE L'ANTENNE BIE COAXIALE OMNIDIRECTIONNELLE	57
II.2.2.	ANTENNE BIE COAXIALE OMNIDIRECTIONNELLE DE REFERENCE ETUDIEE.....	59
II.2.2.1.	Dimensionnement de l'antenne	59
II.2.2.2.	Coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale.....	61
II.2.2.3.	Cartographies de champ électrique et rayonnement.....	62
II.2.3.	CONCEPTION DE L'ANTENNE BIE COAXIALE MULTIFAISCEAUX	64
II.3.	ETUDE DE L'ANTENNE BIE COAXIALE SECTORIELLE EN FONCTION DE LA FREQUENCE	66
II.3.1.	IMPEDANCE D'ENTREE.....	66
II.3.2.	CARTOGRAPHIES DE CHAMP ELECTRIQUE ET DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT.....	67
II.3.3.	DIRECTIVITE ET ANGLES D'OUVERTURES	71
II.4.	INFLUENCES DES PARAMETRES PHYSIQUES DE L'ANTENNE BIE COAXIALE SECTORIELLE	72
II.4.1.	VARIATION DU DIAMETRE DE L'AME CENTRALE « DA ».....	73

II.4.1.1.	Influence sur le champ électrique.....	75
II.4.1.2.	Influence sur les diagrammes de rayonnement.....	76
II.4.2.	VARIATION DU DIAMETRE DES TIGES « D ».....	79
II.4.2.1.	Influence sur le coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale.....	80
II.4.2.2.	Influence sur le champ électrique.....	80
II.4.2.3.	Influence sur les diagrammes de rayonnement.....	82
II.4.3.	VARIATION DE LA PERIODICITE ANGULAIRE DES TIGES « Θ ».....	85
II.4.3.1.	Influence sur le coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale.....	86
II.4.3.2.	Influence sur le champ électrique.....	86
II.4.3.3.	Influence sur les diagrammes de rayonnement.....	88
II.5.	CONCEPTION D'UNE ANTENNE BIE COAXIALE MULTIFAISCEAUX 4*90°	91
II.5.1.	DIMENSIONS DE LA STRUCTURE	92
II.5.2.	PERFORMANCES DE L'ANTENNE EN MONO-SOURCE (BIE COAXIALE SECTORIELLE)	92
II.5.3.	PERFORMANCES DE L'ANTENNE EN PRESENCE DE TOUTES LES SOURCES (BIE COAXIALE MULTIFAISCEAUX).....	93
II.5.3.1.	Couplage inter-sources	94
II.5.3.2.	Cartographies de champs et rayonnement	95
II.5.3.3.	Reconstitution du rayonnement omnidirectionnel.....	97
II.6.	AUGMENTATION DU NOMBRE DE SOURCES DANS LE PLAN HORIZONTAL.....	99
II.6.1.	SIMULATION DE L'ANTENNE BIE SECTORIELLE « EN PRESENCE DE LA SOURCE D'EXCITATION SEULE » 99	
II.6.1.1.	Structure simulée.....	99
II.6.1.2.	Directivité et rayonnement	100
II.6.2.	ANALYSE DE L'IMPACT DU NOMBRE DE SOURCES DANS LE PLAN HORIZONTAL SUR LES PERFORMANCES DE L'ANTENNE BIE COAXIALE MULTIFAISCEAUX	101
II.6.2.1.	Cas d'un commutateur absorbant.....	102
II.6.2.2.	Cas d'un commutateur réflectif	104
II.7.	CONCLUSION.....	107

<u>CHAPITRE III ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE DANS LE PLAN HORIZONTAL.</u>	
<u>APPLICATIONS ASSOCIEES.</u>	109
III.1. INTRODUCTION	111
III.2. OBTENTION DE L'ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE PAR LA REDUCTION DU COUPLAGE INTER-SOURCES.....	113
III.2.1. ORIGINE DU COUPLAGE.....	113
III.2.2. INSERTION DES MURS METALLIQUES	113
III.2.2.1. Couplage inter-sources de la nouvelle structure.....	115
III.2.2.2. Rayonnement de la nouvelle structure	116
III.3. AGILITE DE L'ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE.....	116
III.4. LA RECONFIGURATION DU DIAGRAMME DANS LE PLAN HORIZONTAL	118
III.4.1. OBJECTIFS ET CAHIER DE CHARGES	118
III.4.2. ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE SIMULEE.....	119
III.4.2.1. Description de l'antenne.....	119
III.4.2.2. Résultats de simulations	120
III.4.3. AMELIORATION DES PERFORMANCES	123
III.4.3.1. Modifications apportées	123
III.4.3.2. Résultats de simulation	124
III.4.4. ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE FINALE	127
III.4.5. REALISATION ET MESURES.....	128
III.4.5.1. Réduction du coût de l'antenne.....	128
III.4.5.2. Structure réalisée.....	137
III.4.5.3. Système de commutation pour le prototype fabriqué.....	147
III.5. LA DETECTION DE DIRECTIONS D'ARRIVEES	152
III.5.1. APPLICATION DE DIVERSITE:.....	152
III.5.2. CARACTERISATION DU CANAL DE PROPAGATION:.....	152
III.5.3. ETUDE DE L'ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE.....	153
III.5.3.1. Nombre optimal de secteur alimentés	154

III.5.3.2. Performances de l'antenne	155
III.6. LE RADAR.....	157
III.6.1. DEFINITION D'UN RADAR.....	157
III.6.2. TYPES D'APPLICATIONS RADAR.....	157
III.6.3. ETUDE DE L'ANTENNE BIE MULTISECTORIELLE.....	158
III.6.3.1. Description de l'antenne.....	158
III.6.3.2. Performances de l'antenne	159
III.6.4. AUGMENTATION DE LA DIRECTIVITE	161
III.6.4.1. Première simulation (Diamètre du cylindre = 150 mm).....	161
III.6.4.2. Deuxième simulation (Diamètre du cylindre = 200 mm).....	163
III.7. CONCLUSION	167
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>169</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>177</u>
<u>ANNEXES.....</u>	<u>185</u>
<u>LISTE DES TRAVAUX</u>	<u>199</u>

Glossaire

- **Antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle** : Structure BIE cylindrique munie d'une petite âme centrale au centre. La structure BIE est excitée par une seule source et a un rayonnement omnidirectionnel dans le plan horizontal.
- **Antenne BIE coaxiale sectorielle** : Structure BIE cylindrique munie d'une large âme centrale au centre. La structure BIE est excitée par une seule source et en présence de cette source seulement. Le rayonnement est sectoriel dans le plan horizontal.
- **Antenne BIE coaxiale multifaisceaux** : Idem Antenne BIE coaxiale sectorielle, mais en présence de toutes les sources inactives.
- **Antenne BIE multisectorielle** : Idem Antenne BIE coaxiale multifaisceaux, mais après l'insertion des murs métalliques entre les sources.

Introduction générale

De tout temps, les êtres humains ont voulu communiquer à distance. L'homme primitif pouvait rentrer en contact lors des parties de chasse grâce à des signaux de fumée. Les anciens Grecs utilisait des miroirs pour réfléchir les rayons de soleil lors de la bataille des Thermopyles. En 1794, la sémaphore était utilisé pour transmettre les dépêches pour une guerre entre la France et l'Autriche.

A la fin du XIXème siècle, il était clair pour les scientifiques et les divers expérimentateurs que les communications sans fils étaient possibles. Diverses innovations théoriques et expérimentales ont conduit à l'élaboration de la Radio et des systèmes de communication que nous connaissons aujourd'hui.

En 1831, **Michael FARADAY** commença une série d'expériences au cours desquelles il découvrit le phénomène de l'induction magnétique. Entre 1861 et 1865, en se basant sur le travail expérimental de FARADAY et d'autres scientifiques, **James Clerck MAXWELL** mit au point sa théorie de l'électromagnétisme, qui prédit l'existence des ondes électromagnétiques. La théorie de MAXWELL fut confirmée en 1888 par **Heinrich HERTZ**, qui utilisa des antennes pour démontrer l'existence des ondes électromagnétiques. Depuis ce temps, les chercheurs du monde entier ne cessèrent d'élaborer de nouveaux concepts d'antennes pour faire face à la demande d'une efficacité sans cesse croissante.

Les antennes à bande interdite électromagnétique (BIE) omnidirectionnelle en azimut ont fait partie des recherches menées au sein du département Ondes et Systèmes Associés du laboratoire XLIM. Deux types de structure ont été conçus et réalisés : **l'antenne BIE cylindrique omnidirectionnelle** et **l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle**. Par contre, quelque soit leur type, le gain de ces antennes était limité, n'ayant pas dépassé 10 dB.

Le travail présenté dans cette thèse a pour objectif d'améliorer la couverture omnidirectionnelle du plan azimutal en concevant des **antennes BIE multifaisceaux** dans ce plan.

Le **premier chapitre** proposera une présentation des différents types d'antennes ainsi qu'un état de l'art des matériaux BIE et leurs utilisations dans le domaine des antennes. Ceci permettra d'établir un historique des différentes antennes BIE cylindriques. La problématique et les objectifs poursuivis dans cette thèse seront ensuite dégagés à partir de cette présentation

du contexte. Les moyens numériques et expérimentaux, mis à notre disposition et qui nous ont servi à accomplir nos travaux et à atteindre nos objectifs seront également abordés dans ce premier chapitre.

Le **deuxième chapitre** sera consacré à la méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux. Cette antenne est obtenue en appliquant des modifications sur l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle.

Après avoir présenté la méthode de conception, une **étude en fonction de la fréquence** permettra d'observer le comportement du champ électromagnétique apporté par la source d'excitation et le rayonnement de l'antenne.

La suite de ce chapitre traitera **l'influence des paramètres physiques de l'antenne**. Des variations des dimensions des composants de l'antenne seront effectuées pour comprendre leur influence sur le champ électromagnétique et le rayonnement de l'antenne.

Dans la troisième partie, une première structure coaxiale multifaisceaux sera conçue, **l'antenne BIE multifaisceaux coaxiale 4*90°**. Nous analyserons le recouvrement des couvertures pour la reconstitution de l'omnidirectionnalité. Ensuite, cette antenne sera comparée à une antenne BIE omnidirectionnelle de référence pour évaluer le gain apporté par la procédure de sectorisation.

Enfin, nous analyserons l'impact de **l'augmentation du nombre de sources dans le plan horizontal** sur les performances d'une antenne BIE coaxiale multifaisceaux. Des différentes simulations seront effectuées en tenant compte de la nature du **système de commutation** et en faisant varier le nombre de sources dans le plan horizontal. Nous remarquerons que pour une même structure, le **couplage** entre les sources devient plus important quand leur nombre augmente.

Le **troisième et dernier chapitre** proposera une méthode pour **réduire le couplage** entre les sources quand leur nombre est important dans le plan horizontal. La nature évanescence du champ nous permettra d'insérer des **murs métalliques** entre les sources sans affecter la phase du champ à ces endroits. L'antenne sera alors considérée comme un réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles et sera nommée **l'antenne BIE multisectorielle**.

La deuxième partie est consacrée à la **conception et la réalisation d'une antenne BIE multisectorielle pour des applications de reconfiguration de diagramme de rayonnement dans le plan horizontal**. L'objectif et le cahier de charge de l'antenne seront présentés.

Plusieurs simulations de l'antenne ont été effectuées pour satisfaire le cahier des charges. Enfin, les mesures d'un prototype fabriqué ont été réalisées pour valider notre concept. Un système de commutation pour le prototype fabriqué sera aussi présenté.

Dans une troisième partie, nous étudierons l'antenne BIE multisectorielle pour des **applications de diversité et de caractérisation du canal de propagation**, utilisant la technique de **détection de directions d'arrivée** et nécessitant le balayage du plan horizontal par un faisceau, étroit de préférence, pour une bonne résolution angulaire. De plus, des simulations de l'antenne ont été réalisées en alimentant simultanément plusieurs secteurs. Ces résultats seront exposés.

L'antenne BIE multisectorielle sera étudiée dans une partie pour des **applications RADAR**. Pour ce type d'applications le gain de l'antenne doit être élevé ($\geq 25dB$) pour avoir une portée suffisante. Il faut donc alimenter simultanément plusieurs secteurs dans le plan horizontal et utiliser la technique multisource dans le plan vertical pour avoir le maximum de gain. Les résultats des différentes simulations accomplies seront exposés.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une **conclusion** et des **perspectives** sur le travail effectué.

CHAPITRE I

Contexte et présentation de l'étude

- ❖ Les différents types d'antennes
- ❖ Etat de l'art sur les antennes BIE cylindriques
- ❖ Présentation du sujet de thèse

I.1. Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter le cadre dans lequel mes travaux de recherche sont positionnés. Ces travaux ont comme but de trouver une solution pour concevoir des antennes multifaisceaux à **Bande Interdite Electromagnétique (BIE)** multifaisceaux, utilisant des structures cylindriques.

Dans une première partie, nous ferons un état de l'art sur les différents types d'antennes, ainsi que les types d'applications dans lesquelles ces antennes peuvent être utilisées. Nous commencerons par la présentation des antennes **mono-faisceau**, possédant un diagramme de rayonnement fixe, pour passer finalement aux antennes **multifaisceaux** à diagramme de rayonnement agile.

Dans la deuxième partie, nous compléterons la présentation de l'étude en faisant un historique des antennes **BIE** cylindrique conçues et réalisées jusqu'à présent, et en montrant l'évolution de ces antennes avec le temps.

Nous terminerons ce premier chapitre par l'identification des différents points construisant le sujet de ma thèse, et la présentation des différents moyens mis à notre disposition, qui nous ont servi à compléter le travail et atteindre nos objectifs.

I.2. Les différents types d'antennes

L'antenne est un dispositif utilisé pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques et tout spécialement des ondes hyperfréquences et radioélectriques. En 1888, Heinrich HERTZ utilisa pour la première fois, des antennes pour démontrer l'existence des ondes électromagnétiques prédites par la théorie de MAXWELL. Il utilisa des antennes doublet, tant pour la réception que pour l'émission.

Le principal avantage de ce dispositif est l'assurance de la liaison entre deux ou plusieurs zones éloignées sans avoir besoin aux systèmes utilisant des câbles. Les principales caractéristiques d'une antenne :

La fréquence d'utilisation, ou la **fréquence de résonance** qui dépend d'abord des dimensions propres de l'antenne, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés.

La polarisation de l'antenne est celle du champ électrique E de l'onde émise. La polarisation peut être linéaire, circulaire ou bien elliptique.

Le diagramme de rayonnement qui désigne la répartition de l'énergie rayonné par l'antenne dans toutes les directions.

La directivité qui est un des termes utiles qui peuvent résumer le diagramme de rayonnement. Elle se traduit par le rapport entre la densité de puissance rayonnée par une antenne dans une direction, par rapport à la même densité rayonnée par une antenne isotrope.

L'angle d'ouverture qui est évalué par la largeur du lobe principal de rayonnement entre les angles d'atténuation à mi puissance (-3dB en échelle logarithmique).

Devant le grand nombre d'antennes existantes, et en regard de la problématique des travaux présentés par la suite, il a été choisi de classer les antennes selon leurs propriétés de rayonnement, c'est-à-dire la forme et l'agilité de leurs diagrammes de rayonnement.

I.2.1. Les antennes directives

Le premier groupe d'antennes que nous présentons concerne les antennes directives. Comme leur nom indique, les antennes directives concentrent la totalité de leur rayonnement dans une direction unique. Un exemple d'un rayonnement directif est présenté sur la Figure I-1.

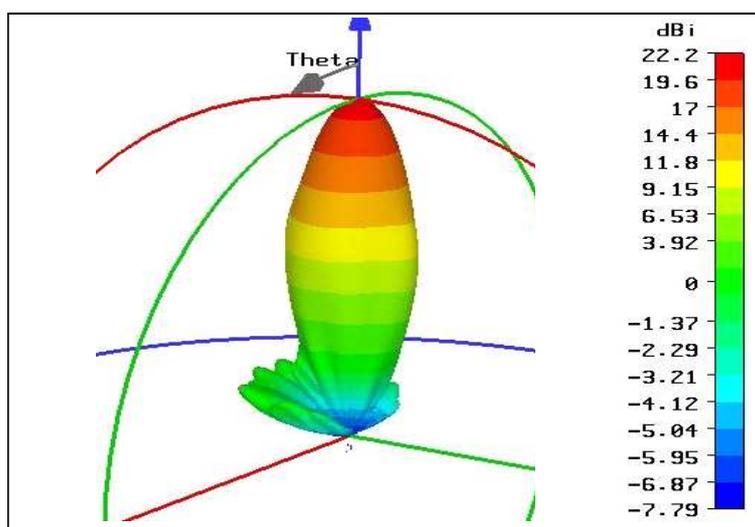


Figure I-1: Diagramme de rayonnement d'une antenne directive

Ce type d'antenne est utilisé pour des liaisons de type point à point pour lesquelles les positions des antennes d'émission et de réception sont connues. La directivité et l'angle d'ouverture du lobe dépendent des applications visées. Les applications sont en général des liaisons Terre – Satellites, ou des liaisons de type **L.M.D.S (Local Multipoint Distribution Service)**. L'intérêt de ces antennes se concentre sur l'augmentation de la portée des liaisons radio et sur l'augmentation le débit des transmissions.

Il existe plusieurs familles d'antennes directives, nous allons présenter quelques unes ainsi que leurs caractéristiques.

I.2.1.1. Les antennes à ouverture rayonnante

La première famille d'antennes directives est celles des antennes à ouverture rayonnante [1]. Pour ce type d'antenne nous citons les paraboles (Figure I-2.a), les antennes lentilles (Figure I-2.b), les cornets (Figure I-2.c).



(a)



(b)



(c)

Figure I-2: Exemples d'antennes à ouverture rayonnante

Les antennes cornets sont des guides d'ondes à section progressivement croissante se terminant par une ouverture rayonnante rectangulaire [2, 3]. L'ouverture rayonnante peut être rectangulaire pour la polarisation linéaire ou circulaire pour la polarisation circulaire.

L'antenne parabole est une antenne disposant d'un réflecteur paraboloidal, basé sur les propriétés géométriques de la courbe nommée **parabole** et de la surface nommée **paraboloïde de révolution** [4]. Cette antenne est utilisée pour les applications grand gain (Transmission terre – satellite, Radar, ...)

Les antennes lentilles sont généralement constituées d'une lentille diélectrique illuminée par une source primaire. Par analogie avec la lentille optique, la lentille diélectrique constitue un système focalisant qui autorise l'augmentation de la directivité de la source primaire.

Les antennes à résonateur BIE planaire appartiennent aussi à cette catégorie d'antennes. Des exemples pour ce type d'antennes sont montrés sur la Figure I-3.

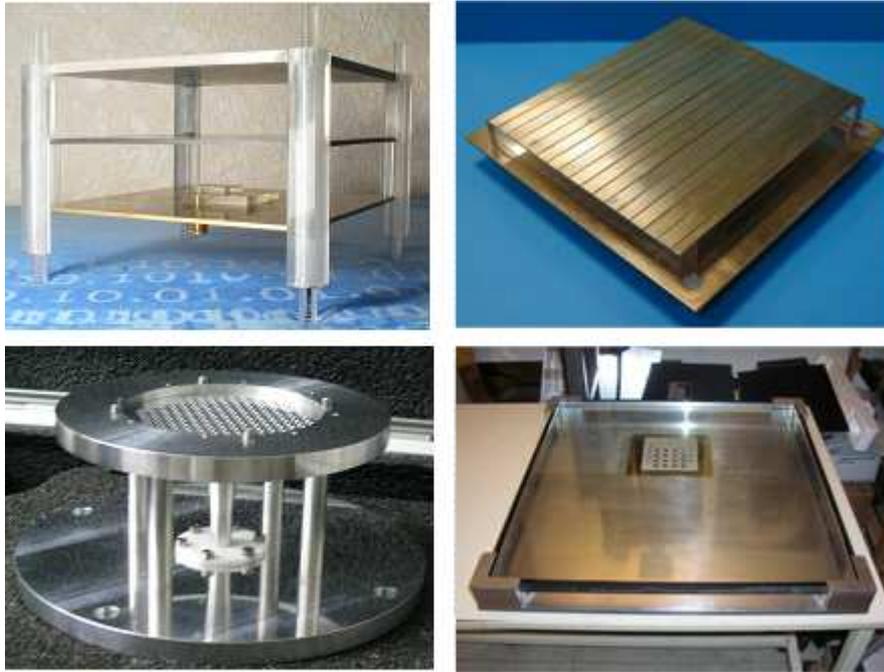
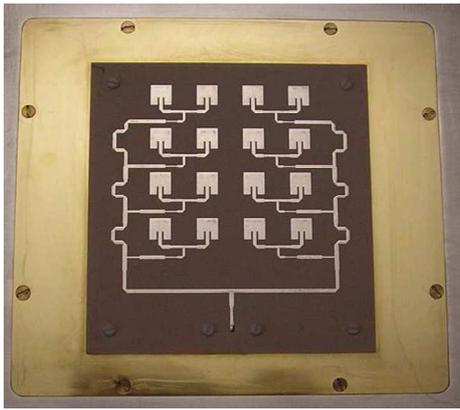


Figure I-3: Différents exemples d'antennes à résonateur BIE planaire

Les antennes à ouvertures rayonnante permettent d'obtenir des diagrammes de rayonnement ayant un lobe très directif avec des faibles lobes secondaires. Leurs inconvénients est surtout l'encombrement volumique qu'elles engendrent.

1.2.1.2. Les réseaux d'antennes

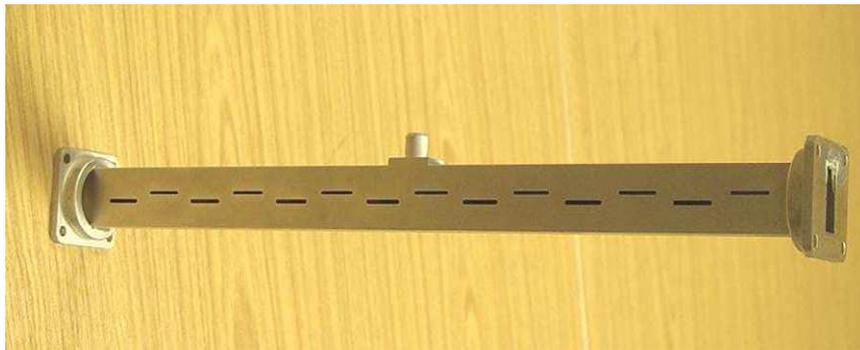
Un réseau d'antennes est un assemblage d'antennes élémentaires, suivant une ou deux dimensions, séparées et alimentées [5, 6]. L'antenne élémentaire peut être un patch (Figure I-4.a), une fente (Figure I-4.c) ou bien un cornet (Figure I-4.b).



(a)



(b)



(c)

Figure I-4: Exemples de réseaux d'antennes

Un réseau peut aussi comporter des éléments non alimentés par une source (éléments parasites), mais qui sont alimentés par le champ produit par le reste des éléments [7], comme dans le cas des antennes Yagi-Uda (Figure I-5).



Figure I-5: Antenne Yagi - Uda

I.2.2. Les antennes sectorielles

Une seconde famille d'antennes est souvent utilisée pour les systèmes de communications sans fils. Nous parlons des antennes à couvertures sectorielles. La principale caractéristique de ce type d'antennes est la dissymétrie entre les rayonnements dans les plans verticaux et horizontaux comme nous pouvons le voir sur la Figure I-6.

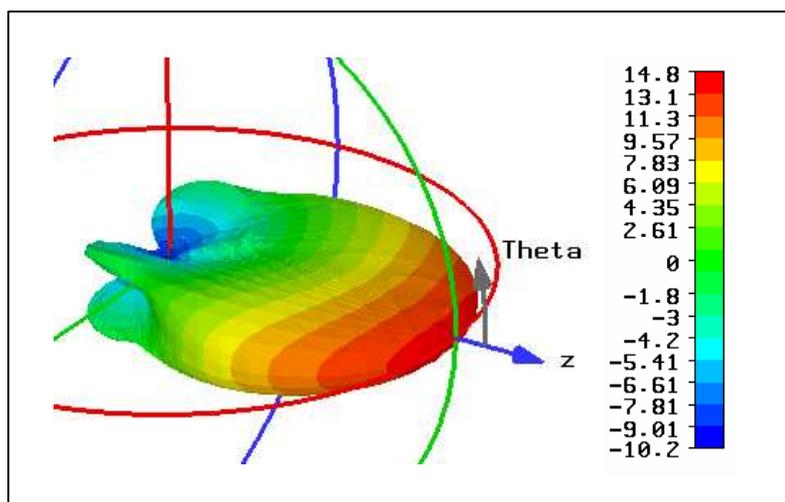


Figure I-6: Exemple de rayonnement d'une antenne sectorielle

Ces antennes possèdent en général un large lobe dans le plan horizontal, avec un angle d'ouverture supérieur à 45° . Elles sont utilisées pour des applications au sol « liaisons Point à Multipoints » dans le but de couvrir une zone ou un secteur donné.

Nous allons maintenant citer quelques types d'antennes sectorielles et présenter leurs principales caractéristiques.

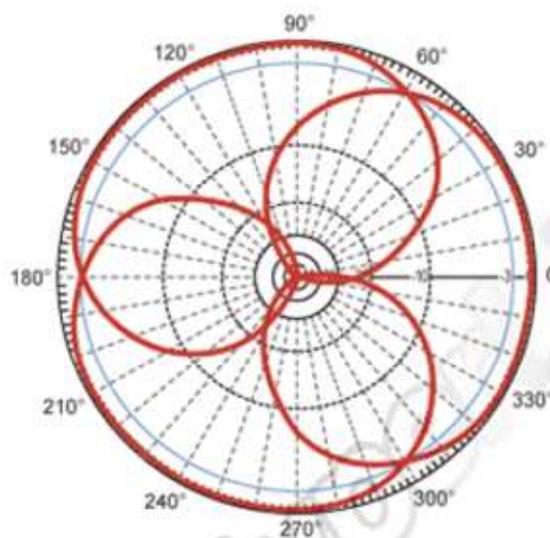
I.2.2.1. Les réseaux d'antennes

Comme dans le cas des antennes directives, un réseau d'antennes peut être utilisé pour concevoir des antennes sectorielles [8]. Généralement, un réseau monodimensionnel ou bidimensionnel d'antennes élémentaires est utilisé. L'angle d'ouverture dans le plan ayant le rayonnement sectoriel est fonction du nombre d'antennes dans ce plan, l'espacement entre ces antennes ainsi que les amplitudes et les phases appliquées. La Figure I-7.a montre un agencement de trois antennes sectorielles de type réseau avec leurs radômes, ayant un angle

d'ouverture de 120° chacun, et leurs diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal (Figure I-7.b).



(a)

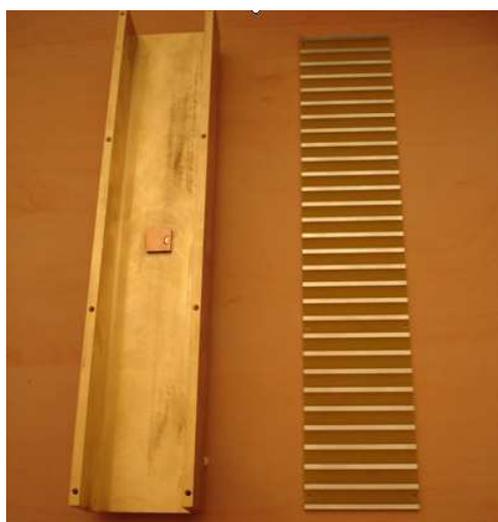


(b)

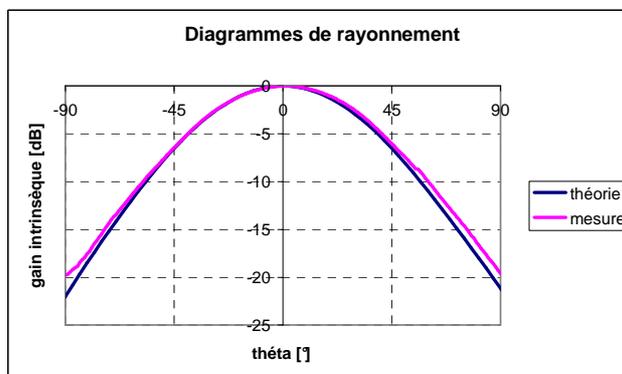
Figure I-7: 3 antennes sectorielles de type réseau et leurs diagrammes de rayonnement

I.2.2.2. Les antennes à résonateur BIE planaire

Les antennes à résonateur BIE planaire peuvent aussi avoir une couverture sectorielle [9, 10]. La Figure I-8.a montre un exemple une antenne à résonateur BIE sectorielle avec son diagramme de rayonnement (Figure I-8.b).



(a)



(b)

Figure I-8: Antenne à résonateur BIE sectorielle avec son diagramme de rayonnement

I.2.3. Les antennes omnidirectionnelles

Les antennes omnidirectionnelles ou omnidirectives sont très utilisées dans les réseaux de télécommunications [11]. Un exemple d'un rayonnement omnidirectionnel est présenté sur la Figure I-9.

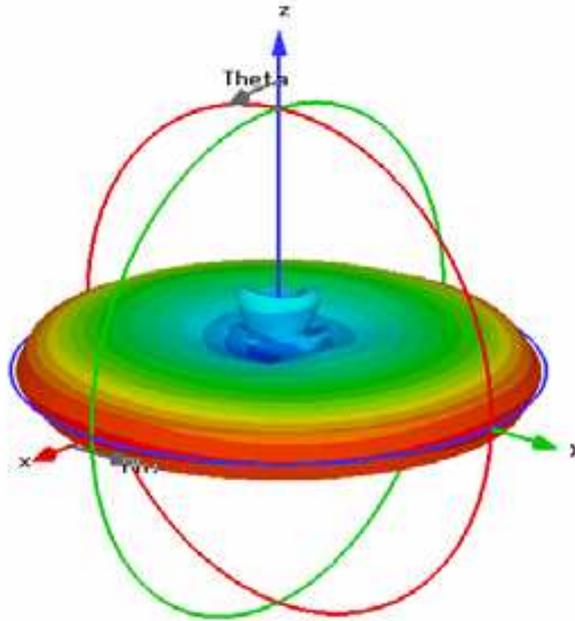


Figure I-9: Exemple d'un rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle

Le rayonnement de cette antenne étant omnidirectionnel dans le plan azimutal, son gain est donc déterminé par l'ouverture angulaire dans le plan vertical. Ce type d'antenne est généralement utilisé pour les stations de base afin de couvrir toute la zone qui se trouve autour.

Nous allons maintenant détailler quelques types d'antennes ayant un rayonnement omnidirectionnel.

1.2.3.1. Les antennes omnidirectionnelles élémentaires

Les antennes élémentaires sont les plus faciles à réaliser. Parmi elles nous citons le dipôle (Figure I-10.a), le monopôle (Figure I-10.b) et l'antenne fil plaque monopolaire (Figure I-10.c).

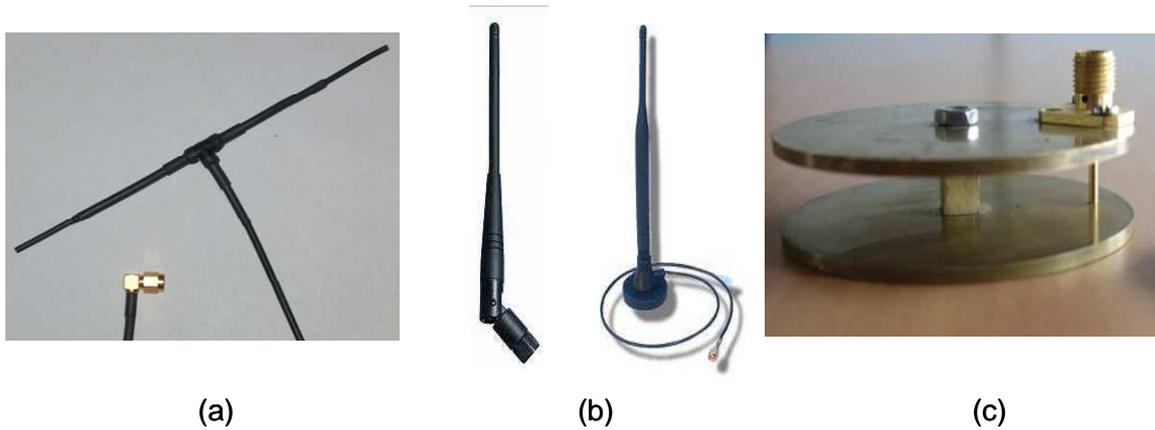


Figure I-10: Antennes omnidirectionnelles élémentaires

Les antennes dipôles peuvent être filaires ou bien imprimées sur un substrat [12, 13, 14]. Ces antennes sont faciles à réaliser mais elles présentent un gain relativement faible (de l'ordre de 2 dB).

Les monopôles ont l'avantage de présenter un faible encombrement. Un monopôle est un demi-dipôle perpendiculaire à un plan de masse.

L'antenne fil plaque coplanaire est utilisée pour la miniaturisation des antennes [15]. Elle est composée d'un plan de masse surmonté d'un toit rayonnant court-circuité. L'alimentation de l'antenne est réalisée par une sonde qui relie le plan de masse et le toit. Le gain de l'antenne fil plaque peut atteindre les 5 dB.

Ces antennes ont l'inconvénient du faible gain, donc elles ne peuvent pas être utilisées comme des antennes de station de base.

1.2.3.2. Les réseaux linéaires d'antennes

Le deuxième type d'antennes omnidirectionnelles que nous présentons est le réseau linéaire. Elles sont constituées d'un assemblage unidimensionnel d'antennes omnidirectionnelles élémentaires. Parmi ces antennes nous distinguons le réseau de dipôles [16, 17] et le réseau de patches [18]. La Figure I-11 montre un exemple d'un réseau de dipôles (a, b), un réseau de patches (c, d).

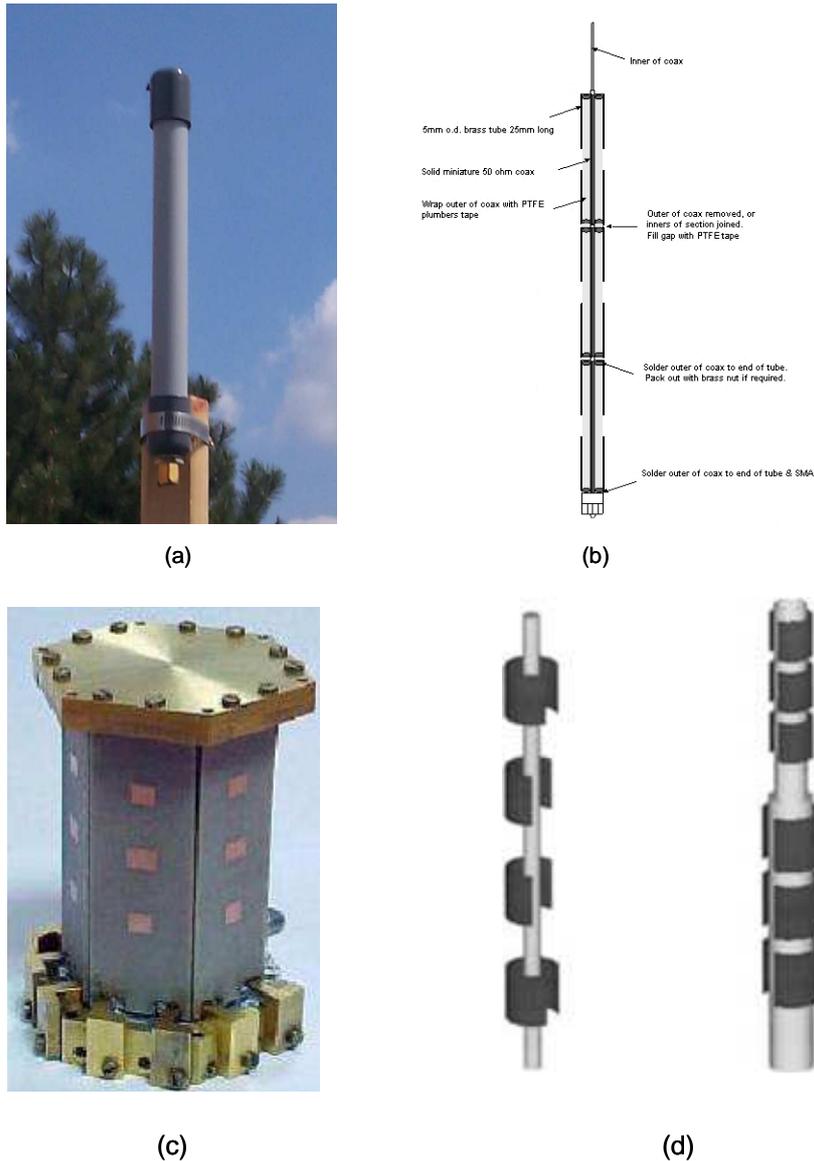


Figure I-11: exemples de réseaux linéaires d'antennes

Les réseaux linéaires d'antennes sont une bonne solution pour obtenir un rayonnement omnidirectionnel avec un gain important supérieur à 8 dB. Cependant, un inconvénient majeur existe, les ondulations du gain dans le plan horizontal qui peuvent atteindre 2 dB. Il faut aussi noter que les pertes diélectriques engendrées par le substrat peuvent atteindre 2 à 3 dB dans certains cas. De plus, les réseaux de distribution deviennent encombrants et difficile à concevoir lorsque le nombre d'antennes élémentaires utilisées est important.

1.2.3.3. Les antennes à résonateur BIE cylindrique

Les antennes à résonateur BIE présentent aussi une partie des antennes à rayonnement omnidirectionnelles, mais dans ce cas nous parlons d'un résonateur BIE **cylindrique**. Des exemples de cette structure sont montrés sur la Figure I-12.

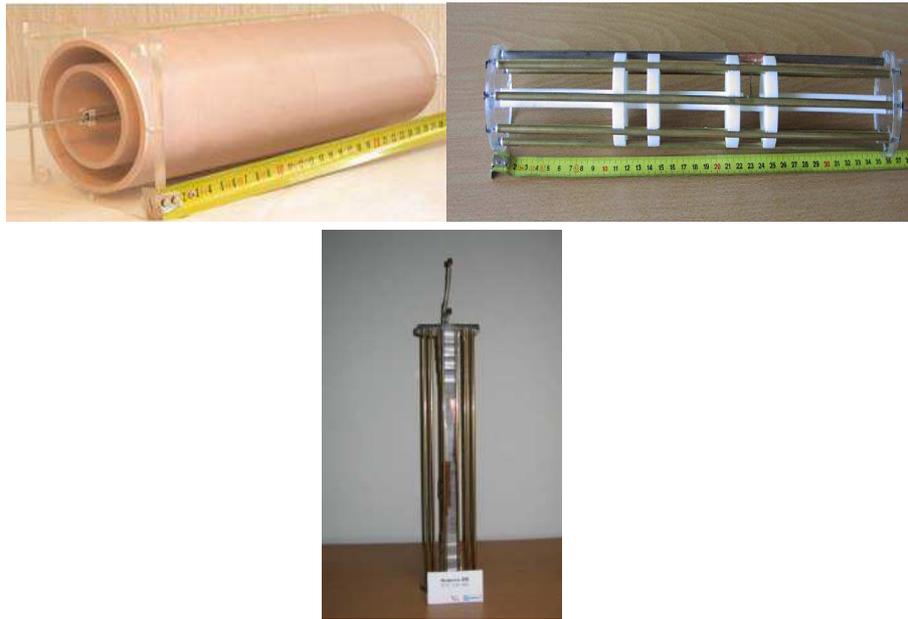


Figure I-12 : Exemple d'antennes à résonateur BIE cylindrique omnidirectionnelle

Le principal avantage de ces antennes est la stabilité du gain dans le plan horizontal, où les ondulations sont inférieures à 0.5 dB [19]. Des études ont montré que le gain d'une antenne à résonateur BIE excité par un simple dipôle peut atteindre 9 dB [20].

L'intégralité des antennes présentées pour le moment appartient à la famille des antennes passives ou mono-faisceau, possédant un diagramme de rayonnement fixe. Il existe une autre catégorie qui contient les antennes multifaisceaux agiles ou les antennes à diagramme de rayonnement reconfigurable.

I.2.4. Les antennes agiles

Les antennes agiles sont des antennes qui peuvent changer leurs caractéristiques à l'aide d'un système de contrôle actif. Le but d'utilisation de ces antennes est de rendre plus flexible les systèmes de télécommunications sans fils. De plus, avec ces antennes, un balayage d'un peut être effectué avec un gain élevé.

Les antennes agiles peuvent être classées en deux catégories :

Les antennes agiles en fréquence, où nous pouvons varier la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

Les antennes multifaisceaux agiles en rayonnement, où nous pouvons changer les caractéristiques du rayonnement de l'antenne (direction de pointage, directivité de l'antenne, angle d'ouverture du lobe principal, ...). Ces antennes peuvent être utilisées pour des applications de télécommunications, métrologie (détection d'angles d'arrivée) mais aussi pour des applications RADAR.

Nous allons énumérer quelques types d'antennes multifaisceaux agiles en rayonnement et présenter leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.

1.2.4.1. Les réseaux d'antennes actifs

Le principe de conception de ce type d'antennes multifaisceaux consiste à alimenter un réseau d'antennes élémentaires avec des signaux dont la phase est ajustée à l'aide des éléments actifs de façon à obtenir le diagramme de rayonnement voulu. La Figure I-13 montre des exemples de réseaux d'antennes actifs.

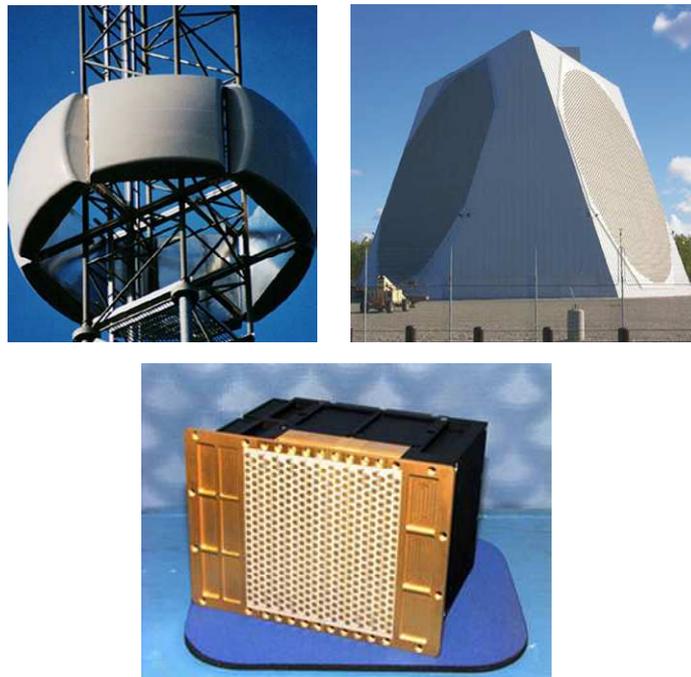


Figure I-13: exemples de réseaux d'antennes actifs

Selon leur nature, les dispositifs actifs (déphaseurs, commutateurs, ...) qui sont connectés aux éléments rayonnants, agissent sur la forme et la direction de l'onde formée. La Figure I-14 montre un exemple d'antenne multifaisceaux agile (a) utilisant des déphaseurs

actifs 4 bits à base de diélectrique (b) avec les diagrammes de rayonnement (c, d) pour deux états de phase [21].

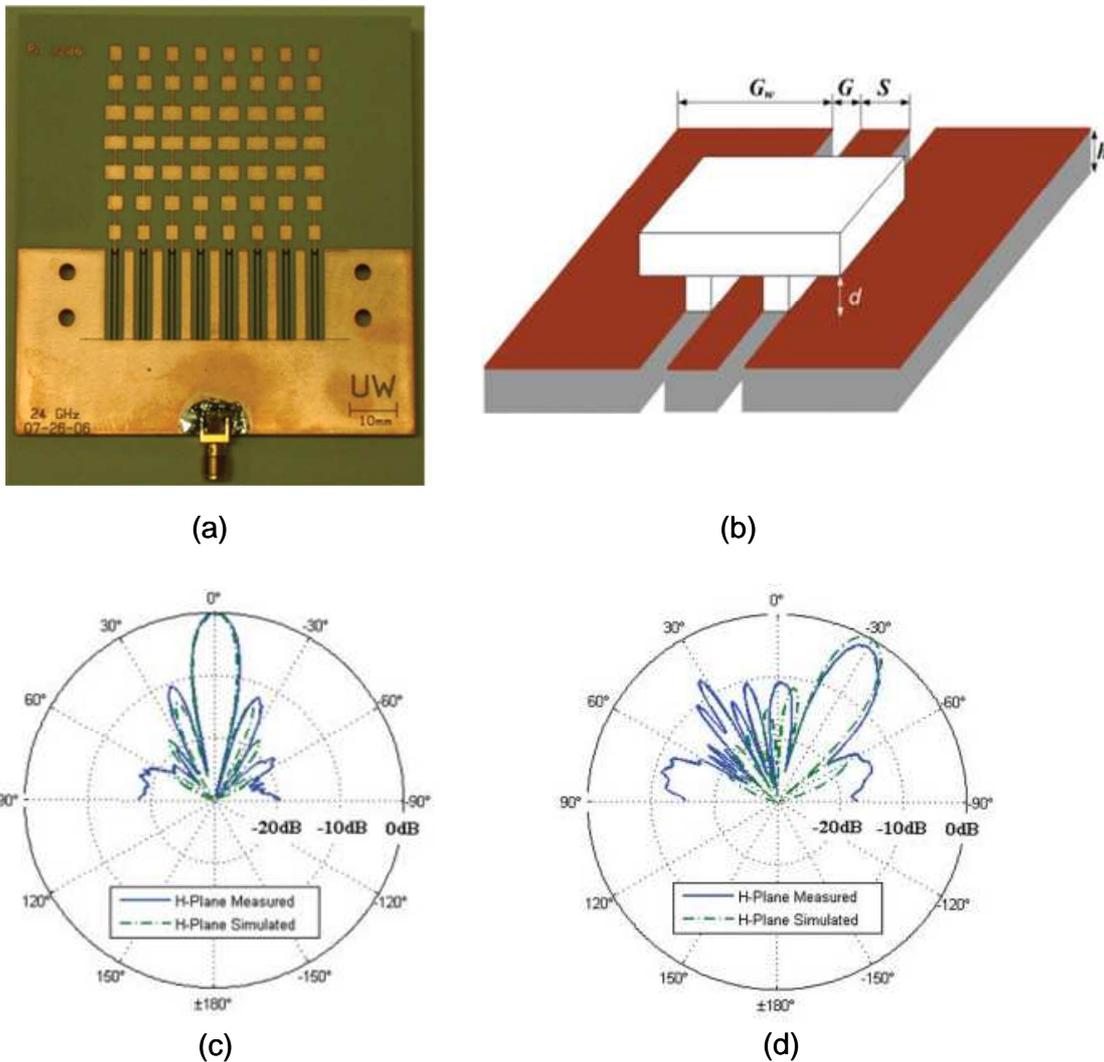


Figure I-14: antenne agile avec exemple de diagramme de rayonnement

Les déphaseurs ramènent au réseau de patches des phases qui dépendent de la distance d entre la plaque de diélectrique et la ligne coplanaire. En effet, la variation de cette distance entraîne une variation de la permittivité effective du substrat et donc de la phase ramenée par les lignes.

Un autre type d'antennes multifaisceaux agiles est le réseau d'antennes alimenté par un réseau de distribution de type « **matrice de BUTLER** ». Une matrice de BUTLER est un système à n entrées, utilisant des coupleurs et lignes à retard, qui sert à imposer un gradient de phase sur le réseau d'antennes. Le nombre de faisceaux produit par le système globale est égal au nombre d'entrée n , tandis que la direction de pointage dépend de l'entrée sélectionnée

[22]. La Figure I-15 montre un exemple d'une antenne multifaisceaux à base de matrice de BUTLER à 3 entrées (a), le commutateur utilisé pour la sélection des entrées (b) et les diagrammes de rayonnement correspondants à chacune des entrées (c).

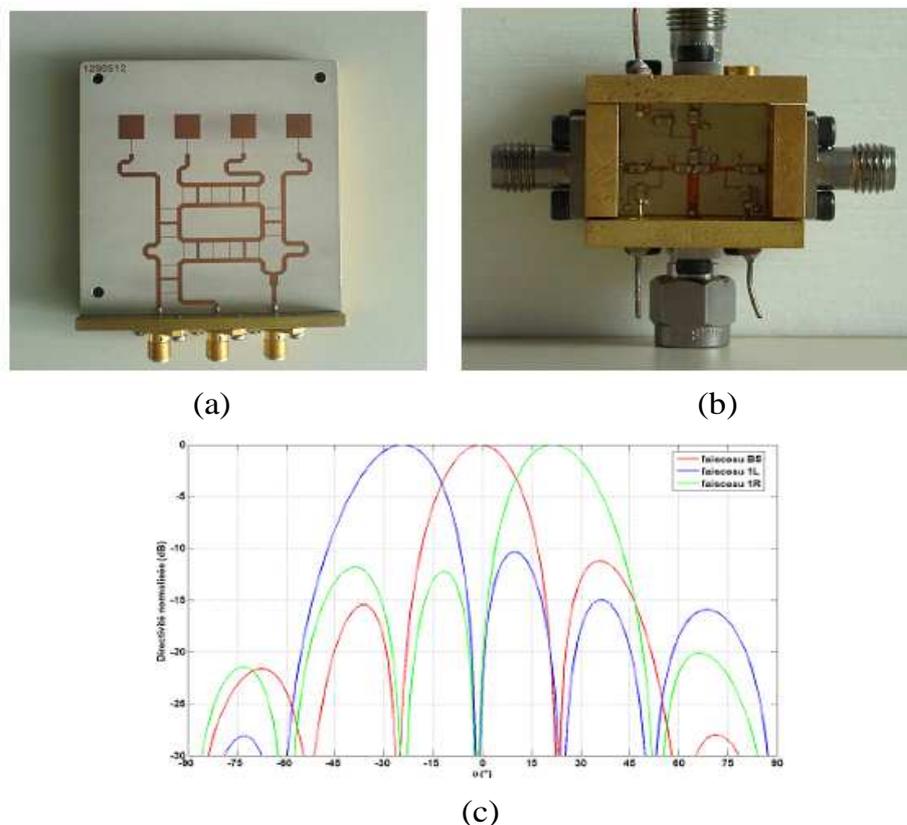


Figure I-15: Antenne agile multifaisceaux réalisée avec son commutateur

1.2.4.2. Les antennes multifaisceaux agiles à résonateur BIE

Les antennes à résonateur BIE peuvent aussi appartenir à la famille d'antennes multifaisceaux. Dans ce type d'antennes nous n'utilisons que des éléments actifs (commutateur, diodes, MEMS RF, ...) pour apporter de l'agilité. Ces éléments sont généralement intégrés dans le matériau BIE.

La Figure I-16.a montre un exemple d'étude d'une antenne à résonateur BIE plane agile. Cette antenne est composée d'une grille active contenant des éléments actifs, et insérée au sein d'une antenne à résonateur BIE plane [23]. La largeur du faisceau émis dépend de la taille de l'ouverture rayonnante qui, quant à elle, est contrôlée par la taille du défaut introduit dans la grille active. Les diagrammes de rayonnement sont illustrés sur la Figure I-16.b.

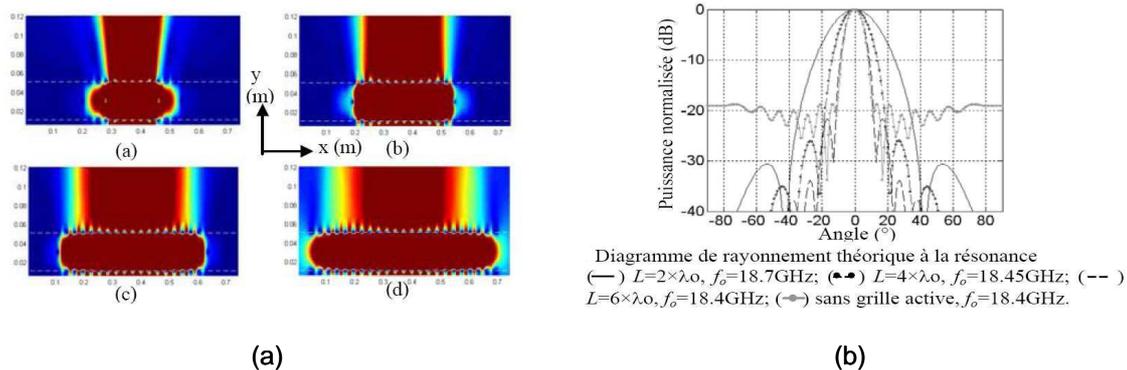


Figure I-16: Antenne agile à résonateur BIE planaire et ses diagrammes de rayonnement

Quant à elles, les antennes à résonateur BIE cylindrique peuvent aussi être agiles. La Figure I-17 montre un exemple d'une antenne multifaisceaux agile. Les diodes PIN qui sont intégrés dans les tiges sont commandées par une tension continue pour contrôler la direction de rayonnement de l'antenne [24].

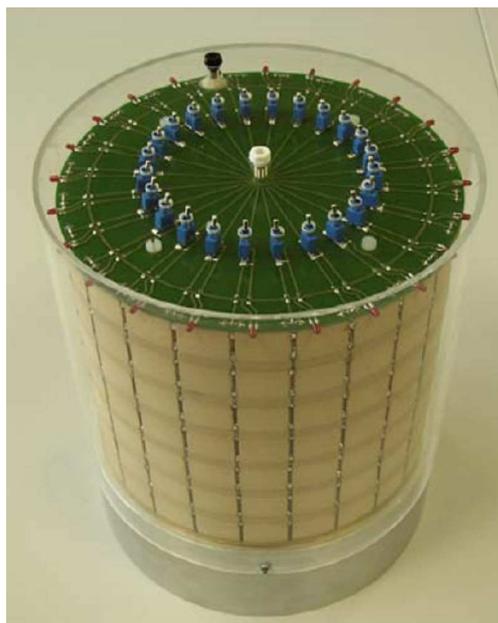


Figure I-17 : Antenne agile à résonateur BIE cylindrique

I.3. Etat de l'art sur les antennes BIE cylindriques

Après avoir cité les différents types d'antennes, nous nous convergeons maintenant vers les antennes à résonateur BIE cylindrique. Avant établir un historique sur ces dernières, nous allons commencer par présenter les propriétés des matériaux BIE ainsi que leurs applications aux domaines des antennes.

I.3.1. Les matériaux BIE

I.3.1.1. Définition

Les matériaux **BIP** (**B**ande **I**nterdite **P**hotonique) ou **BIE** (**B**ande **I**nterdite **E**lectromagnétique) sont des structures diélectriques ou métalliques composées d'un assemblage périodique de deux ou plusieurs matériaux. Cette périodicité peut se présenter dans une, deux ou trois dimensions, sous la forme de plaques (Figure I-18.a), de tiges (Figure I-18.b) et de parallélépipèdes agencés en tas de bois (Figure I-18.c).

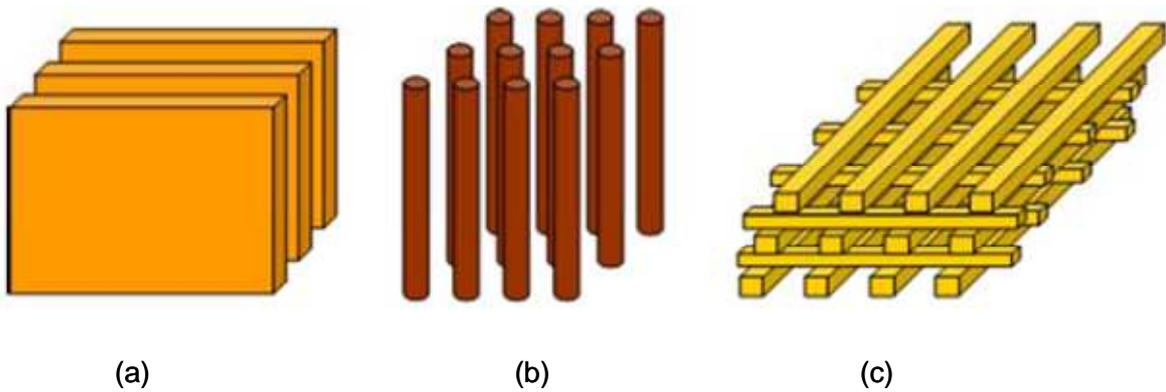


Figure I-18: Différentes structures de matériaux BIE

Ces matériaux ont été étudiés depuis l'année 1915 dans le domaine de l'optique, où le premier matériau BIP a été réalisé par William Laurence Bragg en se basant sur la réflexion d'ondes électromagnétiques. Il a réussi à créer un miroir presque parfait qui permet de renvoyer 99.5% de l'énergie incidente (Figure I-19), en empilant successivement des couches transparentes de matériaux d'indices de réfraction différents. Ce rendement est obtenu quand la longueur d'onde et l'angle d'incidence de l'onde sont accordés avec l'épaisseur des couches constituant le matériau.

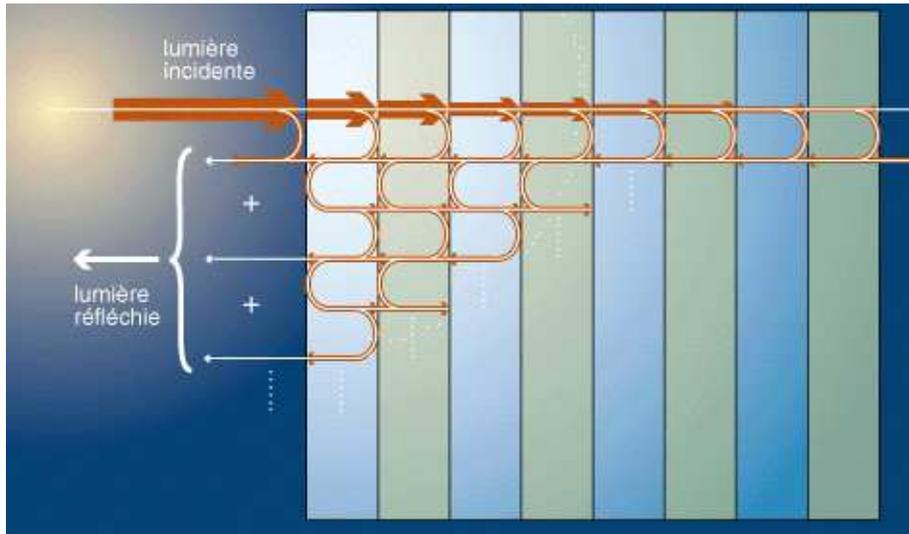


Figure I-19: Principe de miroir de Bragg

En 1987, Eli Yablonovitch généralise l'assemblage périodique unidimensionnel à des structures bidimensionnelles et tridimensionnelles. Il réussit à faire l'approchement entre les propriétés des cristaux solides et des cristaux photoniques, issus respectivement de l'équation de Schrödinger et des équations de Maxwell [25]. Il a ainsi démontré que le pouvoir réfléchissant des structures n'est plus dépendant de l'angle d'incidence de l'onde, et la bande de fréquence interdite est obtenue pour toutes les directions de l'espace.

Dans le domaine des micro-ondes il est possible de caractériser un matériau BIE par son coefficient de transmission. La caractérisation consiste à illuminer par une onde plane, une structure 1D composée de plusieurs plaques espacées périodiquement dont la périodicité et l'épaisseur sont fonction de la longueur d'onde guidée λ_g (Figure I-20).

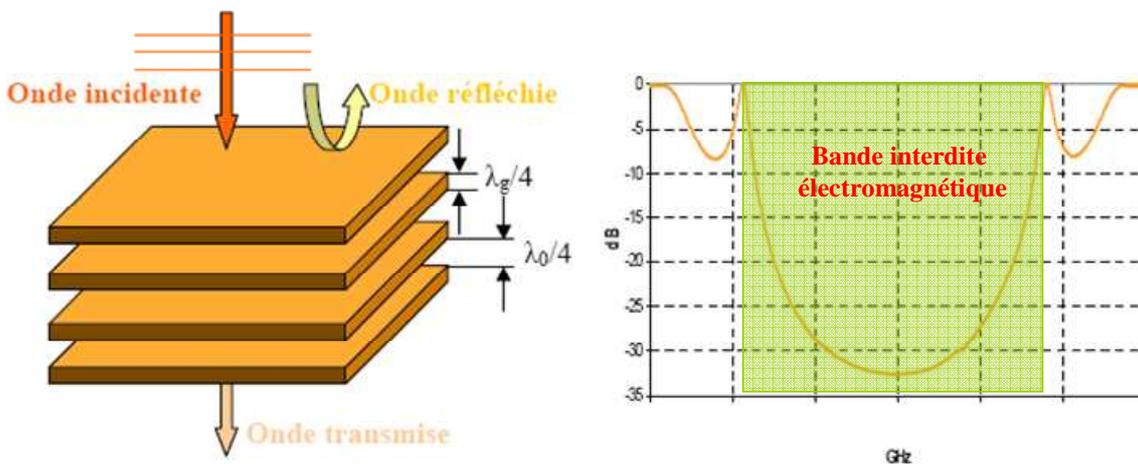


Figure I-20: caractérisation d'un matériau BIE

Le coefficient de transmission présente une bande interdite dont La fréquence centrale est fonction de l'épaisseur des plaques et la permittivité du matériau utilisé. Elle est donnée par l'équation I-1.

$$f_0 = \frac{c}{4 * e * \sqrt{\epsilon r}} \quad \text{Equation I.1}$$

Il est possible de changer les caractéristiques du matériau BIE et plus particulièrement sur son coefficient de transmission en insérant un défaut dans la périodicité.

I.3.1.2. Caractérisation d'un matériau BIE à défaut

L'introduction d'un défaut dans la structure peut être réalisée par la modification des épaisseurs des plaques, leurs permittivités ou encore par la suppression de quelques plaques.

En illuminant la structure BIE à défaut par une onde plane, nous pouvons observer un pic de transmission au centre de la bande interdite à la fréquence f_0 (Figure I-21). Nous arrivons donc, par l'introduction d'un défaut dans la structure, à créer une bande permise dont la fréquence centrale et la largeur dépendent du défaut.

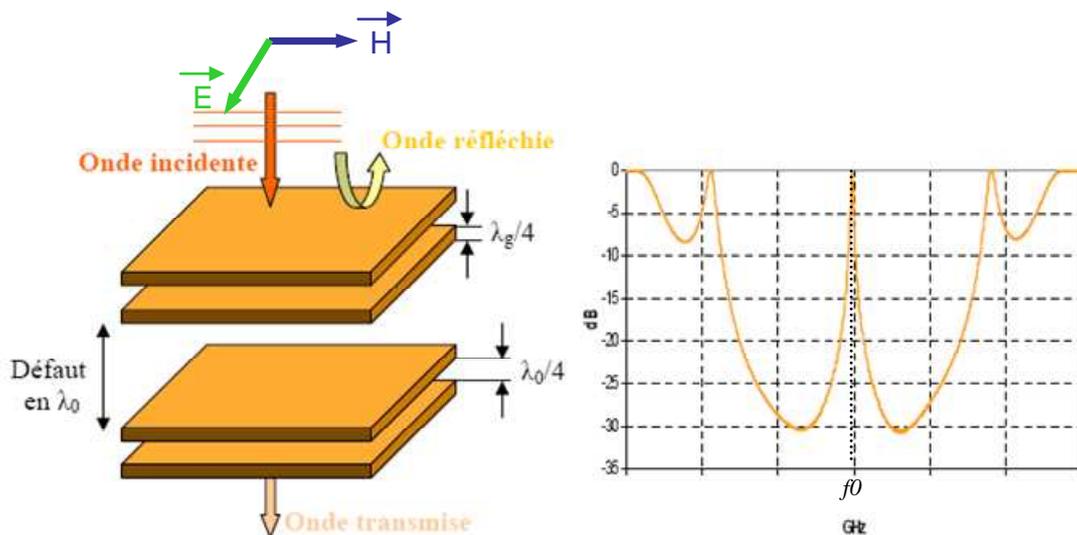


Figure I-21: Caractérisation de la structure BIE à défaut

A partir de ce résultat, nous soulignons la propriété du filtrage fréquentiel des matériaux BIE à défaut.

Nous allons voir dans le paragraphe suivant, que les matériaux BIE à défaut peuvent également réaliser un filtrage spatial en laissant les ondes se propager dans une direction privilégiée. Cette propriété permet à ces matériaux d'être appliqués dans le domaine des antennes.

I.3.2. Application des BIE au domaine des antennes

Après les différentes études effectuées sur les matériaux BIE, l'équipe OSA a mis en évidence le principe d'utilisation d'une structure BIE pour réaliser des antennes à grand gain. Les deux principaux types d'antennes conçues sont l'antenne bi-directive et l'antenne directive.

I.3.2.1. Propriétés du matériau BIE utilisé

On considère un matériau BIE, dans lequel on introduit un défaut de périodicité dans une seule direction (Figure I-21). Si l'on applique les équations de Maxwell dans ce matériau on constate que, pour certaines fréquences, on obtient un filtrage spatial n'autorisant la propagation des ondes que dans la direction perpendiculaire aux lames. Cela correspond à des modes propagatifs suivant cette direction mais évanescents dans la direction radiale. Ainsi sur la Figure I-22 donnant les courbes de dispersion dans une telle structure on observe une région de modes évanescents avec un coefficient d'amortissement α tel que : $\sqrt{k^2 + \alpha^2} = cste$. Ce comportement s'arrête à la fréquence f_0 de coupure des modes propagatifs transversalement (Leaky waves) apparaissant pour les fréquences supérieures à f_0 .

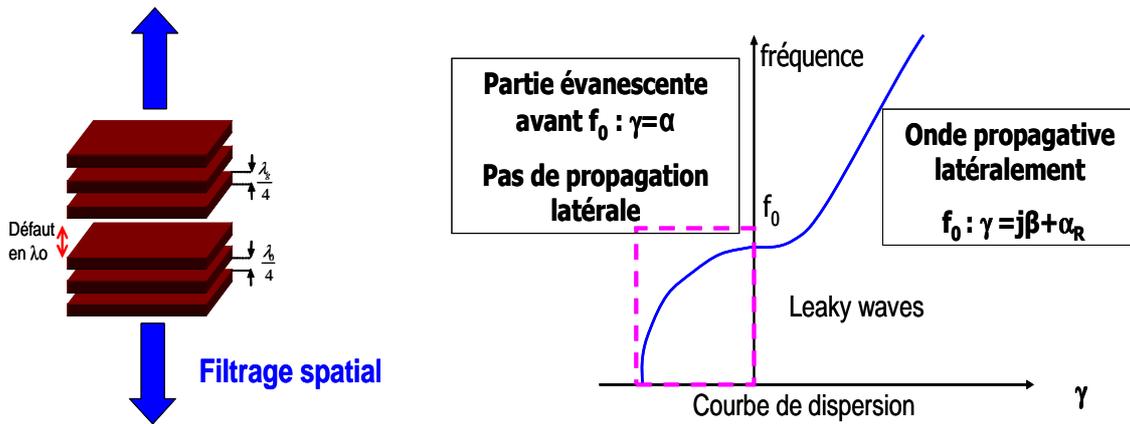


Figure I-22: Courbes de dispersions d'une structure BIE à défaut

I.3.2.2. L'antenne BIE bi-directive

L'antenne BIE directive utilise la totalité de la structure BIE à défaut où une seule direction de propagation est autorisée. Si nous regardons la cartographie de champ électrique dans la structure, nous remarquons que la grande partie de l'énergie se trouve à l'intérieur du défaut (Figure I-23). Ce dernier constitue donc une cavité résonante.

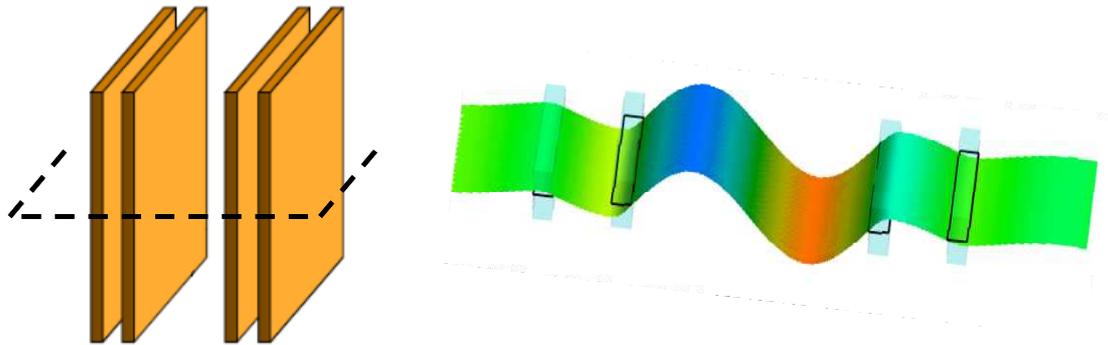


Figure I-23: Répartition du champ électrique dans un matériau BIE à défaut

En insérant une source d'excitation dans la cavité (Figure I-24.a), l'énergie apportée par la source va résonner entre les deux faces du matériau BIE. Ce dernier réfléchit toute l'énergie sauf dans la bande permise. Dans cette bande de fréquence, si les dimensions latérales de l'antenne sont suffisamment grandes, une tâche rayonnante circulaire va se former sur

chacune des faces extérieures du BIE, ce qui va traduire par un diagramme de rayonnement bi-directif. (Figure I-24.b).

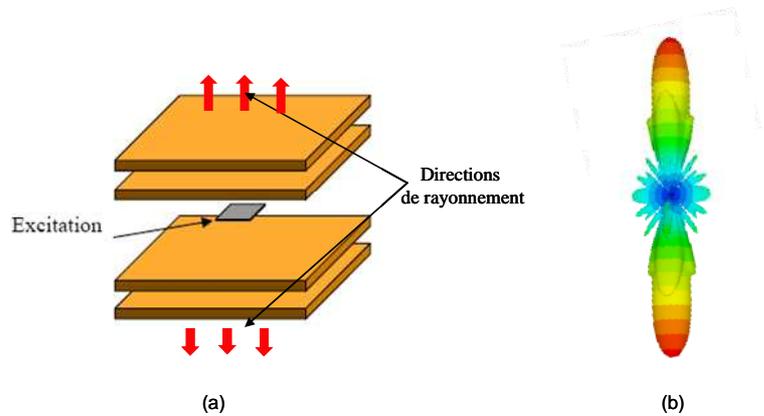


Figure I-24: Antenne BIE bi-directive et son diagramme de rayonnement

1.3.2.3. L'antenne BIE directive

La conception de l'antenne BIE directive est basée sur l'utilisation d'une demi-structure BIE à défaut et la possibilité d'insertion d'un plan de masse au centre de la cavité sans changer la fréquence de résonance de la cavité (Figure I-25). Si nous revenons à la répartition du champ électrique dans la cavité, nous pouvons constater que ce dernier est nul au centre de la cavité, ce qui satisfait aux conditions d'un court circuit électrique. De plus, la répartition du champ est antisymétrique de part et d'autre du centre de la structure, ce qui convient avec le principe des images électriques imposées par le plan de masse.

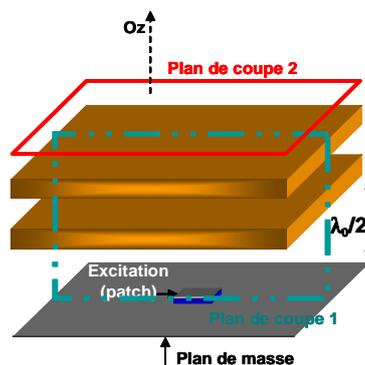


Figure I-25: Géométrie d'une antenne BIE directive

Dans ce cas, l'énergie apportée par la source va résonner entre le plan de masse et le matériau BIE. Ainsi, dans la bande permise, la tache rayonnante va se former sur la face supérieure du matériau BIE, qui se traduit par un rayonnement directif (Figure I-26).

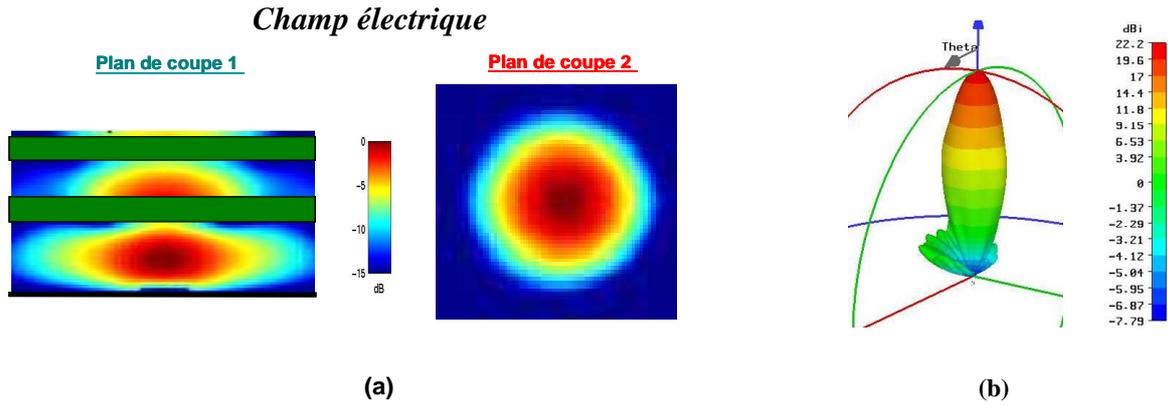


Figure I-26: champ électrique(a) et diagramme de rayonnement 3D (b) de l'antenne BIE directive

I.3.2.4. L'antenne BIE sectorielle

Les antennes BIE sectorielles sont simplement obtenues par la modification de la tâche rayonnante circulaire (Figure I-26.a) vue précédemment. L'évanescence transversale des modes permet, en effet, d'introduire des limites déformant la tâche sans affecter la phase des champs à cet endroit.

On peut donc introduire les formes que l'on veut ; les diagrammes de rayonnement correspondants seront obtenus par transformées de Fourier spatiale.

Ainsi, l'introduction de deux plans métalliques parallèles dans le BIE (Figure I-27.a) donnera une tâche ovale (Figure I-27.b) et donc un diagramme de rayonnement sectoriel (Figure I-27.c).

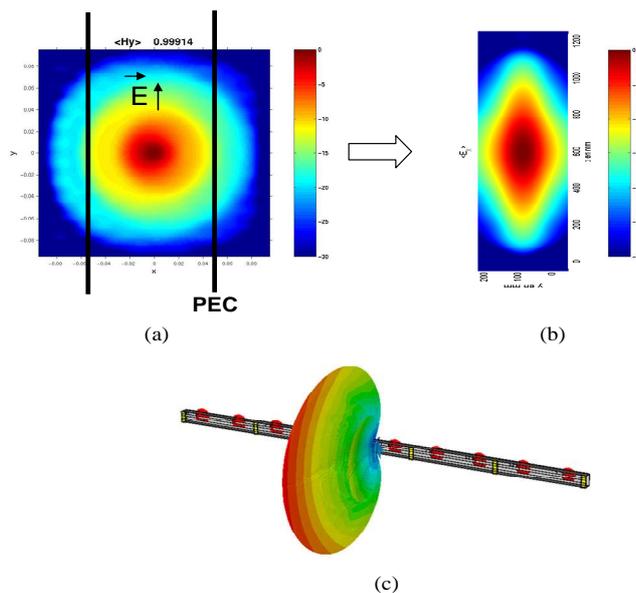


Figure I-27: Passage d'une antenne BIE directive à une antenne BIE sectorielle

I.3.3. Historique des antennes BIE cylindriques

Après avoir présenté les propriétés des matériaux BIE et leurs applications aux domaines des antennes BIE planaires, nous allons maintenant établir un historique des antennes BIE cylindriques.

I.3.3.1. Les antennes BIE omnidirectionnelles en azimut

Bien que les antennes BIE cylindriques aient été revendiquées dans le brevet initial [26], la conception des antennes BIE omnidirectionnelles en azimut a débuté intensivement à Limoges en 2004. En Mai 2004, L. Freytag a proposé des études d'une antenne à matériau BIP à paroi latérale entourant un axe [27, 28]. Ces études ont fait l'objet d'un nouveau brevet [29]. La structure conçue est déduite de l'antenne BIE directive. En courbant cette dernière sur 360°, elle a réussi à concevoir une antenne omnidirectionnelle dite « **coaxiale** » composée d'une âme centrale métallique qui représente le plan de masse et des cylindres diélectriques représentant le matériau BIE planaire (Figure I-28).

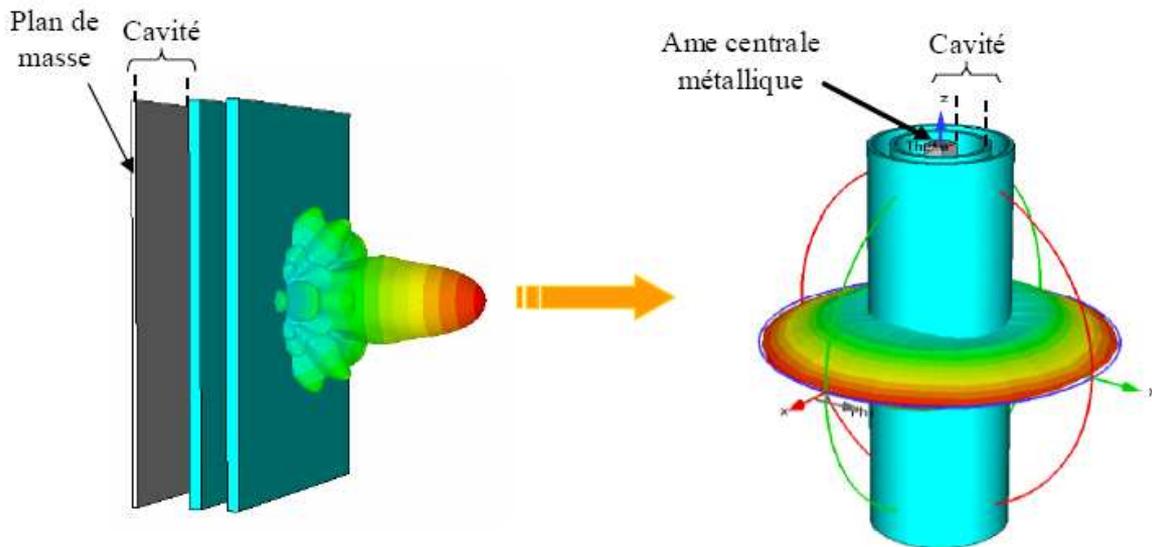


Figure I-28: Méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle

Après plusieurs études sur cette antenne, L. Freytag conclut ses travaux par la réalisation d'un premier prototype [30]. L'antenne réalisée et ses diagrammes de rayonnement sont présentés sur la Figure I-29.

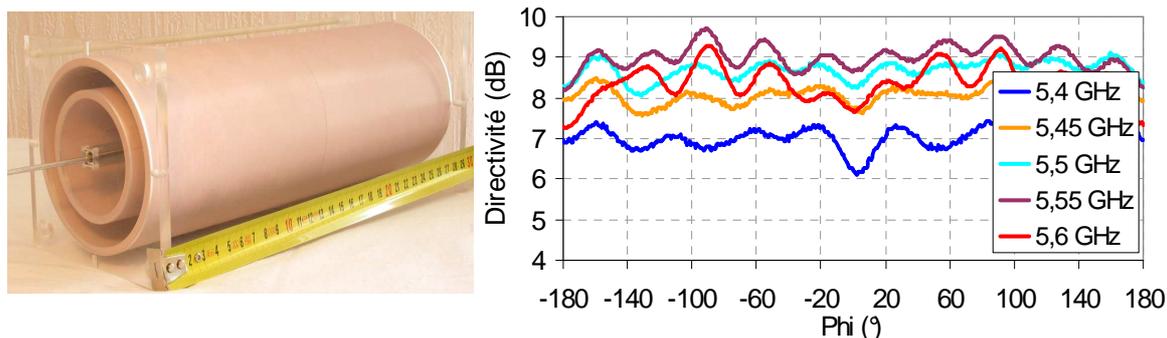


Figure I-29: antenne omnidirectionnelle «coaxiale» réalisée et ses diagrammes de rayonnement

Dans la même année, et en se basant sur le même principe, E. Pointereau réussit à concevoir une antenne BIE omnidirectionnelle « **cylindrique** » [31]. Cette antenne est déduite de l'antenne bi-directive, en repliant à 180° le matériau BIE (Figure I-30).

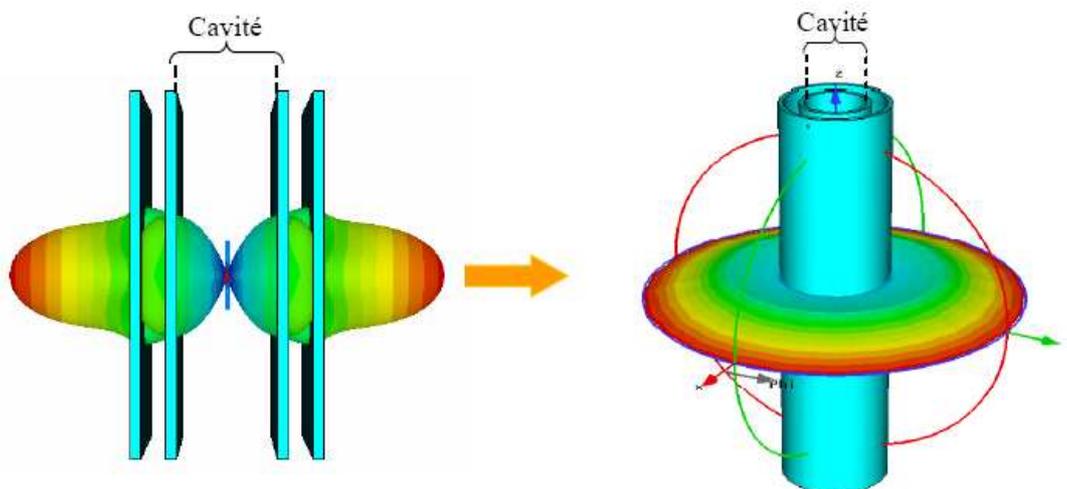


Figure I-30: Méthode de conception de l'antenne BIE cylindrique omnidirectionnelle

Compte tenu des difficultés liées à la mise au point des matériaux diélectriques et de la fabrication de structures diélectriques cylindriques et de leur coût de fabrication, des travaux qui ont ensuite été poursuivis par L. Freytag et E. Pointereau en 2005, ont visé des matériaux BIE métalliques (**BIEM**). Les cylindres diélectriques ont été remplacés par des tiges métalliques [32, 33].

Une première réalisation d'une antenne BIEM cylindrique omnidirectionnelle a été effectuée [34]. Le prototype est présenté sur la Figure I-31.

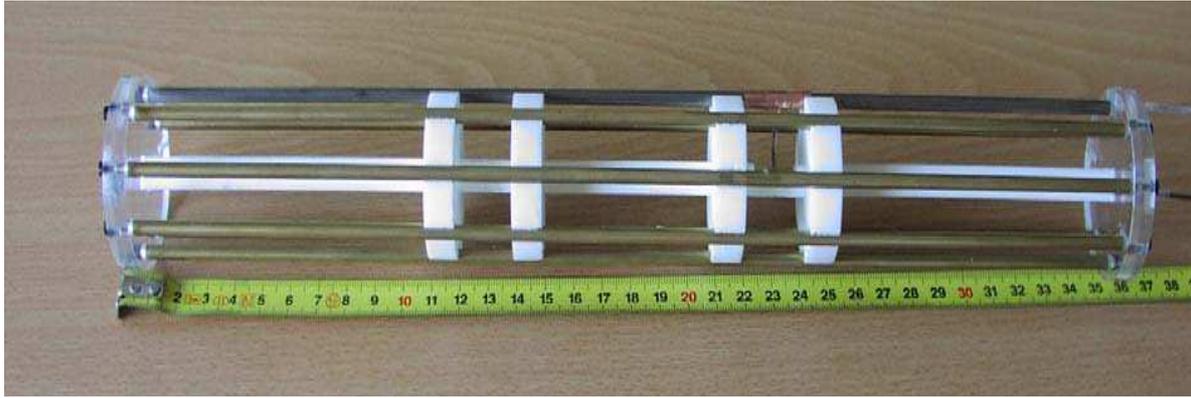


Figure I-31: Antenne BIEM cylindrique omnidirectionnelle réalisée

En 2006 et après plusieurs études faites par H. Chreim sur l'amélioration des performances de l'antenne BIEM coaxiale omnidirectionnelle [35], un prototype a été réalisé. Cette antenne utilise une âme centrale carrée avec des variations de section aux bouts, dans le but d'améliorer la bande passante de l'antenne (Figure I-32).

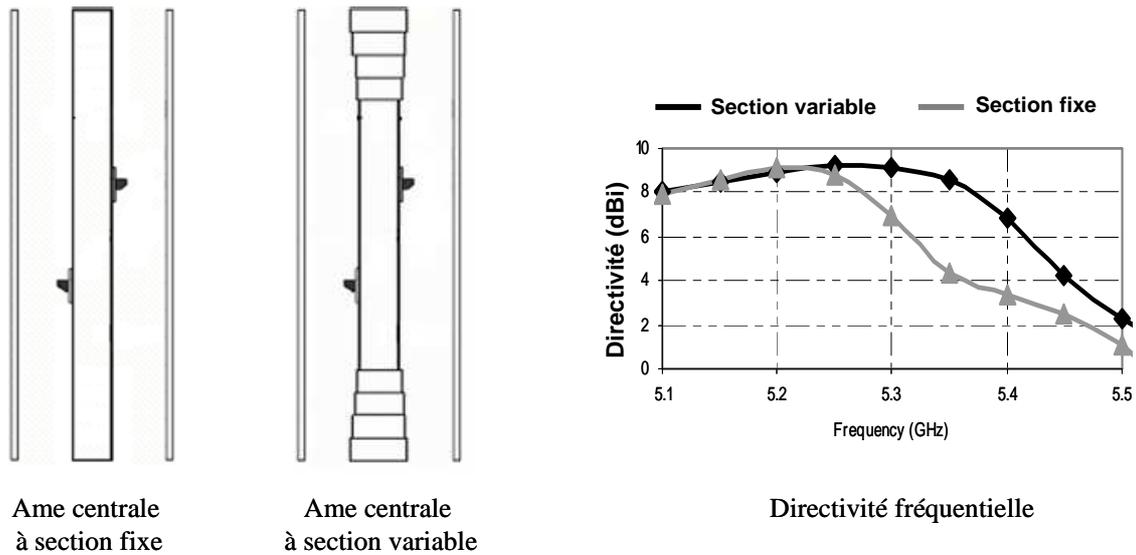


Figure I-32 : Principe d'amélioration de la bande passante de l'antenne BIEM coaxiale omnidirectionnelle

Un prototype a été fabriqué pour valider le principe d'amélioration. L'antenne réalisée et ses diagrammes de rayonnement sont présentés sur la Figure I-33.

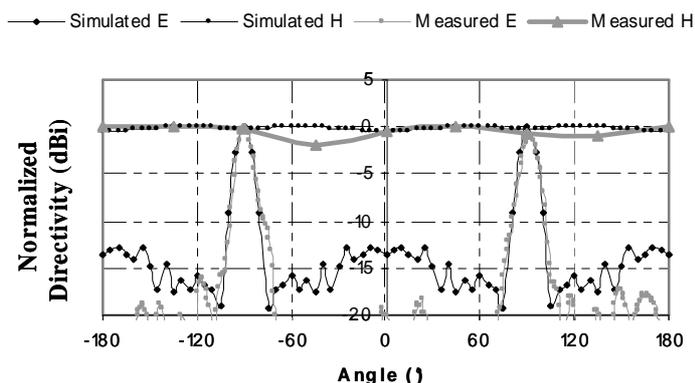
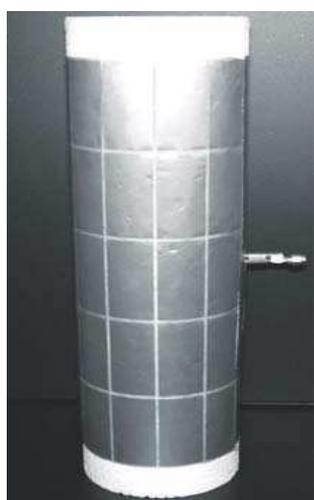
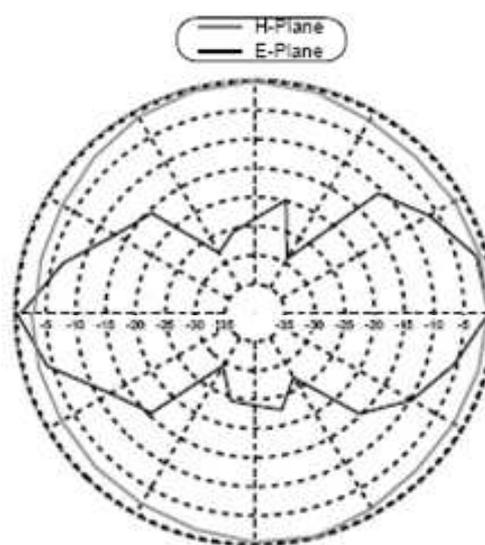


Figure I-33 : Antenne BIEM coaxiale omnidirectionnelle et ses diagrammes de rayonnement

Toujours en 2006, des nouveaux types d'antennes BIEM cylindriques omnidirectionnelles ont été étudiés par G.K. Palikaras de l'université de Loughborough [36]. Le matériau BIE qu'il a choisi pour la réalisation du prototype est composé d'un réseau de patches métalliques (Figure I-34).



Prototype réalisé



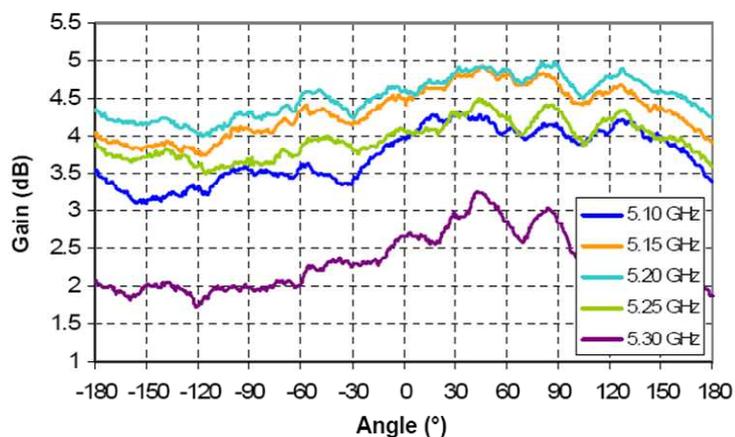
Diagrammes de rayonnement mesurés

Figure I-34 : Antenne BIEM cylindrique omnidirectionnelle étudiée par G.K. Palikaras

En 2007, E. Pointereau poursuit les études des antennes BIEM omnidirectionnelles en exploitant les polarisations de ces antennes. Elle réussit au début à concevoir une antenne BIEM à polarisation horizontale. Le matériau BIE utilisé est composé d'un empilement d'anneaux métalliques (Figure I-35).



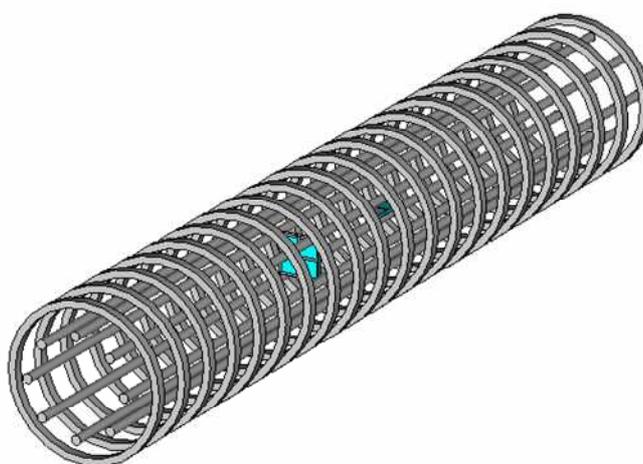
Prototype



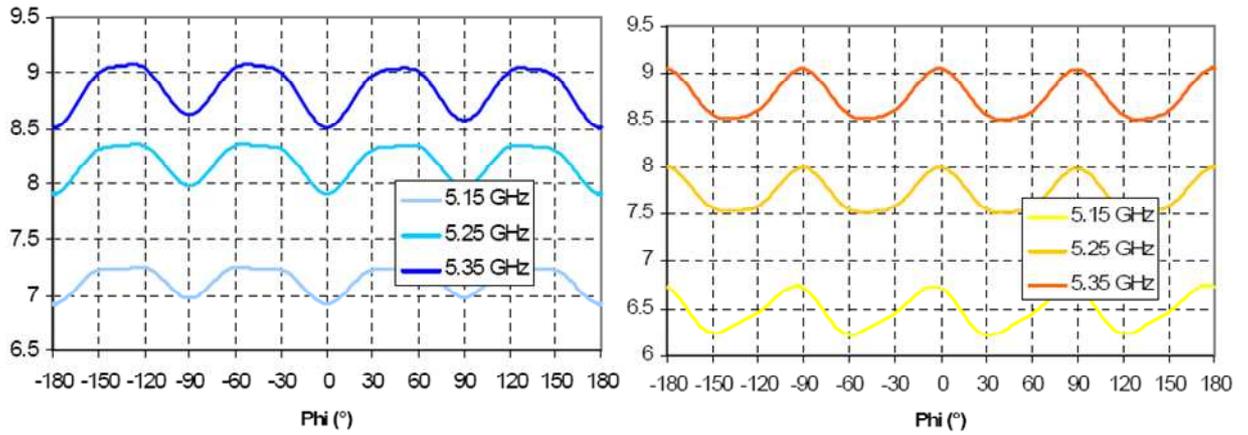
Diagrammes de rayonnement mesurés

Figure I-35: Antenne BIEM coaxiale omnidirectionnelle à polarisation horizontale

Quelques mois après, elle montre qu'en superposant une série de tiges métalliques pour la polarisation verticale avec une série d'anneau métalliques pour la polarisation horizontale, nous arrivons à concevoir une antenne BIEM omnidirectionnelle à double polarisation (verticale et horizontale) [37]. La structure est excitée par deux sources, un dipôle pour la polarisation verticale, et une antenne tourniquet pour la polarisation horizontale. Il faut aussi noter que les deux matériaux BIE utilisés pour les deux polarisations sont transparents l'un par rapport à l'autre. La structure conclue est montrée sur la Figure I-36.



Structure conçue



Diagrammes de rayonnement polar V

Diagrammes de rayonnement polar H

Figure I-36: Antenne BIEM omnidirectionnelle à double polarisation

Pour conclure ses études, E. Pointereau utilise le même matériau BIE de l'antenne à double polarisation, pour concevoir une nouvelle antenne BIEM omnidirectionnelle fonctionnant en polarisation circulaire. Cette nouvelle structure est excitée par une source à polarisation circulaire qui est composée d'une antenne tourniquet surmonté d'un toit métallique. Ce dernier est relié à l'antenne tourniquet par l'intermédiaire d'un fil métallique (Figure I-37). La structure globale conçue est montrée sur la Figure I-38.

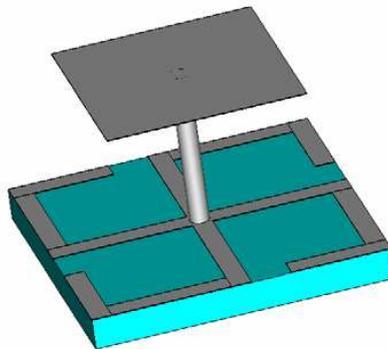
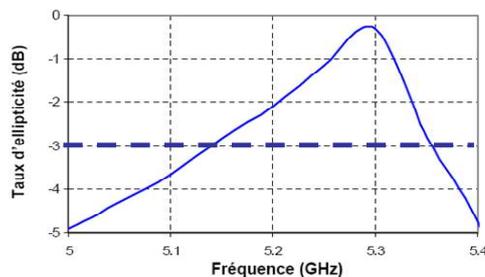


Figure I-37 : source d'excitation à polarisation circulaire



Structure conçue



Taux d'ellipticité

Figure I-38 : Antenne BIEM omnidirectionnelle à polarisation circulaire

Le premier type d'antennes utilisant des matériaux BIE cylindriques ayant été présenté, nous passons à une autre catégorie d'antennes utilisant ces mêmes matériaux : **les antennes BIE cylindrique agiles**. Ce type d'antennes a été étudié dans le but d'avoir un rayonnement reconfigurable dans le plan azimutal.

1.3.3.2. Les antennes BIE cylindrique multifaisceaux agiles

Les matériaux BIE cylindriques ne sont pas utilisés que pour concevoir des antennes à rayonnement omnidirectionnel. En effet, l'intégration des composants actifs dans ce type de matériau peut apporter de l'agilité au rayonnement de l'antenne dans le plan azimutal. Plusieurs études ont conduit à la conception des antennes BIE cylindriques multifaisceaux agiles, dont nous allons présenter quelques unes.

En 2004, H. Boutayeb de l'équipe IETR de l'université de Rennes, fait une étude détaillée sur les matériaux BIE cylindrique reconfigurable [38]. Il réussit à concevoir une antenne BIE cylindrique multifaisceaux agile (Figure I-39).



Figure I-39: Antenne BIE cylindrique agile réalisée à l'IETR de Rennes

Le matériau BIE reconfigurable utilisé est composé d'une rangée de tiges discontinues imprimées périodiquement sur un cylindre de mousse de permittivité 1.2, entourant un monopole qui présente la source d'excitation. Des diodes PIN qui sont insérées aux niveaux des discontinuités des tiges, sont contrôlées par une commande de tension continue. Quand

les diodes sont en état ON, les tiges se comportent comme un réflecteur. A l'état OFF, un défaut est créé où les tiges deviennent transparentes par rapport à l'onde. Ainsi, en contrôlant le nombre ou la position de défauts, l'antenne peut changer la direction du pointage du lobe ou son angle d'ouverture.

En 2007, et en se basant sur le même principe, M.A. Habib conçoit une antenne BIE multifaisceaux reconfigurable. Dans son cas, le matériau BIE est illustré par des plaques de diélectrique, sur lesquelles des lignes micro-ruban discontinues sont imprimées, et des éléments actifs contrôlables se trouvent au niveau des discontinuités. Les états des lignes micro-ruban (transparentes ou opaques par rapport l'onde) dépendent de celles des éléments actifs d'où la direction de rayonnement est changeable selon la position du défaut [39]. La structure conçue et les diagrammes de rayonnement correspondants à des différentes positions de défauts sont montrés sur la Figure I-40.

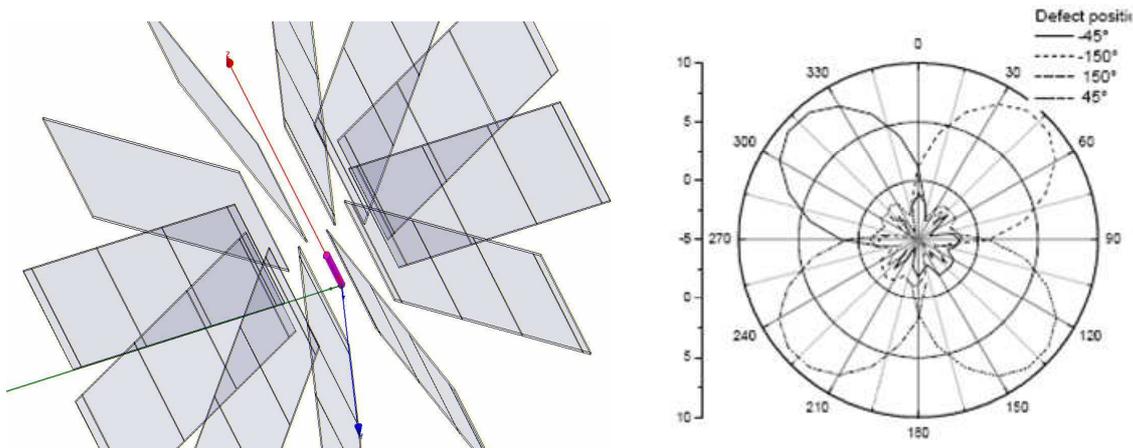


Figure I-40: Antenne BIE reconfigurable à base de lignes micro-ruban et ses diagrammes de rayonnement

I.4. Présentation du sujet de thèse

Après avoir accompli l'état de l'art sur les antennes BIE cylindriques, nous présentons dans ce paragraphe les principaux objectifs visés pour cette thèse.

Les travaux réalisés dans l'équipe OSA d'XLIM sur les matériaux BIE cylindriques concernaient les antennes BIE à rayonnement omnidirectionnel en azimut. Cependant, ces antennes présentaient un problème de gain limité qui ne dépasse pas 10 dB, vu que leur rayonnement couvrait les 360° du plan horizontal.

Le sujet principal de ce mémoire de thèse s'inscrit dans la conception d'antennes **BIE multifaisceaux** dans le plan horizontal, dans le but d'obtenir une couverture omnidirectionnelle dans le plan horizontal mais avec un gain beaucoup plus élevé. La première solution préparée s'inspire des structures BIE coaxiales omnidirectionnelles munies d'une âme centrale dont les dimensions sont petites devant la longueur d'onde. La première tâche de notre travail consiste à sectoriser le rayonnement omnidirectionnel de cette antenne pour avoir une couverture sectorielle mais avec un gain plus important, le gain étant inversement proportionnel aux angles d'ouvertures (Equation I.2)

$$G = \frac{36000}{O_{hor} \cdot O_{ver}} \quad \text{Equation I.2}$$

Où O_{hor} et O_{ver} sont les angles d'ouvertures dans le plan horizontal et vertical respectivement

Pour avoir un rayonnement sectoriel, il suffit d'agrandir les dimensions de l'âme centrale pour que le champ soit évanescant avant son installation complète autour de l'âme centrale (Figure I-41). Ainsi, la nouvelle structure BIE coaxiale aura un rayonnement sectoriel, couvrant une partie du plan horizontal mais avec un gain plus important. Enfin, pour établir la couverture totale du plan horizontal, nous utiliserons plusieurs sources d'excitation placées autour de l'âme centrale, et alimentées séparément à l'aide d'un système de commutation pour reconstituer le rayonnement omnidirectionnel avec un gain élevé.

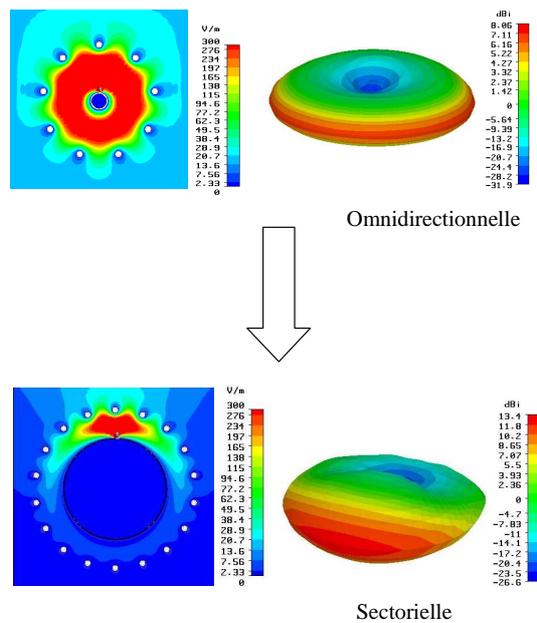


Figure I-41: Obtention de l'antenne BIE coaxiale sectorielle à partir de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle

Pour ce type d'antennes, nous risquons de rencontrer un problème de couplage entre les différentes sources, surtout quand le nombre de ces dernières augmente. Ce couplage est dû aux réflexions multiples à l'intérieur de la cavité BIE coaxiale. Pour pallier à ce problème, des murs métalliques peuvent être insérées entre les différentes sources d'excitation. Ainsi, la Figure I-42 présente un **réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles** (cf. paragraphe I.3.2.4) où chacune des antennes BIE sectorielles couvre un secteur. On ne peut pas parler dans ce cas de BIE coaxial car les modes coaxiaux sont éliminés par les murs métalliques.

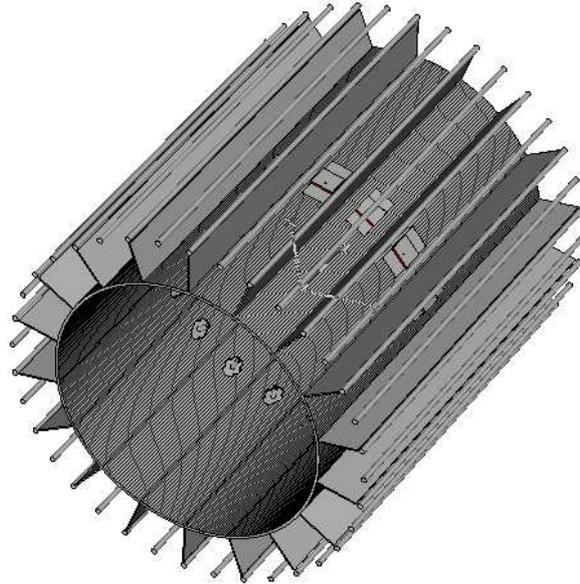


Figure I-42: Réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles

La largeur du faisceau dans le plan horizontal est alors un paramètre que nous pouvons changer en excitant un ou plusieurs secteurs dans le but d'avoir un faisceau large ou étroit selon l'application visée. La directivité peut aussi être améliorée en augmentant le nombre de source dans le plan vertical dans chaque secteur dans le but d'augmenter la portée de l'antenne.

Quelque soit l'application visée, un système de commutation est indispensable pour assurer l'agilité de l'antenne dans le plan horizontal.

I.5. Moyens mis à disposition

I.5.1. Le logiciel de simulation CST Microwave Studio

Les simulations électromagnétiques des antennes étudiées, ont été réalisées à l'aide du logiciel commercial de simulation *CST Microwave Studio*. Deux versions ont été utilisées : la version 2006B et la version 2008.

Le logiciel *CST Microwave Studio* est un outil spécialisé pour la simulation électromagnétique 3D de composants de haute fréquence [40]. Il est basé sur la combinaison de l'approximation des conditions aux limites par la méthode PBA (Perfect Boundary Approximation) et de la technique d'intégration finie FIT (Finite Integration Technique) [41].

L'intérêt de ce logiciel est la méthode utilisée pour le maillage des structures. L'utilisateur précise la taille des mailles par rapport à la longueur d'onde et un ratio entre la plus grande maille et la plus petite. Ensuite le logiciel choisit habilement les endroits nécessitant plus ou moins de cellules. Bien entendu, l'utilisateur peut aussi forcer le maillage sur des dimensions particulières si cela avère nécessaire. Ce processus de maillage variable réduit considérablement le nombre total de mailles.

I.5.2. La base de mesures du laboratoire XLIM

La Figure I-43 est une photographie de la base de mesure du laboratoire d'XLIM. Elle est appelée « *Chambre Anéchoïque* ».

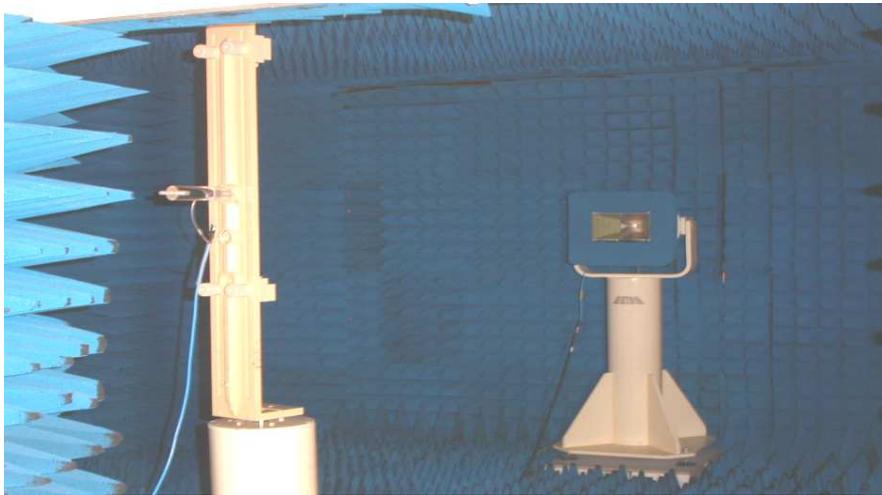


Figure I-43: Photographie de la base de mesure du laboratoire XLIM

Les mesures en rayonnement d'une antenne doivent se faire en espace libre, c'est pour cela que toutes les interfaces de la chambre sont couvertes par des absorbeurs pour éviter toutes les perturbations électromagnétiques.

Les dimensions de la chambre (**6m x 4.8m x 2.8m**) permettent de disposer l'antenne sous test en champ lointain par rapport à l'antenne cornet qui est l'antenne de référence dans une marge de fréquence allant de **500MHz** jusqu'à **18GHz**.

L'analyseur vectoriel **WILTRON360** permet de mesurer précisément les différents paramètres en fonction de la fréquence pour une marge fréquentielle allant de **10MHz** jusqu'à **40GHz**.

Un parmi ces paramètres est le coefficient de réflexion « **S11(f)** » mesuré en module et en phase. La mesure de ce paramètre est appelée la *mesure en adaptation*.

La méthode qui permet la mesure du coefficient de réflexion consiste à relier la sortie de l'analyseur « **RF out** » à l'entrée d'un coupleur directif sur lequel l'antenne sous test est fixée. La sortie du coupleur est reliée à une des entrées de l'analyseur « **TA** » (Figure I-44).

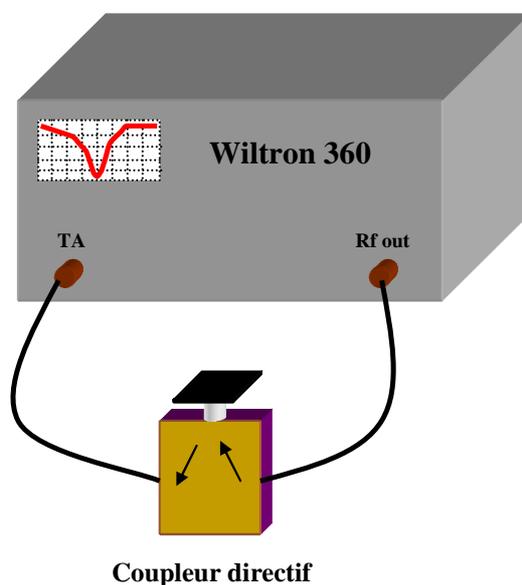


Figure I-44: Montage utilisé pour mesurer le coefficient de réflexion

La mesure se fait quand l'analyseur envoie une onde vers le coupleur directif qui va la transmettre vers l'antenne sous test. L'onde réfléchie est transmise par le coupleur vers l'entrée de l'analyseur. L'analyseur va calculer la différence entre l'onde transmise et l'onde réfléchie ce qui permettra d'en déduire le coefficient de réflexion S11.

La mesure en rayonnement de l'antenne est effectuée en utilisant le banc comprenant deux antennes, l'une en émission et l'autre en réception où l'antenne émettrice est l'antenne sous test (Figure I-45).

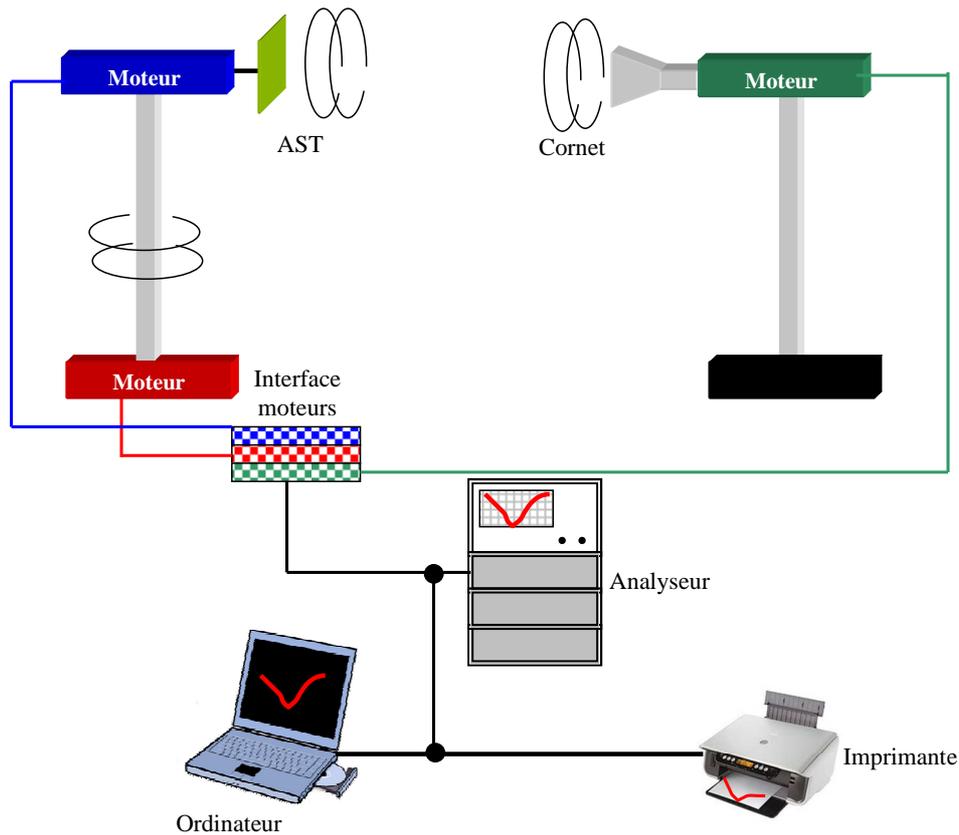


Figure I-45: Dispositif expérimental pour caractériser le rayonnement d'une antenne

Dans la chambre de mesure on trouve deux piédestaux. Sur l'un est placée l'antenne sous test et sur l'autre est fixé l'antenne de référence. L'antenne de référence est un cornet travaille de **1 à 12GHz** en polarisation linéaire. Cette antenne peut tourner d'un angle de **180°** pour mesurer les différentes polarisations de l'antenne sous test. Quant à elle, l'antenne sous test peut tourner de **360°** autour de son axe pour mesurer le rayonnement dans les différents plans de coupe. Ainsi on peut déterminer le diagramme de rayonnement dans un plan de coupe pour une polarisation donnée en mesurant l'atténuation entre le signal émis et le signal reçu. L'ensemble de ce dispositif est contrôlé par l'ordinateur à l'aide du logiciel LABVIEW.

Le gain de l'antenne est calculé simultanément avec la mesure du diagramme de rayonnement par comparaison entre le signal émis et le signal reçu. L'atténuation α est calculée en utilisant la formule de FRIIS :

$$\alpha = Gr.Grc \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \cdot \rho \quad \text{Soit} \quad Gr = \frac{\alpha}{Grc \cdot \rho} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

Avec G_r : Gain réalisé de l'antenne sous test dans la direction du cornet
 G_{rc} : Gain réalisé du cornet dans son axe
 R : Distance entre l'antenne sous test et le cornet
 λ : Longueur d'onde de fonctionnement dans l'air
 ρ : Rendement de polarisation

Les quatre derniers paramètres étant connus, la mesure de α fournit la valeur de G_r .
Tenant compte d'une désadaptation de l'AST, l'obtention du gain réalisé de l'AST nécessite une évaluation de la réflexion à l'entrée :

$$Ga = \frac{Gr}{1 - |S11|^2}$$

I.6. Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de présenter le contexte général dans lequel s'inscrivent les travaux effectués durant cette thèse. Nous avons pu jeter un coup d'œil sur les différents types d'antennes suivant leurs types de rayonnement, leur agilité mais aussi les applications auxquelles sont adéquates.

Un état de l'art sur les matériaux BIE et leurs applications dans le domaine des antennes a ensuite été exposé dans la deuxième partie de ce chapitre. Un historique sur les antennes BIE cylindriques nous a permis de dégager les objectifs poursuivis durant cette thèse.

Dans la dernière partie, ont été présentés les différents moyens, tant numériques qu'expérimentaux qui nous ont servi à accomplir nos différentes tâches et mener à bien ces travaux.

CHAPITRE II

Méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux. Application à une antenne BIE coaxiale agile 4 x 90°

- ❖ Méthode de conception d'une antenne BIE coaxiale multifaisceaux
- ❖ Etude de l'antenne BIE coaxiale sectorielle en fonction de la fréquence
- ❖ Influence des paramètres physiques de l'antenne BIE coaxiale sectorielle
- ❖ Conception d'une antenne BIE coaxiale multifaisceaux 4x90°
- ❖ Augmentation du nombre de sources dans le plan horizontal

II.1. Introduction

Le fort développement des réseaux de télécommunications sans fils nécessite **des antennes** de station de bases à **diagramme de rayonnement reconfigurable**. Ces antennes sont capables de changer leurs caractéristiques de rayonnement suivant les besoins des abonnés.

Les études effectuées sur les matériaux à Bande Interdite Electromagnétique (BIE) cylindriques, ont conduit à la conception des antennes **omnidirectionnelles en azimut**. Cependant, le gain de ces antennes reste limité. Dans ce chapitre, nous montrerons qu'il est possible d'utiliser la structure BIE coaxiale omnidirectionnelle pour concevoir des **antennes multifaisceaux** dans le but d'avoir une couverture omnidirectionnelle avec un gain plus important.

Dans la première partie de ce chapitre, la **méthode de conception** de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux sera expliquée. Nous commencerons par l'étude d'une antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle de référence, avant montrer les modifications à appliquer sur cette antenne pour obtenir l'antenne BIE coaxiale sectorielle et en déduire l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux finale avec son agilité.

La deuxième partie s'attachera à l'étude de la nouvelle structure conçue en fonction de la fréquence. Le **fonctionnement** sera expliqué, et les principales caractéristiques en impédance, distribution de champ et rayonnement seront exposées en fonction de la fréquence.

Une fois le principe de fonctionnement est bien assimilé, **l'influence des différents paramètres physiques** de l'antenne sur ses performances sera étudiée. Des variations des valeurs de ces différents paramètres seront effectuées pour observer l'évolution des performances de l'antenne (cartographies de champ électrique, diagramme de rayonnement, directivité,...)

La conception d'une antenne **BIE coaxiale multifaisceaux 4*90°** fera l'objet de la troisième partie de ce chapitre. Le recoupement entre les faisceaux sera étudié pour **reconstruire le rayonnement omnidirectionnel**. Finalement, nous présenterons **les**

avantages de l'antenne conçue par rapport à l'antenne BIE omnidirectionnelle étudiée dans la première partie.

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à **l'analyse de l'impact de l'augmentation de nombre de sources dans le plan horizontal** sur les performances de l'antenne. Cette étude sera effectuée en tenant compte de la nature du **système de commutation** de l'antenne et en faisant varier le nombre de sources dans le plan horizontal.

II.2. Méthode de conception d'une antenne BIE coaxiale multifaisceaux

Dans ce paragraphe, nous allons voir comment obtenir une antenne BIE coaxiale multifaisceaux à partir d'une antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle. Les structures que nous allons présenter sont toutes coaxiales (utilisant une âme centrale), et à base de matériaux BIE métalliques (BIE) en polarisation verticale. Nous allons donc commencer par étudier une antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle de référence et discuter ses performances.

II.2.1. Présentation de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la conception de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle est basée sur l'analogie avec la structure planaire directive. Une antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle est composée généralement de trois éléments principaux (Figure II-1) :

Une âme centrale de section carrée ou circulaire jouant le rôle d'un plan de masse.

Une distribution cylindrique périodique de tiges métalliques autour de l'âme centrale, formant ainsi une cavité coaxiale résonante.

Une ou plusieurs sources d'excitation de la cavité.

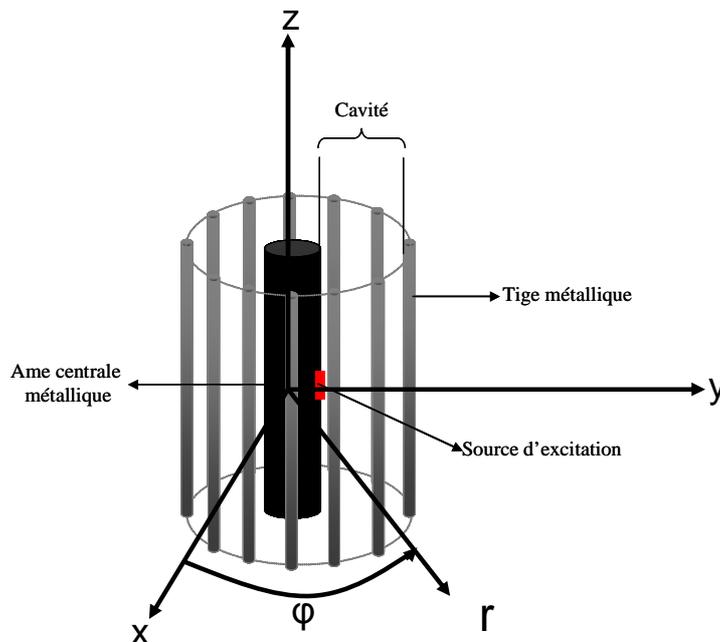


Figure II-1: Schéma de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle

La source rayonnante va exciter le résonateur coaxial sur un mode BIE coaxial à la fréquence de coupure des modes propagatifs en ϕ . Une partie de l'énergie apportée par la source est transmise et une autre est réfléchiée. L'énergie transmise est alors rayonnée (Figure II-2). Elle est à l'origine de la tâche rayonnante formée sur la surface du matériau BIE.

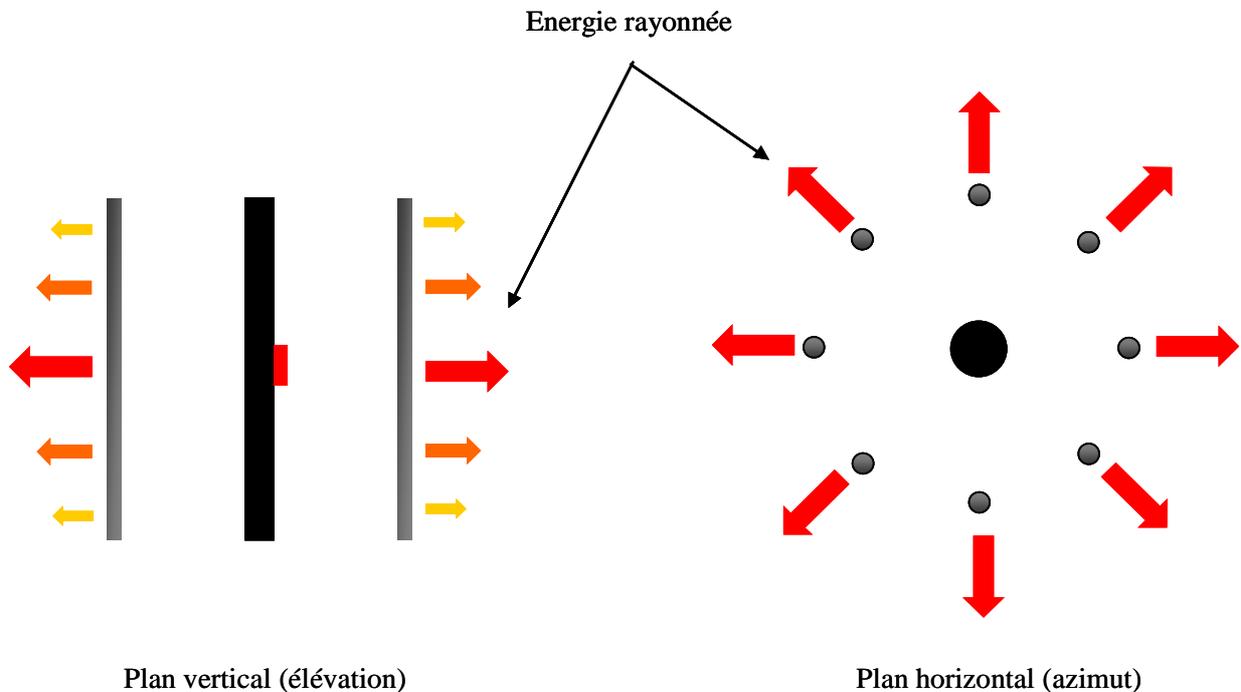


Figure II-2: Principe de fonctionnement de l'antenne BIE coaxiale en polarisation verticale

Le diagramme de rayonnement de l'antenne est le résultat de la transformée de Fourier spatiale de la tâche rayonnante formée sur la surface du matériau BIE. Pour pouvoir comprendre le fonctionnement de l'antenne, Il est important d'observer le comportement du champ. D'après la théorie des ouvertures rayonnantes, plus la taille de la tâche est importante, plus le lobe de rayonnement est pincé. Dans le plan vertical de l'antenne, le champ est évanescent en z (Figure II-3.a). Dans le plan horizontal le champ n'est pas évanescent en ϕ mais il est réparti quasi-uniformément autour de l'âme centrale (Figure II-3.b), d'où le rayonnement omnidirectionnel obtenu (Figure II-3.c).

Pour une antenne omnidirectionnelle, la variation du gain dans le diagramme de rayonnement du plan horizontal (ondulations) à une fréquence donnée doit être inférieure à 3 dB.

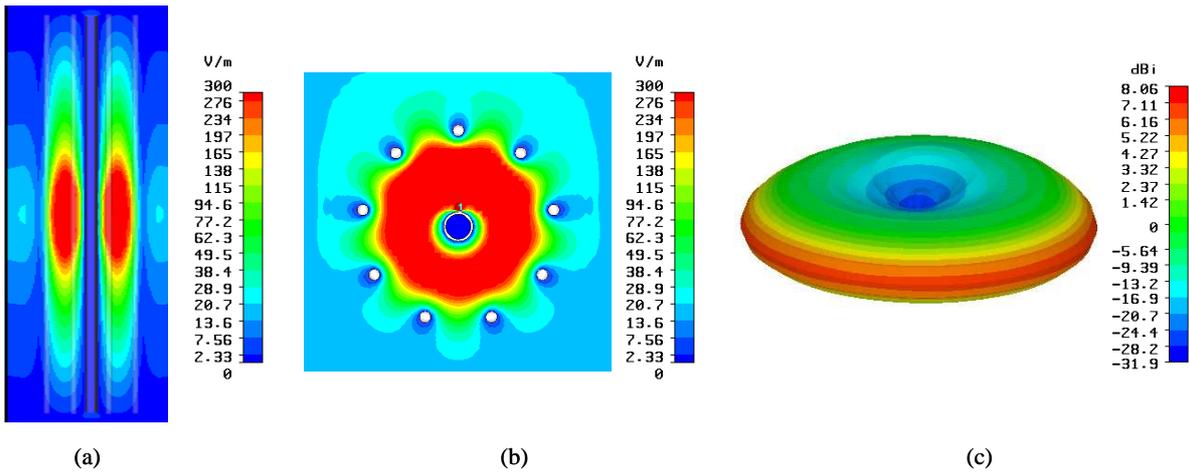


Figure II-3: Cartographies de champ électrique et le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne BIE omnidirectionnelle en polarisation verticale

II.2.2. Antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle de référence étudiée

II.2.2.1. Dimensionnement de l'antenne

Pour obtenir un fonctionnement optimal de l'antenne, il faut tout d'abord dimensionner la structure de façon adéquate. La structure étudiée est présentée sur la Figure II-4.

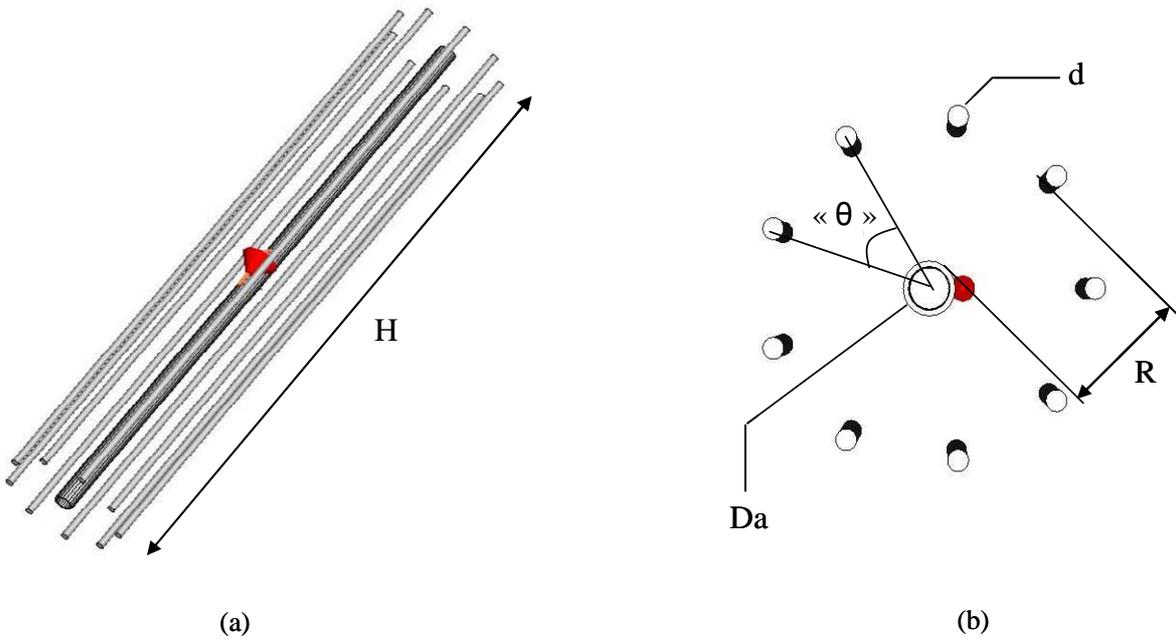


Figure II-4: Antenne BIE omnidirectionnelle à polarisation verticale étudiée.

Comme nous l'avons déjà expliqué, l'énergie apportée par la source d'excitation résonne radialement entre deux interfaces, celle des tiges métalliques et celle de l'âme centrale. En effet, la fréquence de fonctionnement de l'antenne dépend de la phase du coefficient de réflexion sur la surface des tiges métalliques et celle de l'âme centrale, nous pouvons donc utiliser la formule établie par Trentini (Equation II-1) pour calculer la distance R entre l'âme centrale et les tiges métalliques [42].

$$R_{(f_0)} = \frac{C}{2f_0} \left(\frac{\phi_{\hat{a}me} + \phi_{BIE}}{2\pi} \right) \quad \text{Equation II-1}$$

Où :

C : La vitesse de la lumière

f_0 : La fréquence de fonctionnement

$\phi_{\hat{a}me}$: Phase du coefficient de réflexion sur l'âme centrale

ϕ_{BIE} : Phase du coefficient de réflexion sur la surface des tiges métalliques

L'âme centrale étant métallique, la phase du coefficient de réflexion sur sa surface est égale à π . Ainsi, l'équation II-1 devient :

$$R_{(f_0)} = \frac{C}{2f_0} \left(\frac{1}{2} + \frac{\phi_{BIE}}{2\pi} \right) \quad \text{Equation II-2}$$

D'un autre coté, les tiges métalliques sont définies par leur taux remplissage τ , qui dépend du diamètre des tiges d , celui de l'âme centrale Da la périodicité angulaire des tiges « θ » (aussi rattachée au nombre de tiges utilisées). Le taux de remplissage est exprimé par l'équation II-3.

$$\tau = \frac{d}{2 * \left(\frac{Da}{2} + R + \frac{d}{2} \right) * \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad \text{Equation II-3}$$

La variation du taux de remplissage des tiges entraine un changement de la phase du coefficient de réflexion sur leur surface, mais aussi de la fréquence de fonctionnement. Ainsi, si nous changeons le nombre des tiges et/ou leur diamètre, il faudra recalculer la distance R entre l'âme centrale et les tiges métalliques pour revenir à la fréquence de fonctionnement f_0 .

Les dimensions de la structure étudiée ont été calculées pour que l'antenne fonctionne autour de 5 GHz. elles sont illustrées dans le Tableau II-1.

Da	10 mm
d	4 mm
θ	40°
R	24.8 mm
H	350 mm

Tableau II-1: Dimensions de l'antenne BIE coaxiale étudiée

Si nous utilisons l'équation II-3 nous trouvons un taux de remplissage de 32.8%.

II.2.2.2. Coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale

Le coefficient de qualité Q de la cavité BIE coaxiale est un des importants paramètres à regarder, vu qu'il influe sur plusieurs caractéristiques de l'antenne [43, 44] (Directivité, bande passante ...). Pour pouvoir calculer le coefficient de qualité, il faut calculer le coefficient de transmission de la cavité (Figure II-5).

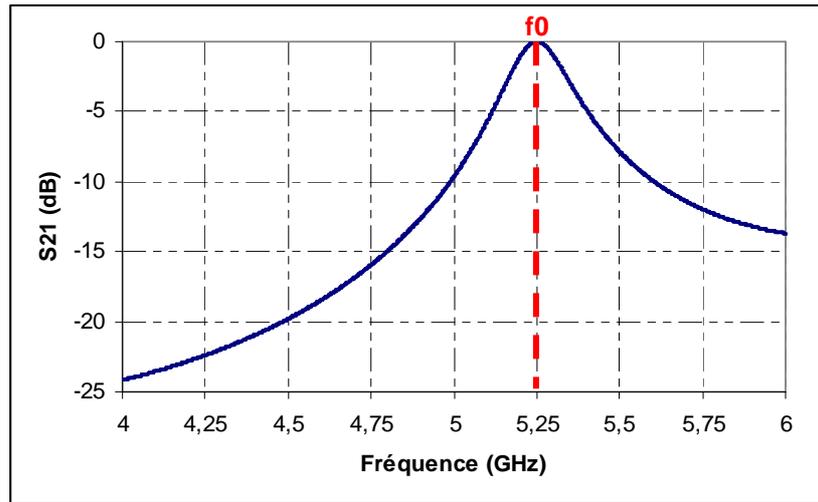


Figure II-5: Coefficient de transmission de la cavité coaxiale

Le coefficient de qualité est donné par l'équation II-4 :

$$Q = \frac{f_0}{\Delta_f} \quad \text{Equation II-4}$$

Où f_0 est la fréquence du pic de transmission, et Δ_f est la largeur du pic à -3 dB. La cavité coaxiale résonante a donc un coefficient de qualité $Q = 24$.

II.2.2.3. Cartographies de champ électrique et rayonnement

Les cartographies de champ E sont présentées dans les deux plans vertical et horizontal, uniquement à la fréquence de fonctionnement (Figure II-6).

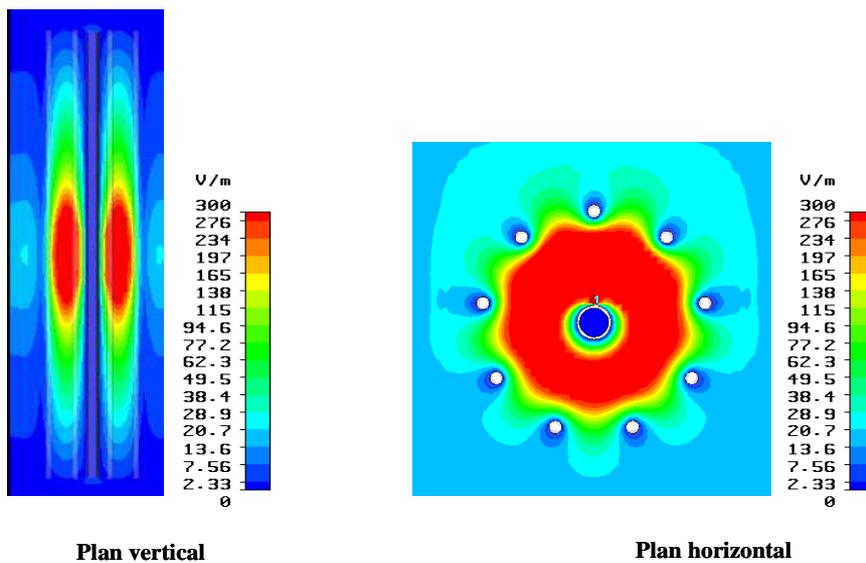


Figure II-6: Cartographies de champ E dans le plan vertical et horizontal de l'antenne à sa fréquence de fonctionnement

Comme nous l'avons expliqué avant, dans le plan horizontal le champ s'installe en forme d'un anneau autour de l'âme centrale, l'énergie est donc rayonnée d'une manière quasi-uniforme dans toutes les directions du plan horizontal. Dans le plan vertical le champ électrique est évanescent en « z » et s'étale suivant la hauteur.

Les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal et vertical sont tracés à la fréquence de fonctionnement de l'antenne (Figure II-7).

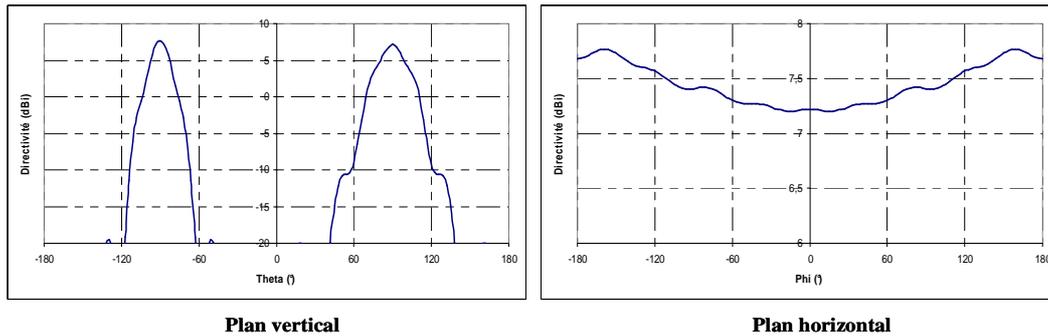


Figure II-7: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal à la fréquence de fonctionnement de l'antenne

Dans le plan vertical, le diagramme de rayonnement de rayonnement présente deux lobes pincés (à $\theta = \pm 90^\circ$), ce qui est dû à l'étalement et du champ suivant la hauteur suivant la hauteur de l'antenne (Figure II-6). Par contre, nous pouvons remarquer une dissymétrie entre les deux lobes de rayonnement, causée par l'utilisation d'une seule source d'excitation. Dans le plan horizontal, nous avons un rayonnement omnidirectionnel avec des faibles ondulations de 0.7 dB. Ce rayonnement omnidirectionnel est justifié par la répartition uniforme du champ autour de l'âme centrale (Figure II-6).

Les performances de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle de référence à la fréquence de fonctionnement sont illustrées dans le Tableau II-2.

Directivité	7.2 dBi
Angle d'ouverture dans le plan vertical	21°
Angle d'ouverture dans le plan horizontal	360°

Tableau II-2: Performances de l'antenne BIE omnidirectionnelle de référence à f_0

II.2.3. Conception de L'antenne BIE coaxiale multifaisceaux

Après avoir étudié l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle et observé ses performances, nous passons maintenant à l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux. Nous allons voir comment nous avons conçu cette antenne en utilisant la structure BIE coaxiale omnidirectionnelle.

Le principe de conception consiste à diviser le diagramme de rayonnement de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle en plusieurs diagrammes sectoriels. En effet, le rayonnement omnidirectionnel de l'antenne étudiée précédemment est dû à la distribution uniforme du champ électrique tout autour de l'âme centrale, et lié au fait que cette répartition du champ est due à l'utilisation d'une âme centrale de petites dimensions.

Le premier objectif était d'amortir le champ électrique, sans le laisser s'installer dans la totalité de la cavité. Nous verrons par la suite qu'en augmentant le diamètre de l'âme centrale, le champ électrique résonnera en r et sera évanescent en « z » et également en « ϕ ». Ainsi l'antenne BIE coaxiale excitée par une seule source aura un rayonnement sectoriel dans le plan horizontal au lieu du rayonnement omnidirectionnel. Pour avoir l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux, la structure sera séparément excitée par plusieurs sources, leur nombre dépendant du nombre de faisceaux à produire. La Figure II-8 montre le principe de la conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux. Le recouvrement des faisceaux sera analysé par la suite dans le but de reconstruire l'omnidirectionnalité dans le plan horizontal.

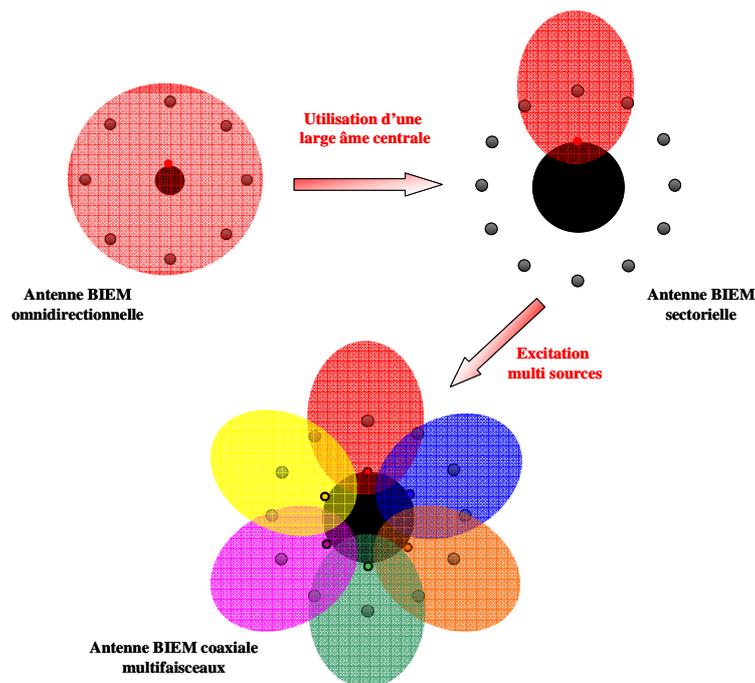


Figure II-8: Principe de conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux

L'antenne BIE multifaisceaux est ainsi un système à n entrées, où chaque entrée correspond à un faisceau. Cette structure peut être pilotée par un système de commutation, pour assurer l'agilité de l'antenne.

Remarque : pour les paragraphes suivants, la nouvelle antenne BIE coaxiale utilisant une large âme centrale et en présence de la source d'excitation seule, sera nommée « **Antenne BIE coaxiale sectorielle** ». Par contre, dans le cas de « **l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux** », toutes les sources sont présentes.

Dans le cas de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle, l'énergie est rayonnée uniformément dans le plan horizontal. Par contre, dans le cas de l'antenne BIE coaxiale sectorielle, l'énergie n'est pas rayonnée de la même façon dans ce plan (Figure II-9), puisque dans ce cas le champ suivant ϕ est évanescents.

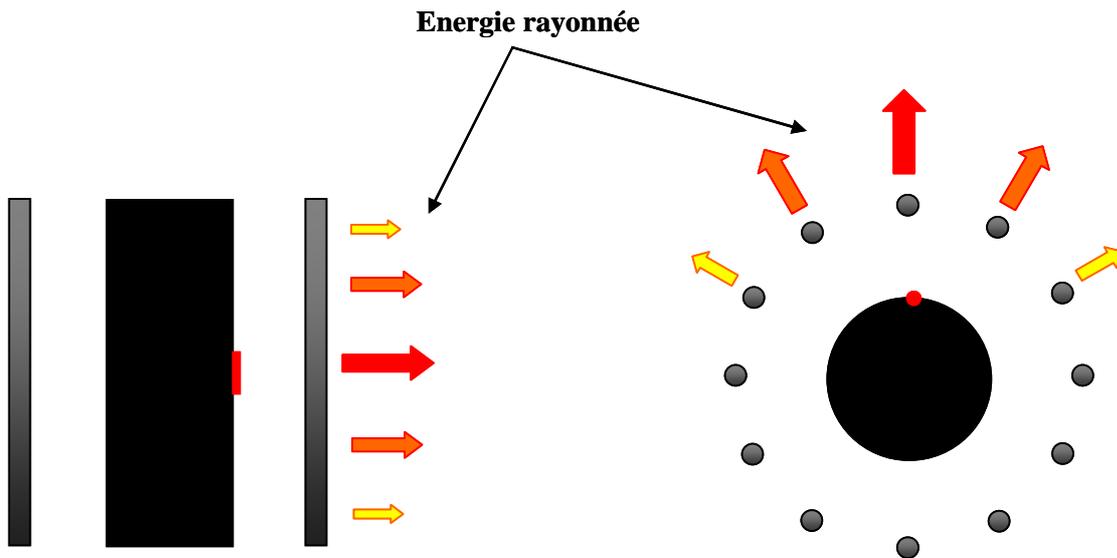


Figure II-9: Principe de fonctionnement de l'antenne BIE coaxiale sectorielle

Le diagramme de rayonnement de l'antenne est le résultat de la transformée de Fourier spatiale de la tâche rayonnante formée sur la surface des tiges. Pour cela il faut relever les cartographies de champ électrique. La Figure II-10 montre un exemple des cartographies de champ électrique dans le plan vertical (a) et horizontal (b), ainsi qu'un diagramme de rayonnement 3D (c).

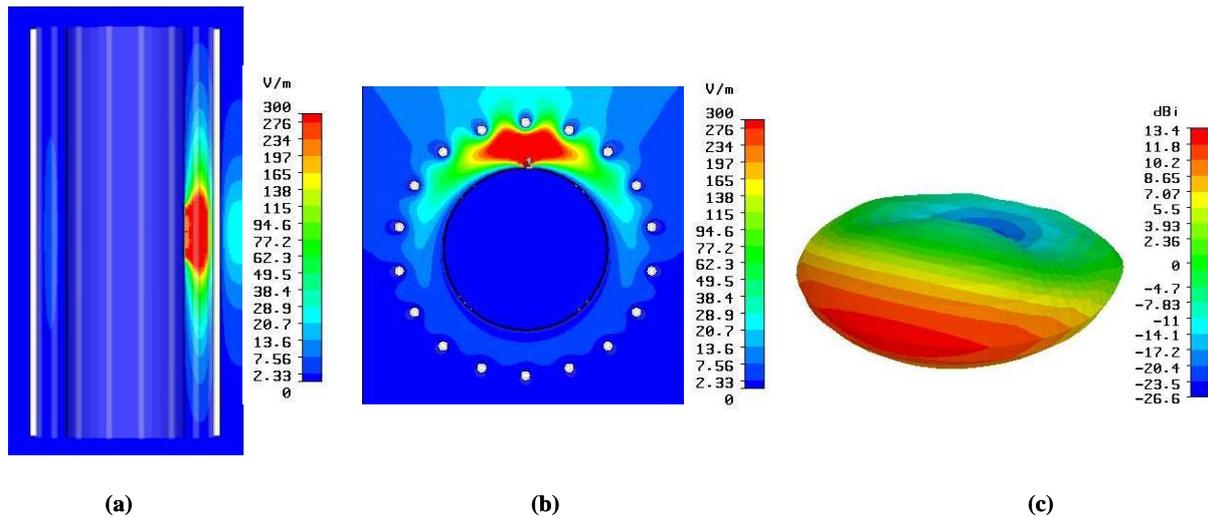


Figure II-10: Cartographies de champ E et diagramme de rayonnement de l'antenne BIE coaxiale sectorielle

Dans le plan vertical nous remarquons que le champ est évanescence en « z » et s'étale suivant la hauteur. D'autre part, dans le plan horizontal, le champ est également évanescence en « ϕ ». Du coup, ce dernier est confiné dans une partie de la cavité. Le fait d'utiliser une large âme centrale a empêché la distribution uniforme du champ électrique autour de l'âme centrale. Ce dernier s'étale sur un « arc », d'où le diagramme de rayonnement sectoriel obtenu.

II.3. Etude de l'antenne BIE coaxiale sectorielle en fonction de la fréquence

La méthode de conception de l'antenne étant maintenant connue, nous allons nous intéresser maintenant à étudier son comportement en fréquence. Pour une meilleure compréhension, nous allons présenter l'impédance d'entrée de l'antenne, les cartographies de champ électrique et les diagrammes de rayonnement.

II.3.1. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée présente plusieurs pics de résonances (Figure II-11).

La première résonance est la plus haute en amplitude, elle correspond à la résonance de la source d'excitation modifiée par la présence des tiges métalliques.

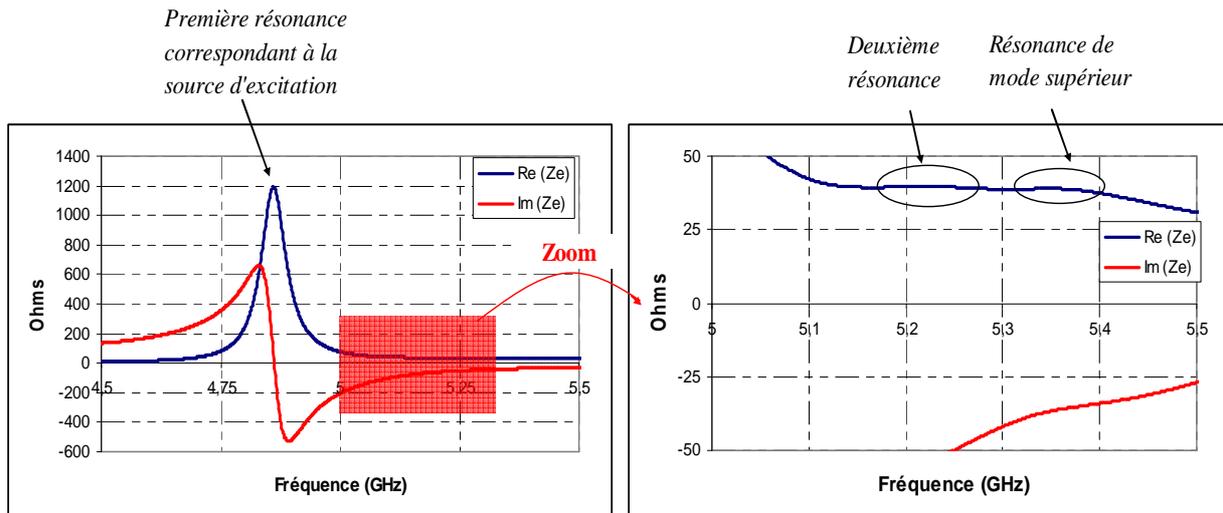


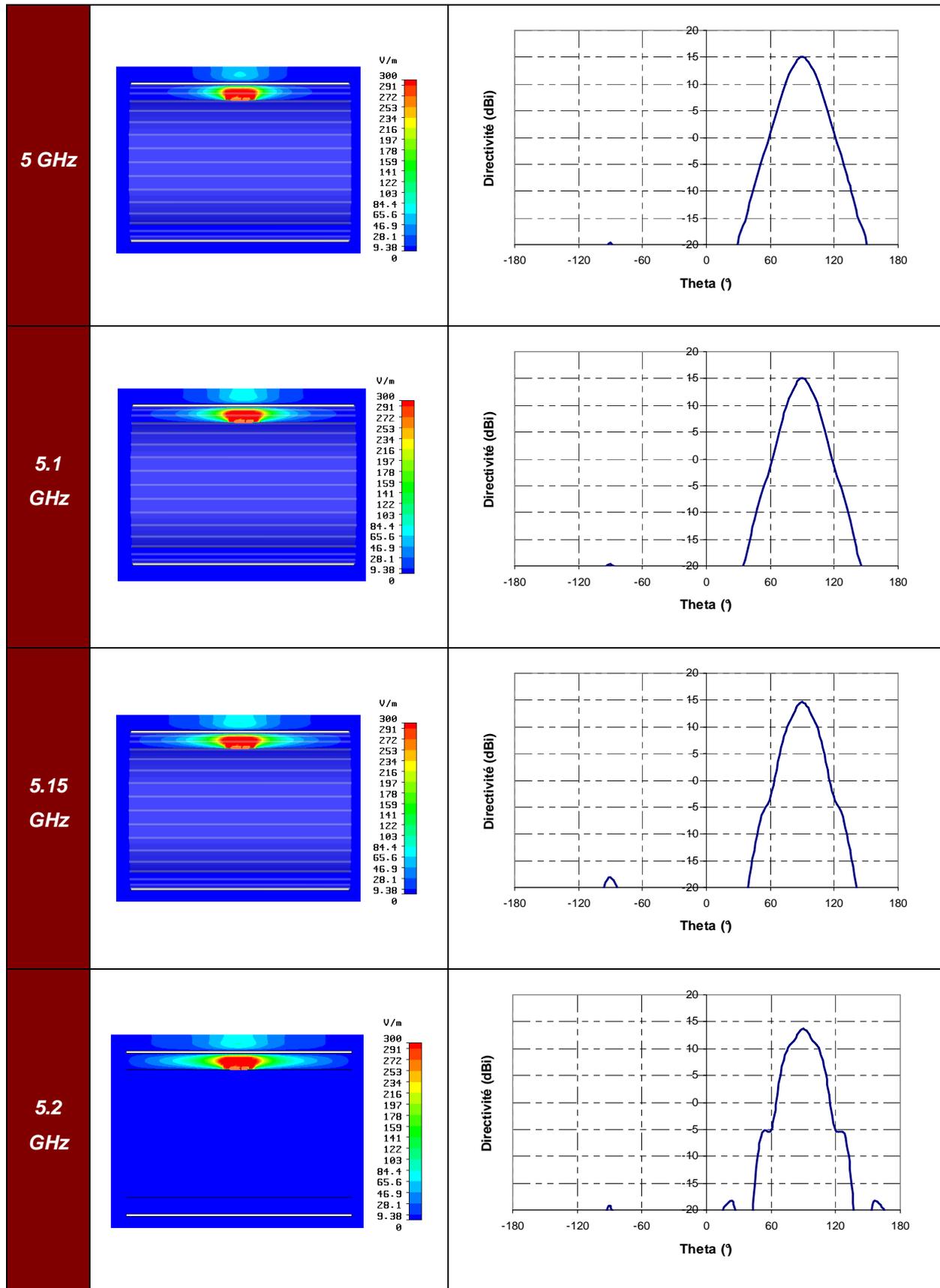
Figure II-11: Impédance d'entrée de l'antenne

La deuxième résonance correspond à la fréquence de coupure des modes propagatifs suivant « z » mais aussi suivant « ϕ » (Leaky waves). Comme dans le cas des antennes BIE planaires, la bande de fonctionnement de l'antenne se trouve avant cette résonance, où le champ est évanescent.

II.3.2. Cartographies de champ électrique et diagrammes de rayonnement

L'observation des cartographies de champ électrique à des différentes fréquences, va nous montrer pourquoi la bande de fonctionnement de l'antenne se trouve entre la première et la deuxième résonance.

Nous commençons par présenter les cartographies du champ E dans le plan vertical avec les diagrammes de rayonnement correspondants dans ce plan (Tableau II-3). La première colonne contient les fréquences auxquelles nous avons visualisé le champ, la deuxième montre le niveau du champ électrique dans le plan vertical et la troisième affiche le diagramme de rayonnement dans ce plan.



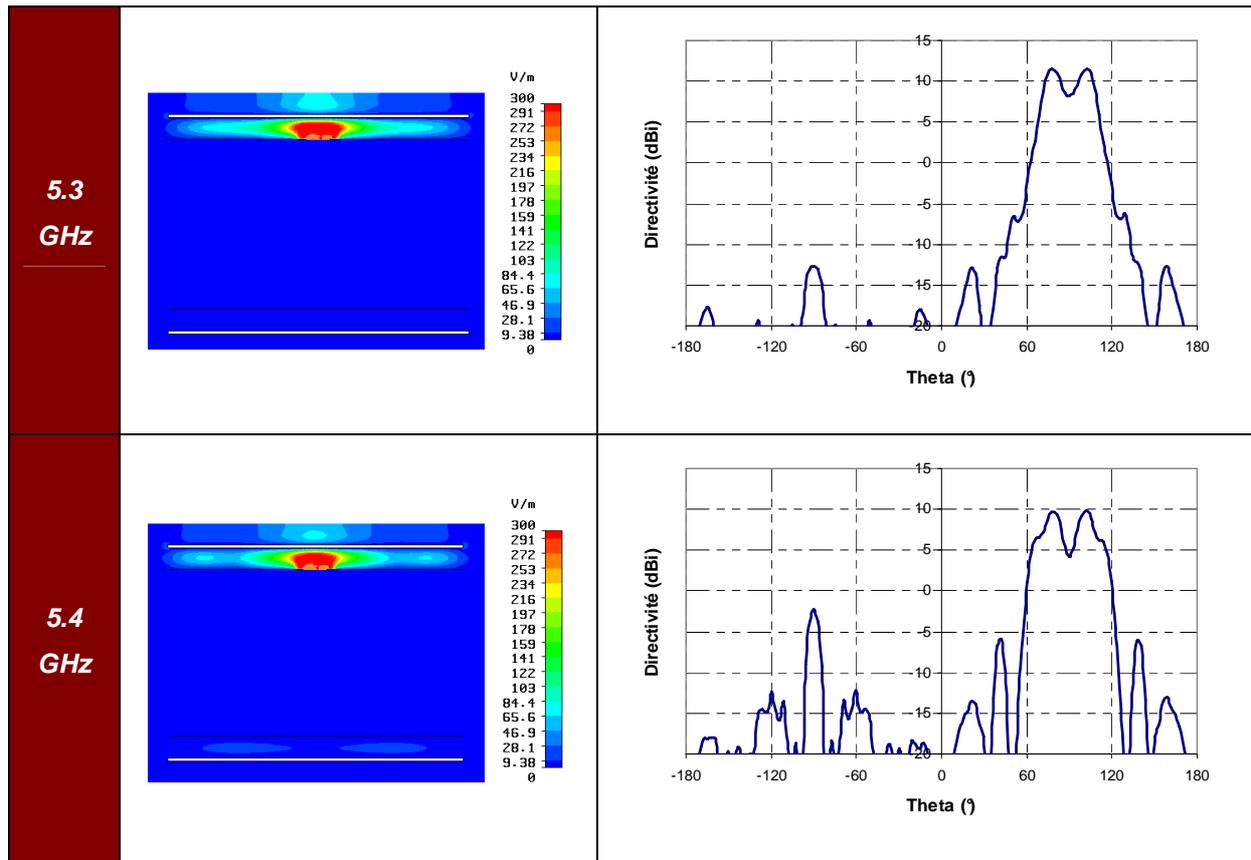
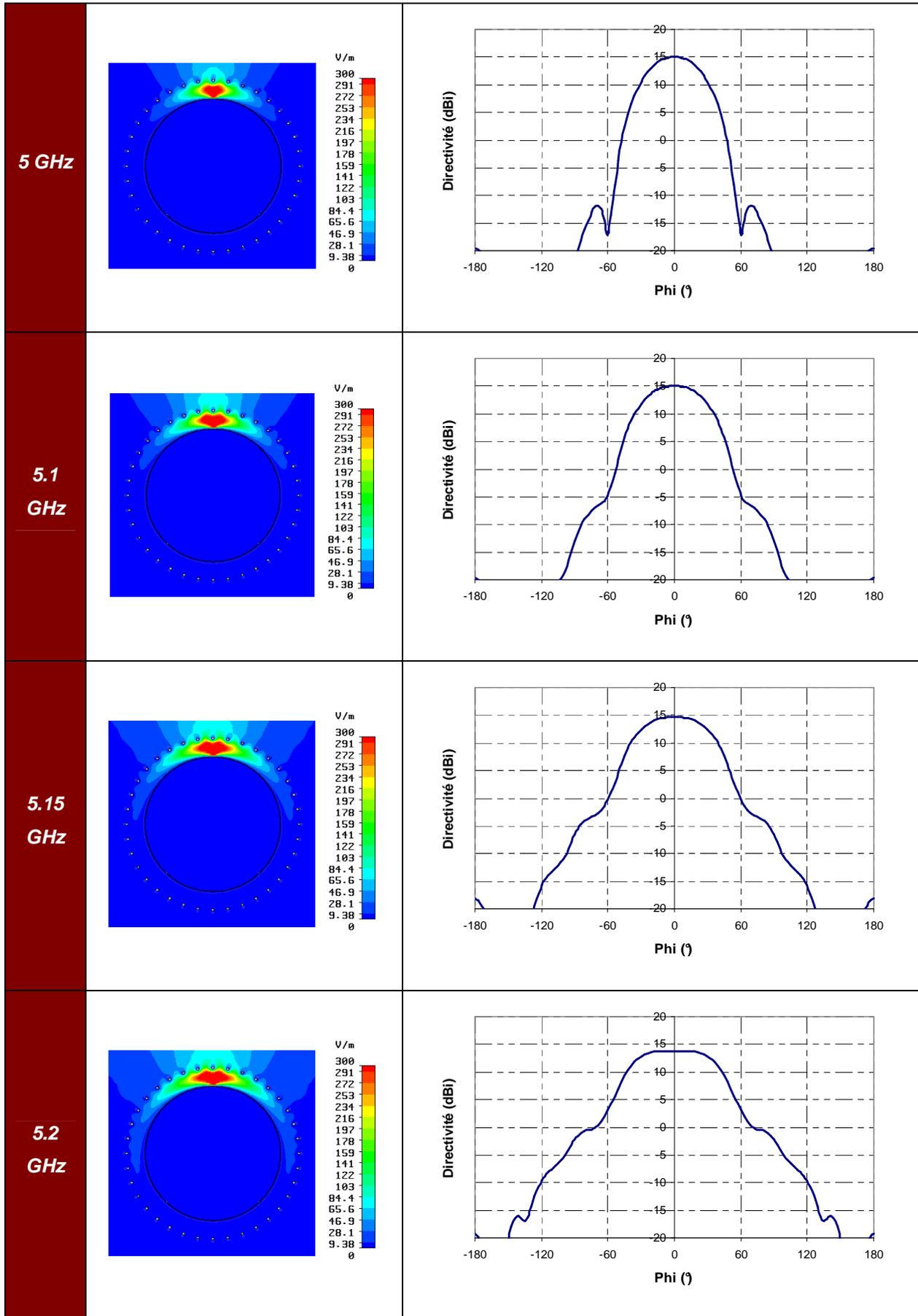


Tableau II-3: Evolution des cartographies de champ E et des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical en fonction de la fréquence

Avant la fréquence de fonctionnement optimale à 5.15 GHz, le champ s'étale de plus en plus suivant la hauteur tout en restant évanescents suivant cette direction jusqu'à atteindre le maximum à 5.15 GHz. dans le même temps, le diagramme de rayonnement dans ce plan est directif avec un lobe qui est de plus en plus pincé.

A partir de 5.2 GHz, le champ est propageant suivant la hauteur (apparition des leaky waves), ce qui se traduit par des diagrammes de rayonnement présentant des creux dans l'axe avec un dépointage qui augmente avec la fréquence.

Regardons maintenant les cartographies du champ E et les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal de l'antenne (Tableau II-4)



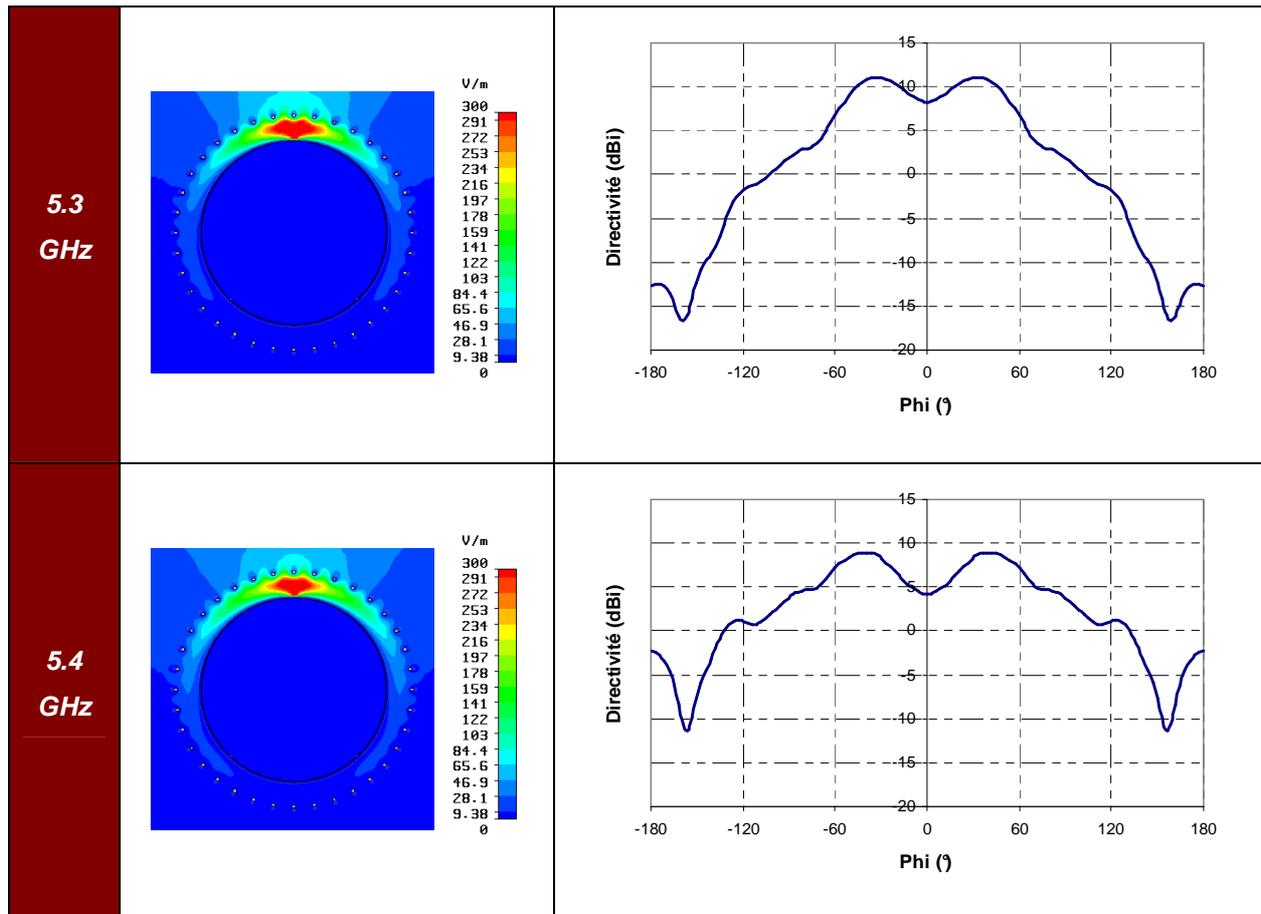


Tableau II-4: Evolution des cartographies de champ E dans le plan horizontal et des diagrammes de rayonnement en fonction de la fréquence

Dans le plan horizontal, le champ est évanescent en « ϕ ». Il prend la forme d'un arc qui s'allonge de plus en plus avec la fréquence. Ca se traduit, contrairement au cas du plan vertical, par un lobe de rayonnement qui s'élargit avec la fréquence, ce qui est dû à la forme cylindrique de la structure.

A partir de 5.2 GHz, le champ devient propageant suivant ϕ . Ce phénomène se traduit par l'apparition d'un creux dans le lobe de rayonnement, dont la profondeur augmente avec la fréquence.

II.3.3. Directivité et angles d'ouvertures

Pour compléter l'étude de l'antenne BIE sectorielle en fonction de la fréquence, nous allons regarder l'évolution de la directivité et des angles d'ouverture des lobes dans le plan vertical et horizontal de l'antenne. Les courbes sont tracées sur la Figure II-12

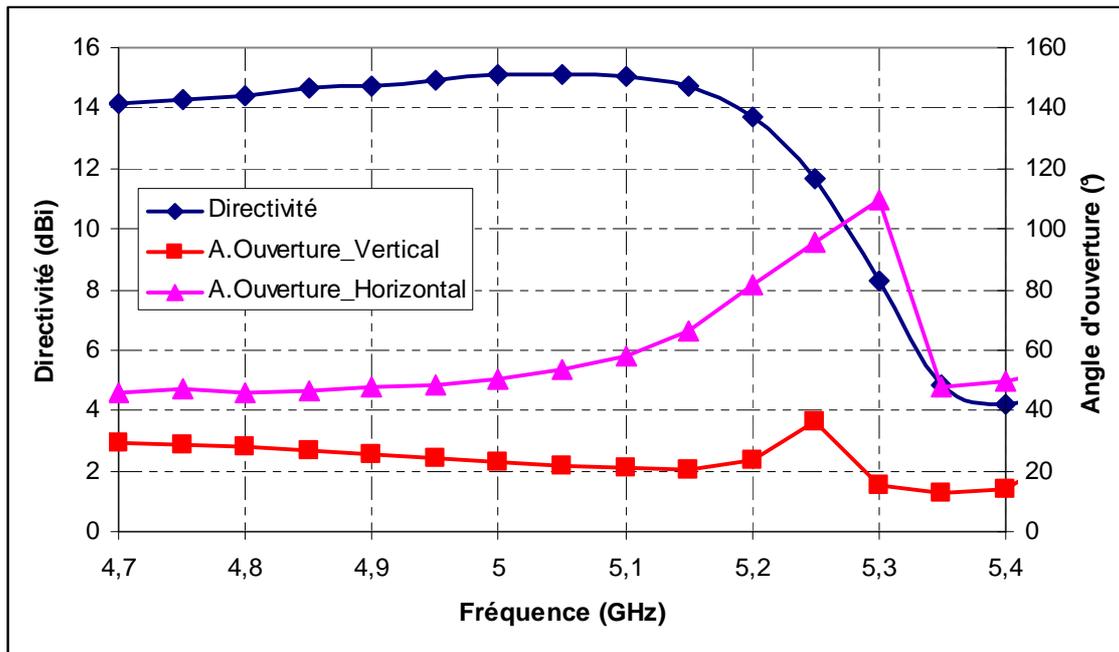


Figure II-12: Evolution de la directivité et des angles d'ouvertures dans le plan vertical et horizontal de l'antenne en fonction de la fréquence

Nous avons vu que l'angle d'ouverture dans le plan vertical diminue avec la fréquence, tandis que celui du plan horizontal augmente. C'est la raison pour laquelle la variation de la directivité est faible jusqu'à 5.2 GHz. à partir de cette fréquence la directivité commence à chuter d'une manière importante, vu que le champ est propageant suivant la hauteur et la direction ϕ .

L'évolution du champ nous a montré que le fonctionnement optimal (meilleure distribution du champ) est à 5.15 GHz. Cependant, la directivité maximale se trouve à 5.1 GHz. Ceci est dû au fait que l'angle d'ouverture du lobe dans le plan vertical est quasiment le même à 5.1 et 5.15 GHz, par contre l'angle d'ouverture du lobe dans le plan horizontal à 5.1 GHz est plus petit que celui à 5.15 GHz.

II.4. Influences des paramètres physiques de l'antenne BIE coaxiale sectorielle

L'analyse de l'influence des différents paramètres géométriques de l'antenne va permettre de visualiser l'évolution de ses performances (directivité, rayonnement, comportement du champ,...) avec la variation de chacun des paramètres. La Figure II-13 nous rappelle la

composition de l'antenne BIE coaxiale sectorielle, qui reste identique à celle de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle.

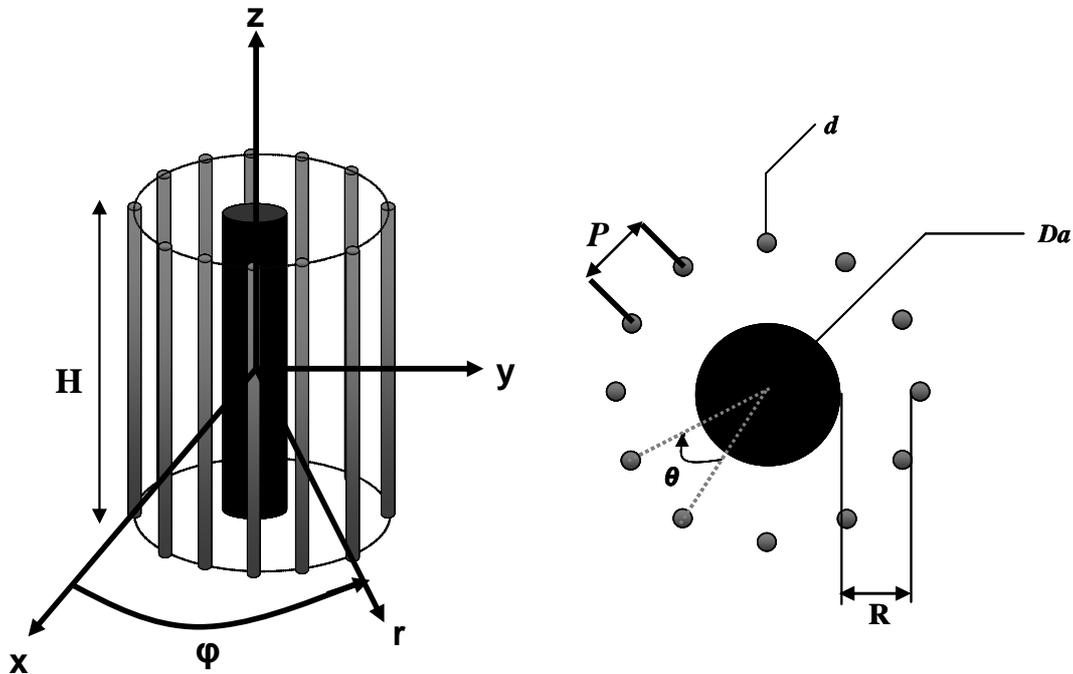


Figure II-13: Schéma de l'antenne BIE coaxiale sectorielle

Les principaux paramètres ayant des influences significatives sur les performances de l'antenne seront analysés. Il s'agit du diamètre de l'âme centrale utilisée Da , le diamètre des tiges d entourant l'âme centrale et enfin la périodicité angulaire des tiges « θ » ou autrement le nombre des tiges.

L'influence des différents paramètres de l'antenne BIE coaxiale sectorielle a été étudiée pour une structure fonctionnant autour de la fréquence de 5 GHz.

II.4.1. Variation du diamètre de l'âme centrale « Da »

La variation du diamètre Da de l'âme centrale en gardant les autres paramètres (R , d , θ) inchangés, va certainement entraîner une modification de la phase du coefficient de réflexion sur la surface des tiges métalliques. Ainsi, la fréquence de fonctionnement de la structure ne sera plus la même. D'autre part il y aura aussi une modification du taux de remplissage et du coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale. Pour bien regarder l'évolution des

performances en fonction du diamètre de l'âme centrale, nous avons redimensionné la structure, en jouant sur les autres paramètres, pour revenir à la même fréquence de résonance avec le même coefficient de qualité.

Nous avons simulé 3 cas. Le Tableau II-5 contient les valeurs des différents paramètres pour chaque cas. La hauteur de la structure dans tous les cas étudiés est de 350 mm.

	D_a	R	d	θ
Cas N°1	50 mm	24.1 mm	6.6 mm	30°
Cas N°2	100 mm	24.2 mm	6.6 mm	20°
Cas N°3	200 mm	24.8 mm	4.4 mm	10°

Tableau II-5: Valeurs des différents paramètres

Les coefficients de qualité de la cavité BIE coaxiale, correspondants aux cas montrés dans le Tableau II-5 sont présentés sur la Figure II-14.

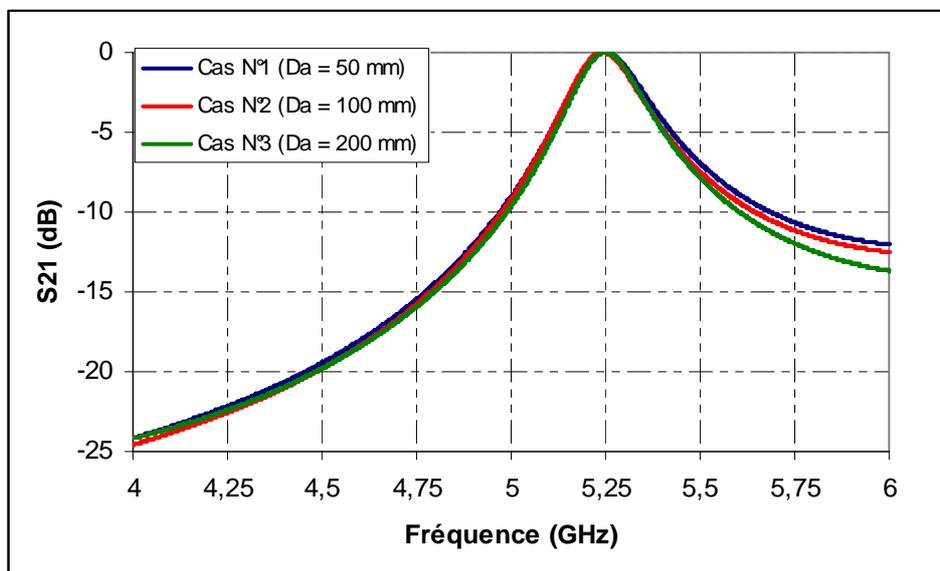


Figure II-14: Modules des coefficients de transmission du matériau BIE correspondants à chacun des cas

Comme nous pouvons le voir sur la Figure II-14, le module du coefficient de transmission de la cavité BIE coaxiale est le même pour tous les cas étudiés.

II.4.1.1. Influence sur le champ électrique

Le Tableau II-6 montre les cartographies de champ électrique dans le plan vertical de l'antenne pour tous les cas étudiés, où nous remarquons que le champ est toujours évanescent en « z ».

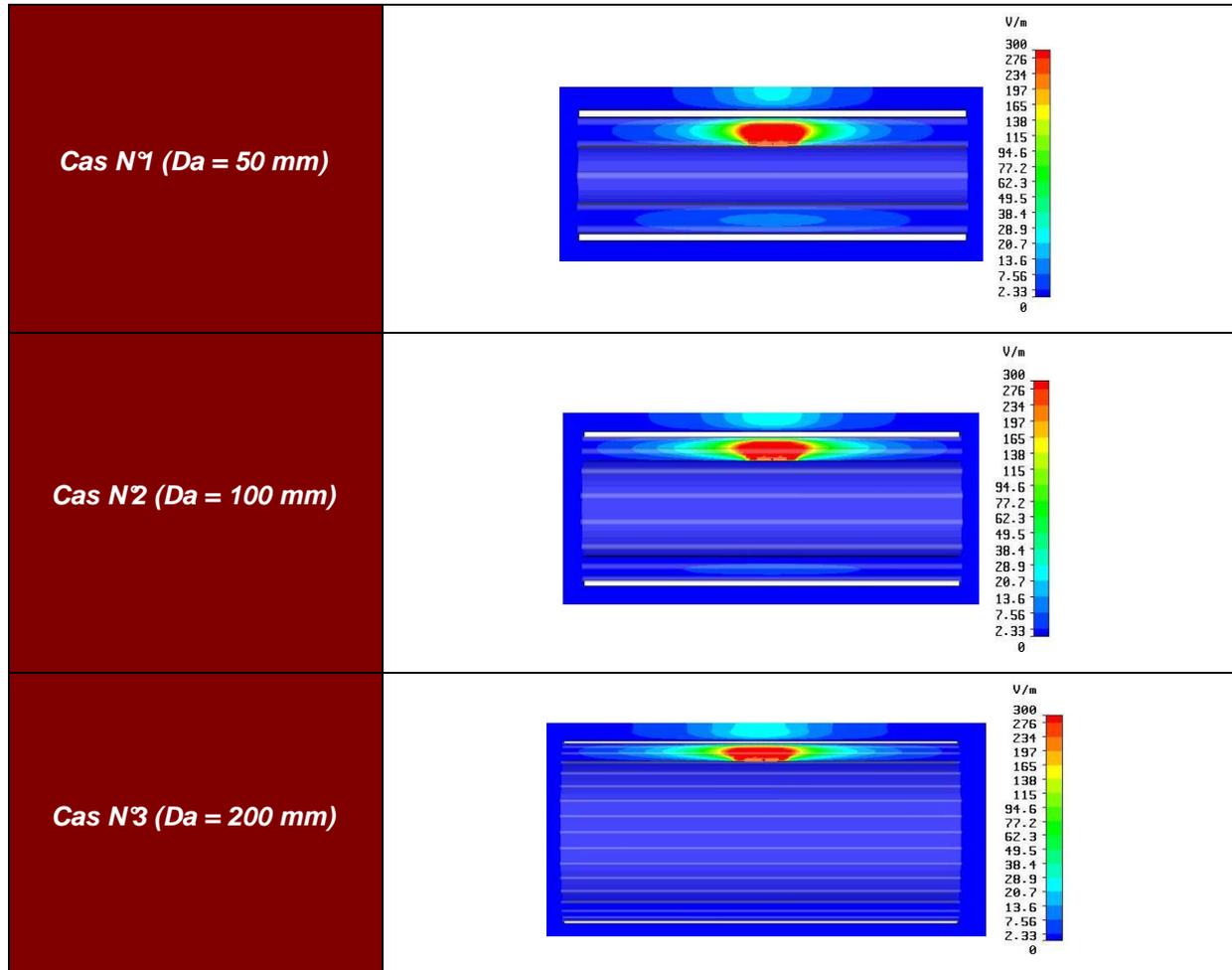


Tableau II-6: Evolution du champ E dans le plan vertical de l'antenne à f_0 avec la variation du diamètre de l'âme centrale

Les cartographies du champ dans le plan horizontal de l'antenne sont montrées dans le Tableau II-7. Nous remarquons qu'avec l'élargissement du diamètre de l'âme centrale, le mode devient de plus en plus évanescent et le champ s'étale suivant un arc dont les dimensions dépendent de celles de l'âme centrale.

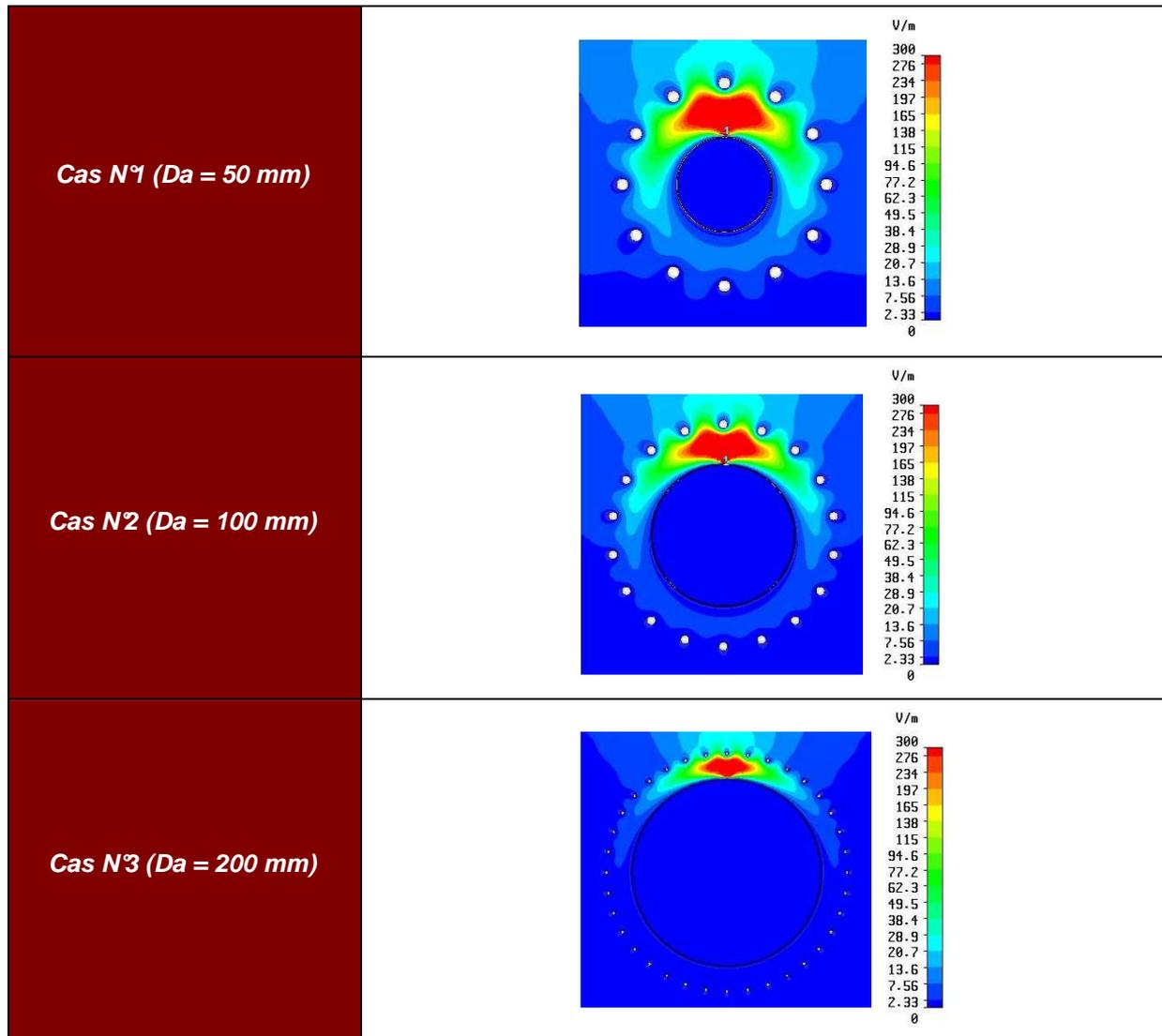


Tableau II-7: Evolution du champ E dans le plan horizontal de l'antenne à f_0 avec la variation du diamètre de l'âme centrale

II.4.1.2. Influence sur les diagrammes de rayonnement

Après avoir visualisé l'évolution du champ électrique avec la variation du diamètre centrale, nous allons maintenant regarder les diagrammes de rayonnement correspondants à chacun des cas. Nous commençons par les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical (Figure II-15).

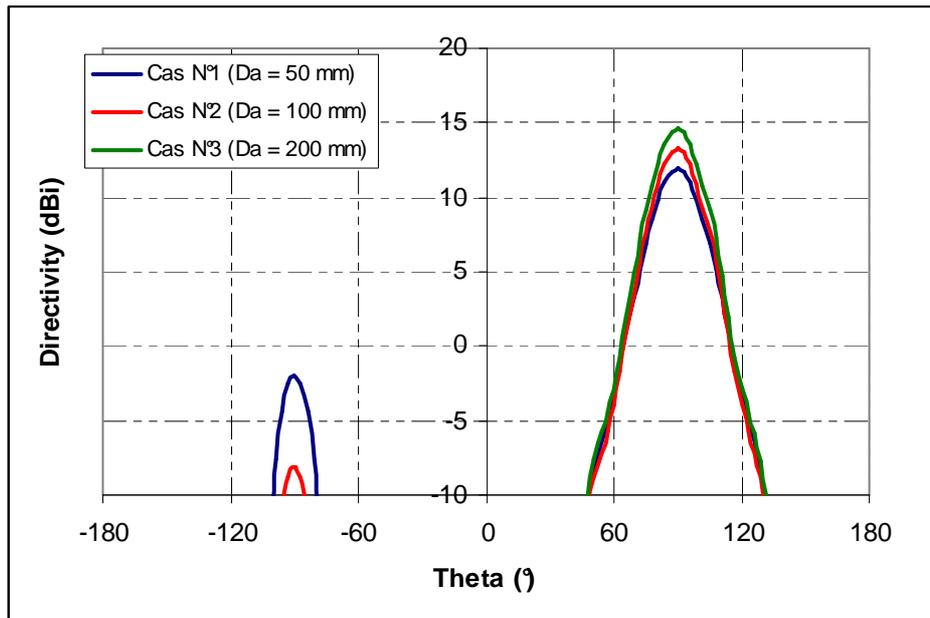


Figure II-15: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical à f_0 pour chacun des cas étudiés

Le lobe principal dans le plan vertical est pincé et il se trouve à $+90^\circ$. En élargissant le diamètre de l'âme centrale, le niveau de ce lobe augmente mais en gardant quasiment le même angle d'ouverture (Figure II-16), vu que le coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale est le même (Cf. Figure II-14).

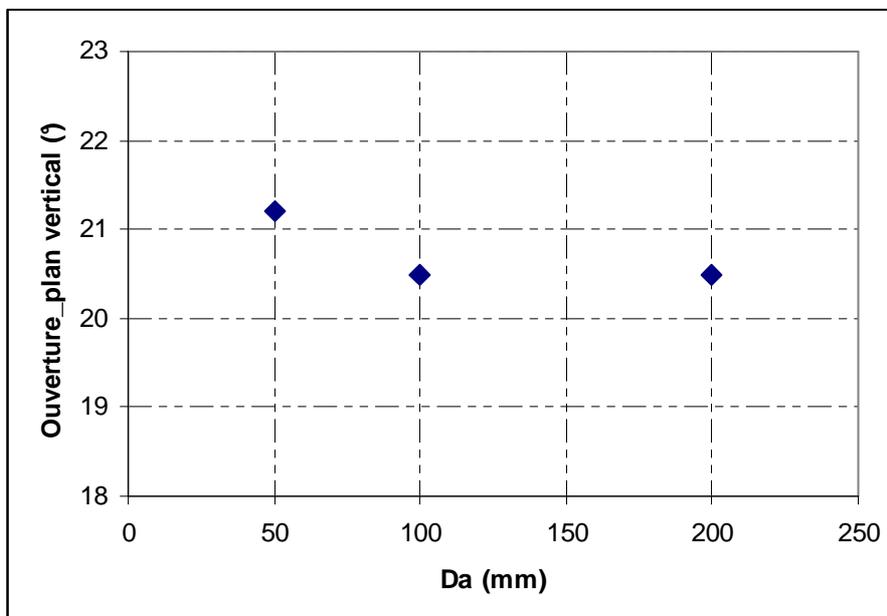


Figure II-16: Variation de l'angle d'ouverture dans le plan vertical à f_0 en fonction du diamètre de l'âme centrale

L'influence du diamètre de l'âme centrale est plus importante sur le rayonnement dans le plan horizontal. Les diagrammes sont illustrés sur la Figure II-17 pour les différents cas étudiés.

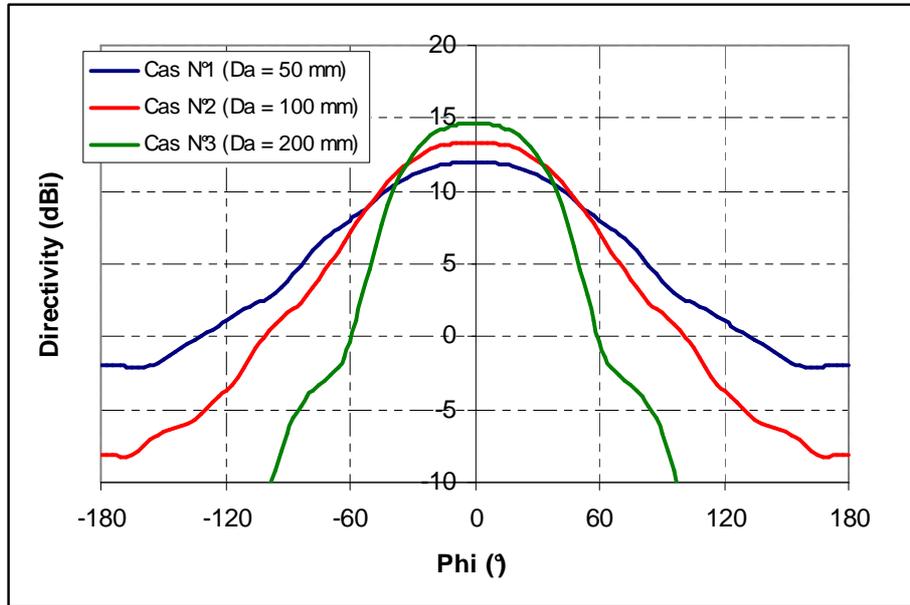


Figure II-17: Diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal à f_0 pour chacun des cas étudiés

Le rayonnement dans le plan horizontal est sectoriel avec un angle d'ouverture du lobe qui diminue avec l'élargissement du diamètre de l'âme centrale (Figure II-18).

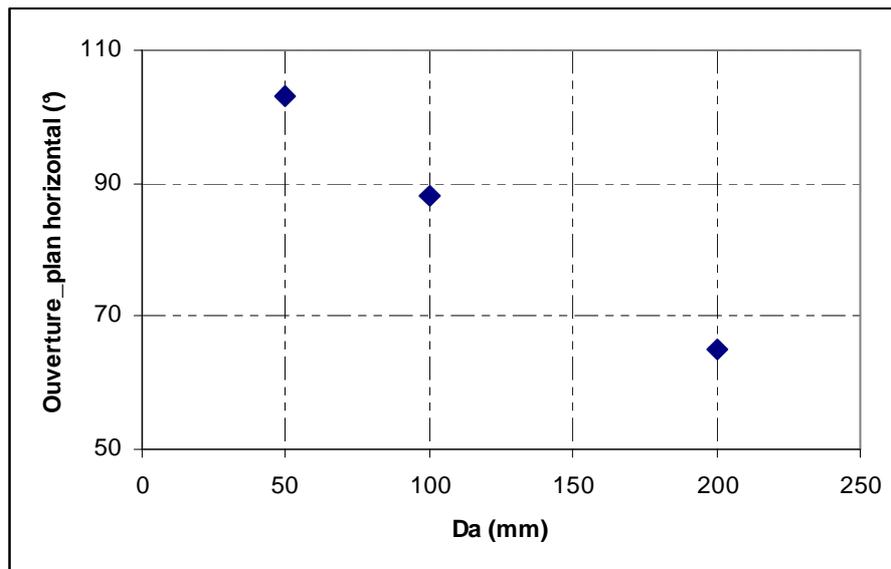


Figure II-18: Variation de l'angle d'ouverture dans le plan horizontal à f_0 en fonction du diamètre de l'âme centrale

L'angle d'ouverture étant stable dans le plan vertical quelque soit le diamètre de l'âme centrale, la directivité va forcément augmenter avec l'élargissement de l'âme centrale, vu que l'angle d'ouverture dans le plan horizontal diminue (Figure II-19).

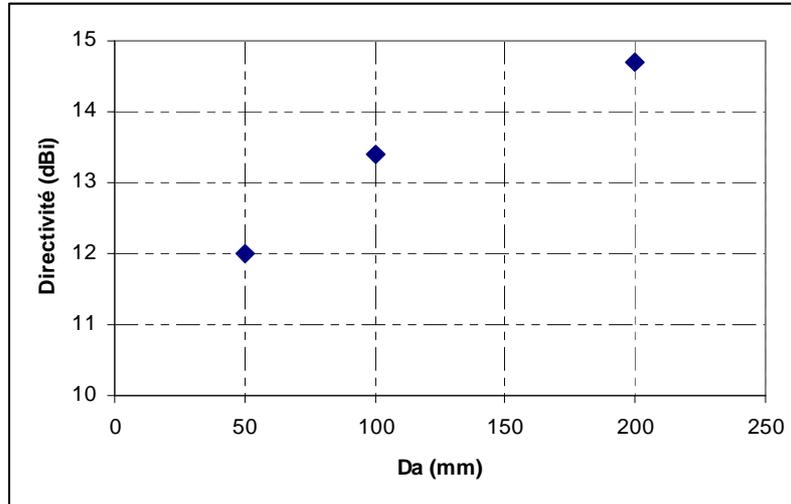


Figure II-19: Variation de la directivité à f_0 en fonction du diamètre de l'âme centrale

II.4.2. Variation du diamètre des tiges « d »

Le deuxième paramètre à faire varier est le diamètre des tiges métalliques. Le Tableau II-8 montre les valeurs des paramètres dans les 3 cas étudiés. La distance « R » entre l'âme centrale et les tiges a été ajusté dans chaque cas pour revenir à la même fréquence de fonctionnement. L'espacement angulaire « θ » entre les tiges est toujours le même. La hauteur de la structure étant toujours égale à 350 mm.

	Da	R	D	θ
Cas N°1	200 mm	24.2 mm	2.4 mm	10°
Cas N°2	200 mm	24.5 mm	3.4 mm	10°
Cas N°3	200 mm	24.8 mm	4.4 mm	10°

Tableau II-8: Valeurs des différents paramètres

II.4.2.1. Influence sur le coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale

La Figure II-20 montre les courbes des coefficients de transmission de la cavité pour tous les cas étudiés.

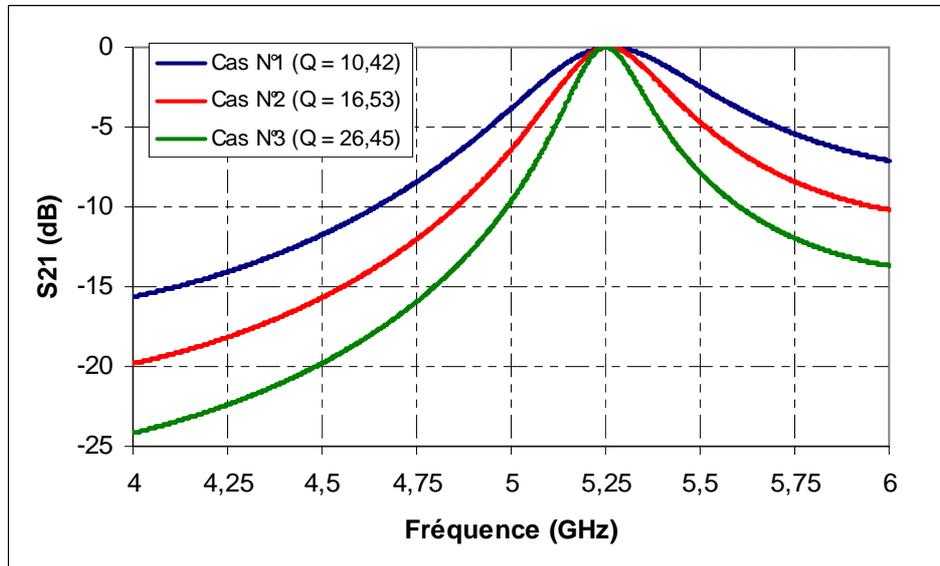


Figure II-20: Coefficient de transmission du matériau BIE dans chacun des cas étudiés

Nous pouvons remarquer que la cavité BIE coaxiale devient plus résonante avec l'élargissement du diamètre des tiges utilisées. Ainsi, le coefficient de qualité est plus important.

II.4.2.2. Influence sur le champ électrique

Nous allons maintenant observer les cartographies de champ électrique dans le plan vertical et horizontal de l'antenne.

Le Tableau II-9 contient les cartographies de champ électrique dans le plan vertical, à la fréquence de fonctionnement des structures étudiées.

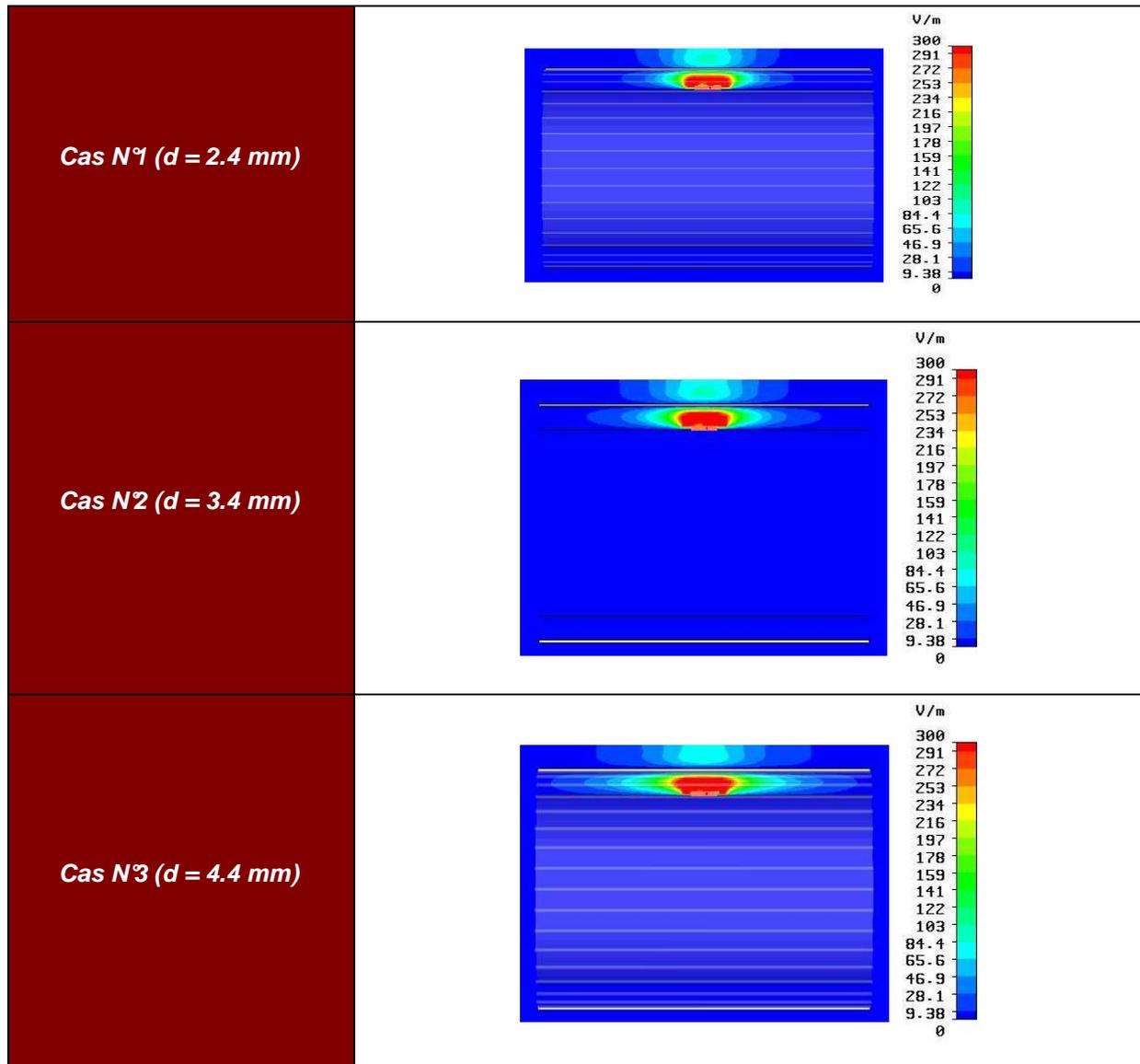


Tableau II-9: Evolution du champ E dans le plan vertical de l'antenne à f_0 avec la variation du diamètre des tiges

Pour le cas N°1, le coefficient de qualité du matériau BIE est le plus faible. Nous observons donc une petite tâche contenue dans la cavité à la fréquence de fonctionnement. En augmentant le diamètre des tiges, le coefficient de qualité devient plus fort et le champ électrique résonne fortement dans la cavité. Ainsi, la tâche s'allonge de plus en plus suivant la hauteur. Le champ étant toujours évanescent en « z ».

Regardons maintenant l'évolution du champ dans le plan horizontal de l'antenne (Tableau II-10)

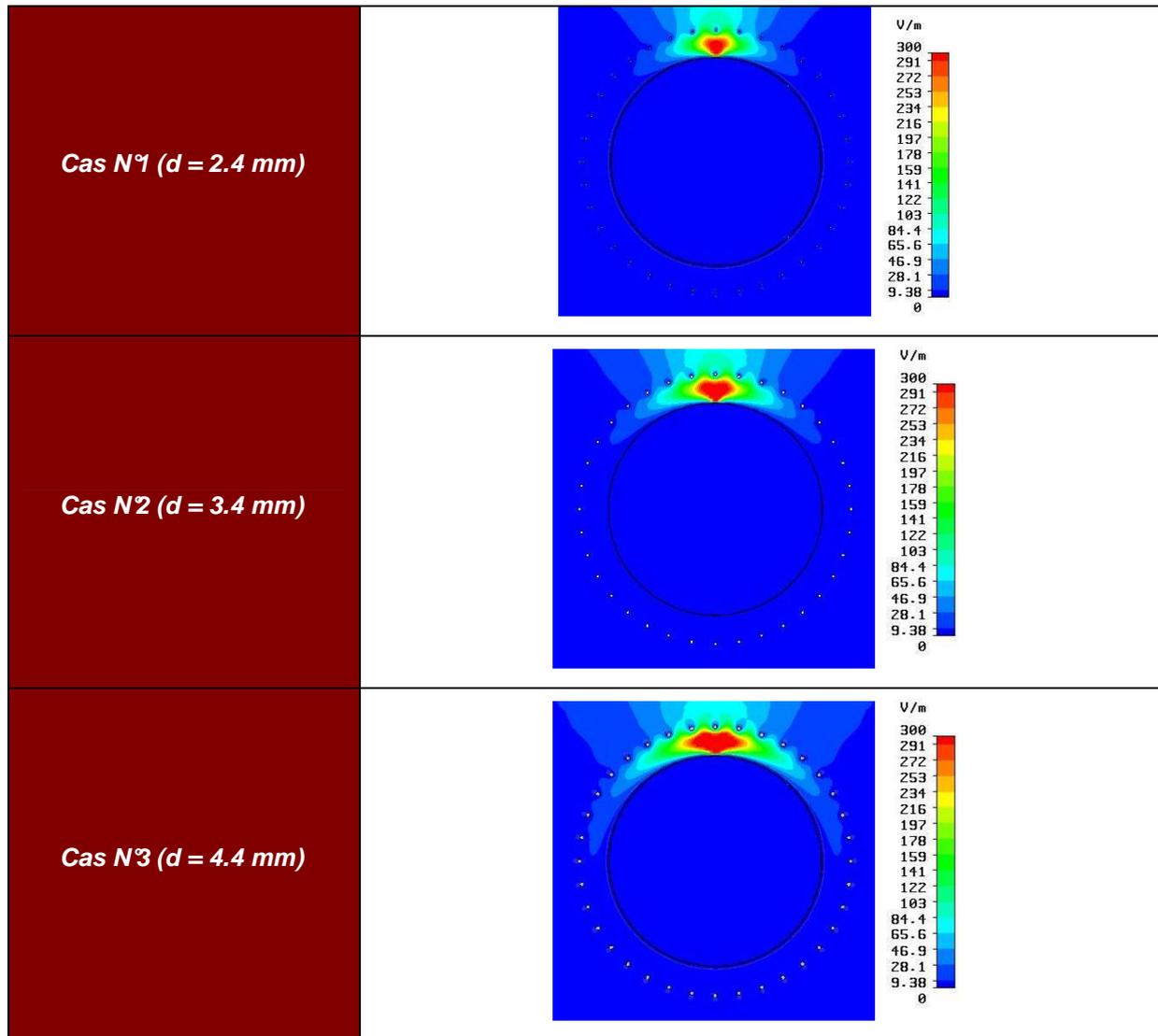


Tableau II-10: Evolution du champ E dans le plan horizontal de l'antenne à f_0 avec la variation du diamètre des tiges

Comme dans le plan vertical, la tâche dans le plan horizontal s'allonge de plus en plus avec l'élargissement du diamètre des tiges. Le champ est évanescent en « ϕ » dans tous les cas.

II.4.2.3. Influence sur les diagrammes de rayonnement

Après avoir visualisé les cartographies de champ électrique dans le plan vertical de l'antenne, nous allons maintenant voir l'influence des diamètres des tiges sur les diagrammes de rayonnement.

La Figure II-21 montre les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et à la fréquence de fonctionnement de l'antenne.

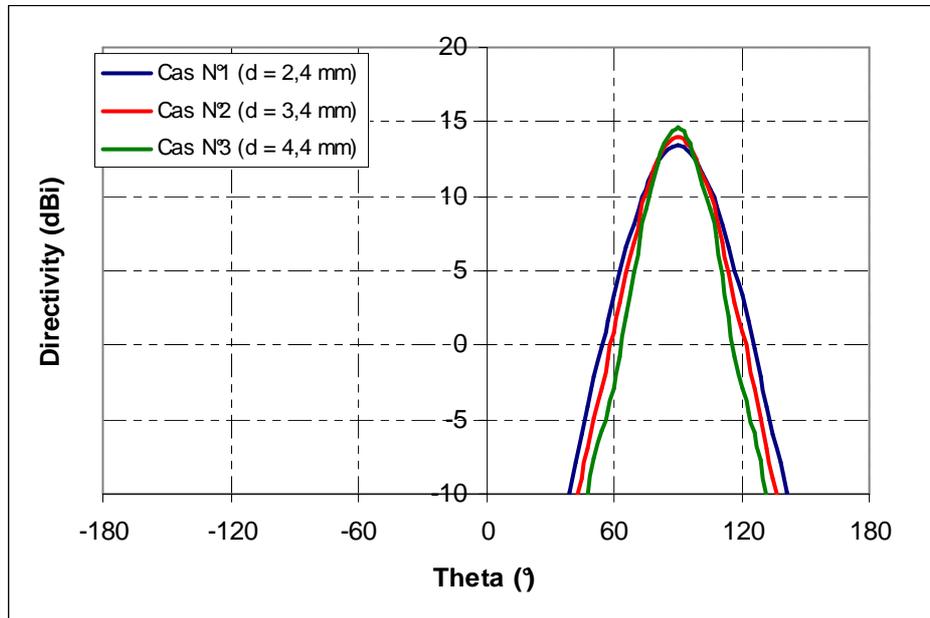


Figure II-21: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical à f_0 pour chacun des cas étudiés

La tâche dans le plan vertical s'étale suivant la hauteur et devient de plus en plus grande avec l'élargissement du diamètre des tiges. Ca se traduit par un diagramme de rayonnement ayant un lobe de plus en plus pincé avec un angle d'ouverture plus étroit (Figure II-22).

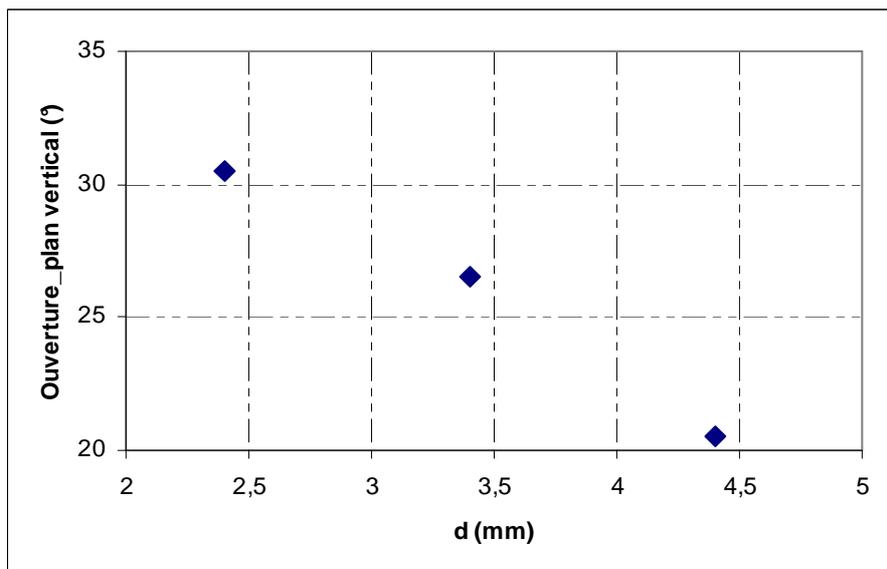


Figure II-22: Variation de l'angle d'ouverture dans le plan vertical à f_0 en fonction du diamètre des tiges

Les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal à la fréquence de fonctionnement de l'antenne sont montrés sur la Figure II-23.

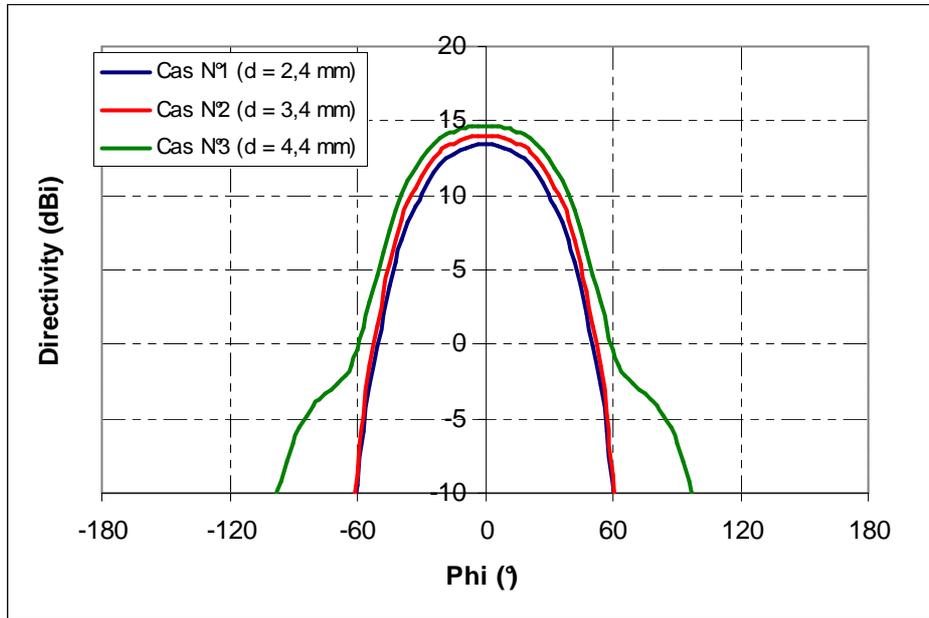


Figure II-23: Diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal à f_0 pour chacun des cas étudiés

Dans le plan horizontal, la tâche s'étale de plus en plus suivant ϕ avec l'élargissement du diamètre des tiges. Ainsi, l'angle d'ouverture dans ce plan est de plus en plus large (Figure II-24).

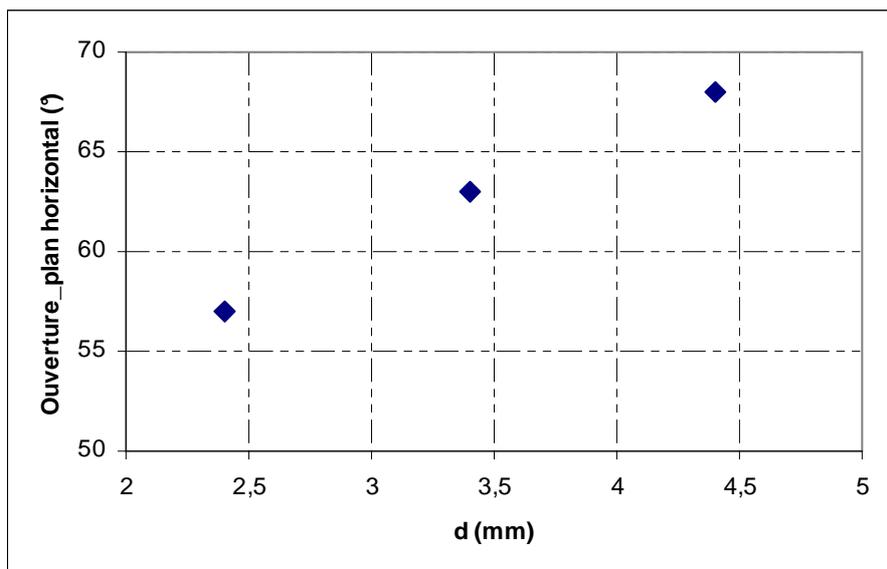


Figure II-24: Variation de l'angle d'ouverture dans le plan horizontal à f_0 en fonction du diamètre des tiges

La variation de la directivité en fonction du diamètre des tiges est liée aux variations des angles d'ouvertures dans le plan vertical et horizontal de l'antenne. Elle est tracée sur la Figure II-25

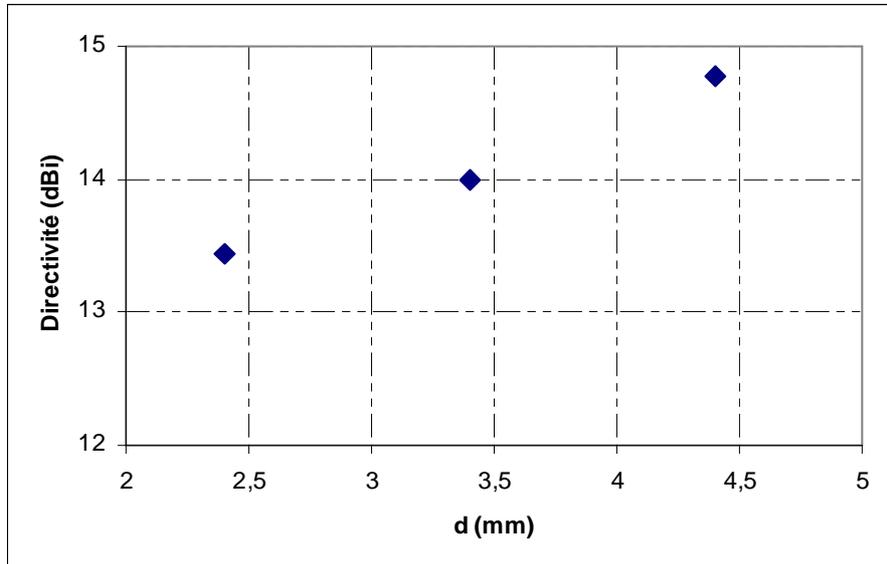


Figure II-25: Variation de la directivité de l'antenne à f_0 en fonction du diamètre des tiges

II.4.3. Variation de la périodicité angulaire des tiges « θ »

Le troisième et dernier paramètre à faire varier est la périodicité angulaire des tiges ou autrement le nombre de tiges, la distribution de ces derniers étant faite sur 360° . La variation de ce paramètre est effectuée en fixant les deux autres (d et Da). Seule la distance entre l'âme centrale et les tiges « R » a été modifiée dans chaque cas pour que les structures étudiées fonctionnent à la même fréquence. Le Tableau II-11 montre les valeurs des paramètres dans les différents cas étudiés, où nous avons rajouté le paramètre n représentant le nombre de tiges. La hauteur de la structure étant égale à 350 mm.

	Da	R	D	θ	N
Cas N°1	200 mm	25.4 mm	4.4 mm	9°	40
Cas N°2	200 mm	24.8 mm	4.4 mm	10°	36
Cas N°3	200 mm	23.7 mm	4.4 mm	12°	30

Tableau II-11: Valeurs des différents paramètres

II.4.3.1. Influence sur le coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale

Les coefficients de qualité de la cavité BIE utilisé dans chaque cas sont montrés sur la Figure II-26.

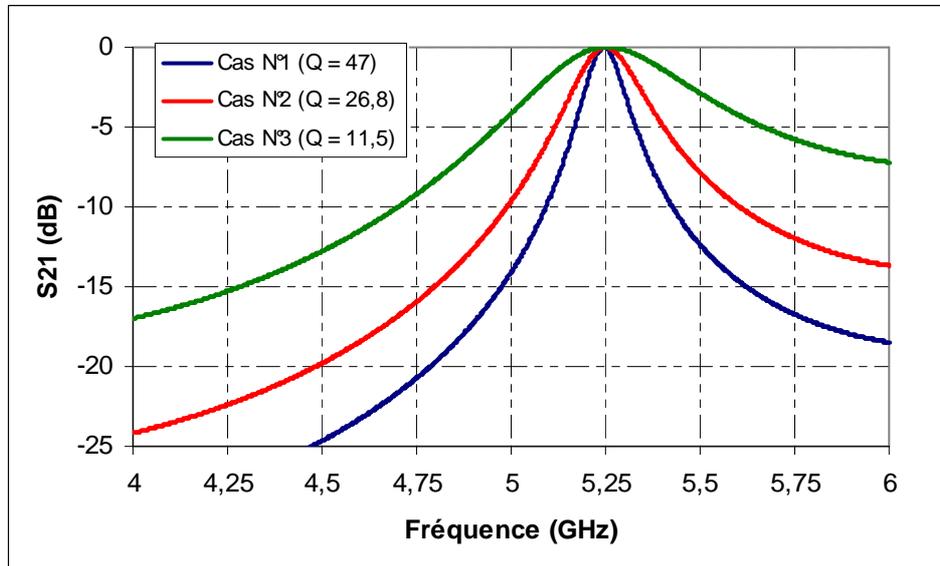


Figure II-26: Coefficients de transmission du matériau BIE des cas étudiés

Le coefficient de qualité de la cavité BIE coaxiale est plus fort quand la périodicité angulaire est plus petite. L'augmentation de nombre de tiges rend la structure plus résonante.

II.4.3.2. Influence sur le champ électrique

Observons les cartographies de champ électrique dans le plan vertical à la fréquence de fonctionnement des structures étudiées (Tableau II-12). Dans ce plan, le champ est toujours évanescent «en z ». La diminution de l'espacement angulaire entre les tiges rend la structure plus résonante avec une augmentation du coefficient de qualité. C'est la raison pour laquelle la tâche devient plus grande pour un nombre de tiges plus important.

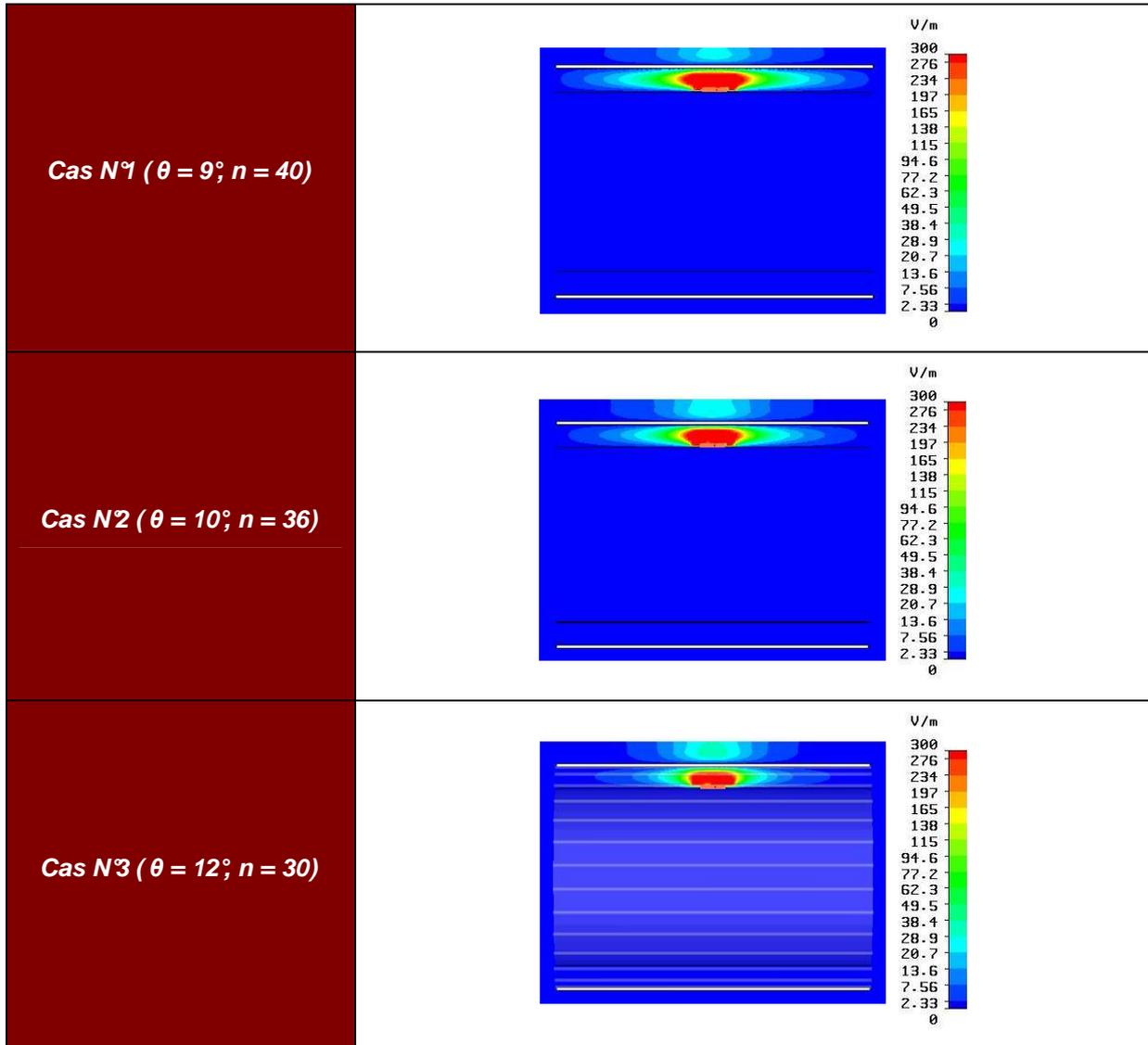


Tableau II-12: Evolution du champ E dans le plan vertical de l'antenne à f_0 avec la variation de la périodicité angulaire

Les cartographies du champ électrique dans le plan horizontal des structures étudiées à la fréquence de fonctionnement sont montrées dans le Tableau II-13.

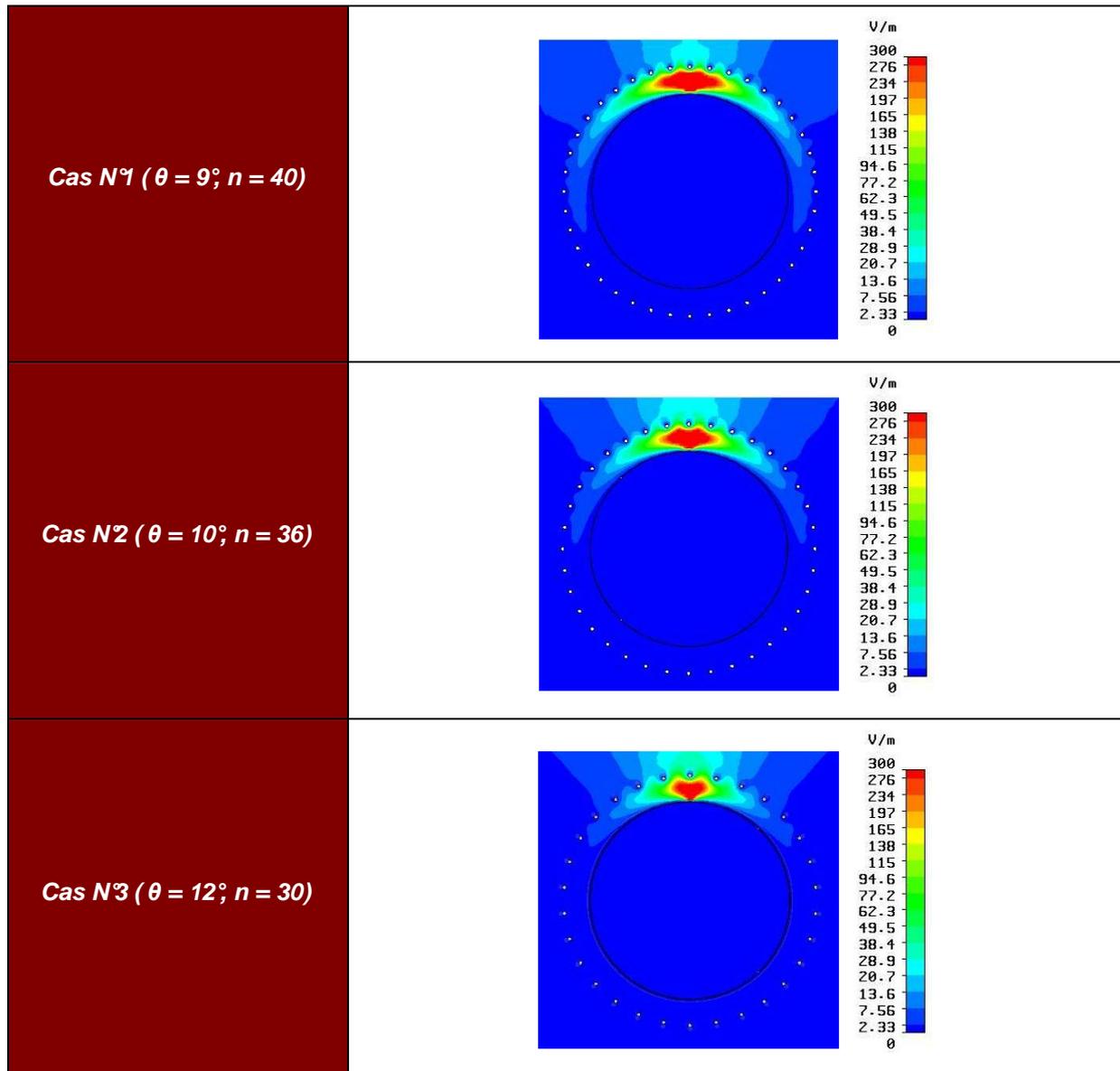


Tableau II-13: Evolution du champ E dans le plan horizontal de l'antenne à f_0 avec la variation de la périodicité angulaire

Concernant le plan horizontal, l'augmentation de nombre de tiges, entraîne une augmentation de la taille de la tâche autour de l'âme centrale. Le champ est toujours évanescent en « φ ».

II.4.3.3. Influence sur les diagrammes de rayonnement

Nous allons maintenant voir comment se traduit l'évolution des cartographies du champ électrique au niveau des diagrammes de rayonnement. Les courbes des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical des structures étudiées sont tracées sur la Figure II-27.

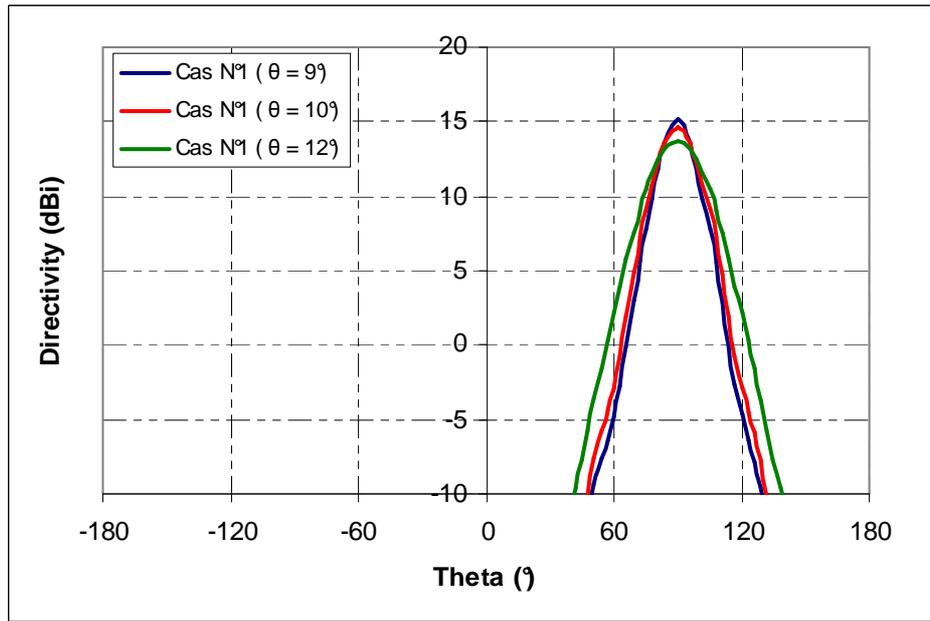


Figure II-27: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical à f_0 pour chacun des cas étudiés

Dans le plan vertical, le champ est de plus en plus évanescent en « z » avec l'augmentation de l'espacement angulaire entre les tiges. Ainsi, Les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical présentent un lobe qui est de moins en moins pincé. L'angle d'ouverture est alors de plus en plus large (Figure II-28).

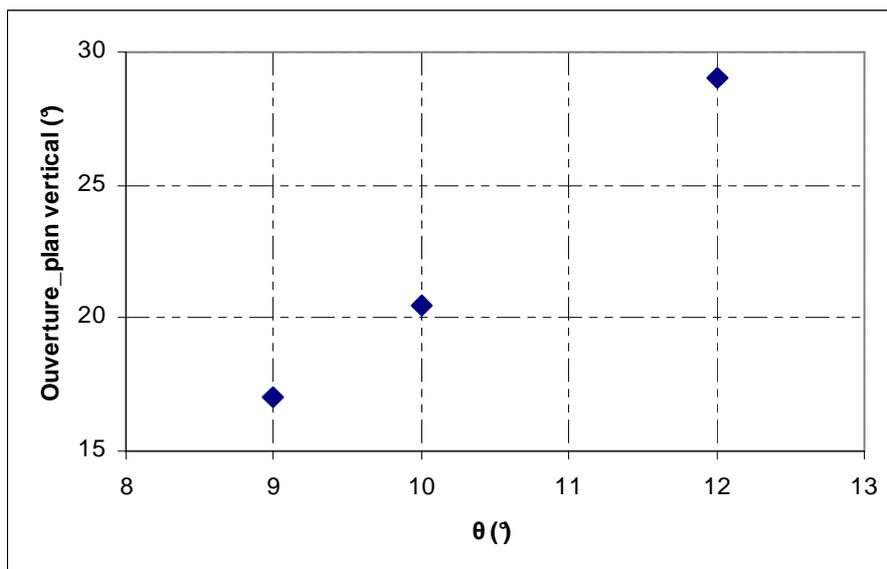


Figure II-28: Variation de l'angle d'ouverture dans le plan vertical à f_0 en fonction de la périodicité angulaire des tiges

Les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal sont présentés sur la Figure II-29. L'augmentation de la taille de la tâche autour de l'âme centrale avec le nombre de tiges, se traduit par un lobe de rayonnement de plus en plus large, comme nous pouvons le voir sur la Figure II-30.

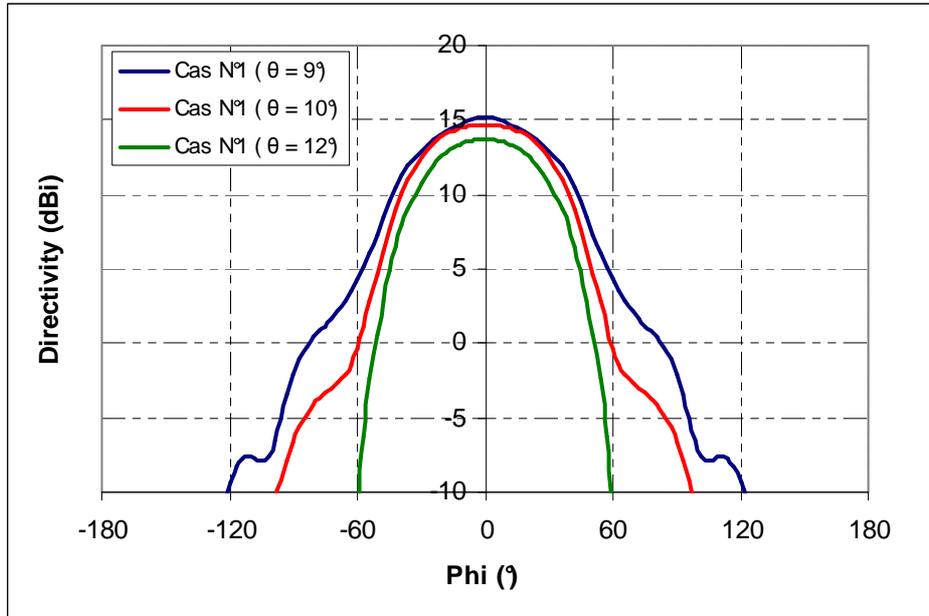


Figure II-29: Diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal à f_0 pour chacun des cas étudiés

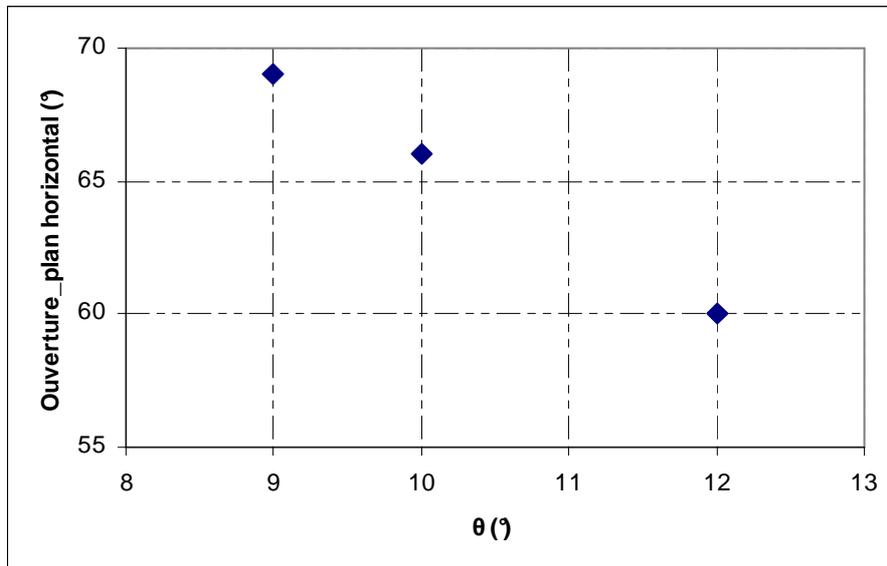


Figure II-30: Variation de l'angle d'ouverture dans le plan horizontal à f_0 en fonction de la périodicité angulaire des tiges

Nous allons finir ce paragraphe par regarder la directivité. Elle est montrée sur la Figure II-31 en fonction de la périodicité angulaire.

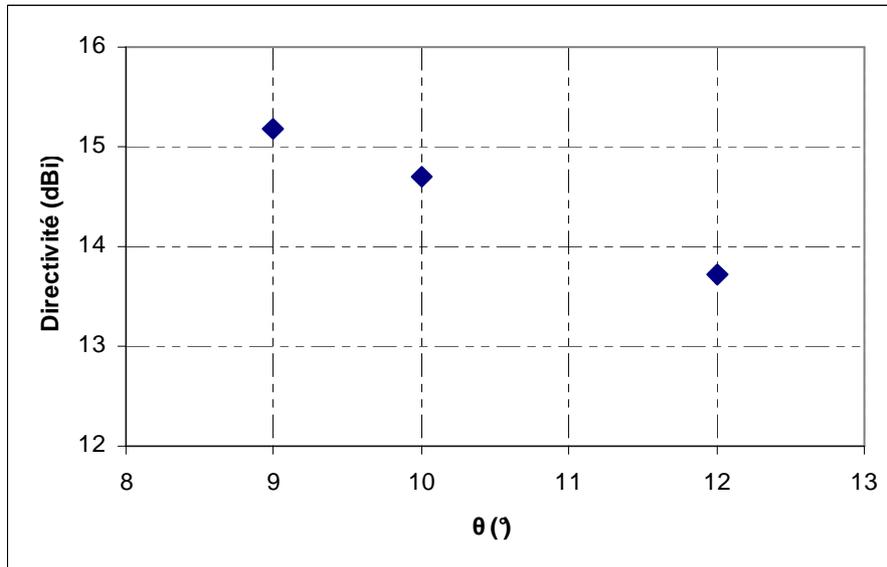


Figure II-31: Variation de la directivité à f_0 en fonction de la périodicité angulaire des tiges

Pour les cas que nous avons étudiés, les variations des angles d'ouvertures dans le plan horizontal et vertical des structures, donnent une directivité qui augmente avec l'augmentation de nombres de tiges.

II.5. Conception d'une antenne BIE coaxiale multifaisceaux $4 \times 90^\circ$

Après avoir étudié l'influence des différents paramètres sur les performances de l'antenne BIE coaxiale sectorielle, nous allons maintenant concevoir une antenne BIE coaxiale multifaisceaux à 4 lobes, ayant chacun un angle d'ouverture de 90° dans le plan horizontal.

Cette antenne sera utile pour des applications nécessitant une reconfiguration de diagramme. Nous pouvons imaginer par exemple la formation d'un secteur dans une zone donnée dans un temps, puis redirigée vers une autre zone dans un autre temps.

L'antenne conçue peut aussi être utilisée pour reconstruire l'omnidirectionnalité avec un gain plus fort. Ses performances seront ainsi comparées à celle de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle de référence déjà étudiée (Paragraphe II.2.2).

II.5.1. Dimensions de la structure

Les éléments constituant l'antenne étant connus, nous allons commencer par présenter les dimensions des différents paramètres. Les dimensions contenues dans le Tableau II-14 laissent l'antenne fonctionner autour de 5 GHz.

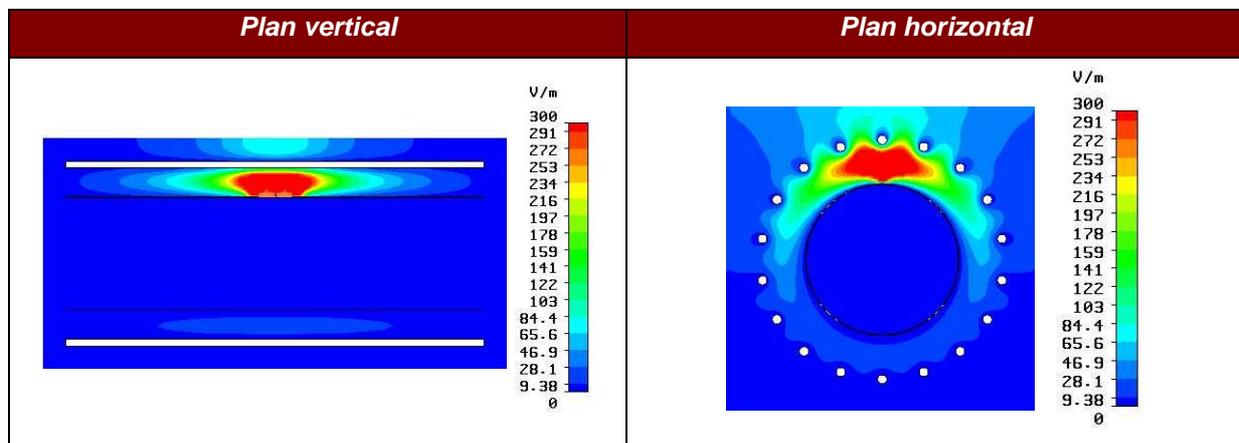
Da	96 mm
d	6.2 mm
θ	20°
R	24.3 mm
H	350 mm

Tableau II-14: Valeurs des différents paramètres physiques de l'antenne étudiée

Les performances de l'antenne seront présentées uniquement à la fréquence de fonctionnement optimale, pour les comparer après à celles de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle.

II.5.2. Performances de l'antenne en mono-source (BIE coaxiale sectorielle)

Le Tableau II-15 présente les cartographies de champ électrique dans le plan vertical et horizontal, à la fréquence de fonctionnement de l'antenne, avec les diagrammes de rayonnement correspondants. Le résumé des performances est illustré dans le Tableau II-16.



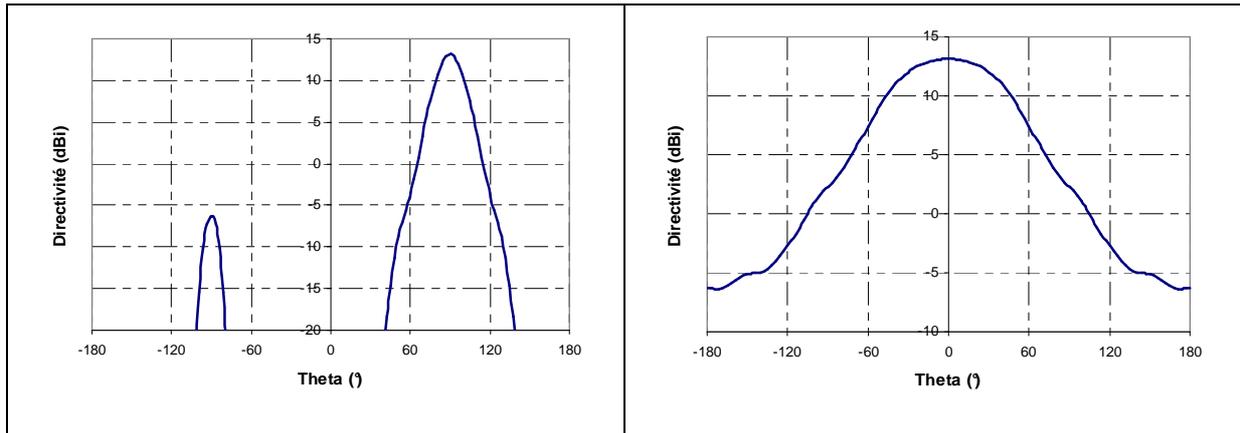


Tableau II-15: Cartographies de champ E et diagrammes de rayonnement à f_0 dans le plan vertical et horizontal de l'antenne

Directivité	13.10 dBi
Angle d'ouverture dans le plan vertical	20.5°
Angle d'ouverture dans le plan horizontal	91°

Tableau II-16: Performances de l'antenne BIE coaxiale sectorielle 90° à f_0

II.5.3. Performances de l'antenne en présence de toutes les sources (BIE coaxiale multifaisceaux)

L'antenne BIE coaxiale multifaisceaux finale est excitée séparément par quatre sources d'excitation, placées tous les 90° (0°, 90°, 180° et -90°) autour de l'âme centrale. Les dimensions de la structure restent inchangées. Pour exciter séparément l'antenne, un système de commutation 1→4 peut être utilisé (Figure II-32). Ainsi, il est possible de commuter entre les zones à couvrir en activant les sorties correspondantes du commutateur.

Un système antenne multifaisceaux (4 faisceaux), à base de 4 patchs placés sur les 4 facettes d'un cube, dédié pour une application de **diversité WiMAX** et faisant partie du projet **SYSMART** a déjà été étudié. Le principe du système consiste à balayer le plan horizontal avec 4 faisceaux pour détecter les directions d'arrivée d'un signal. Une fois le plan horizontal balayé, l'antenne doit sélectionner le secteur correspondant à la direction dans

laquelle la puissance du signal reçu est maximale, dans le but d'augmenter le débit de communication.

En intégrant un système de commutation de ses différentes sources d'excitation, l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux $4 \times 90^\circ$ possédant une meilleure directivité qu'un patch (directivité d'un patch entre 6 et 8 dB) peut remplacer le système antenne déjà étudié.

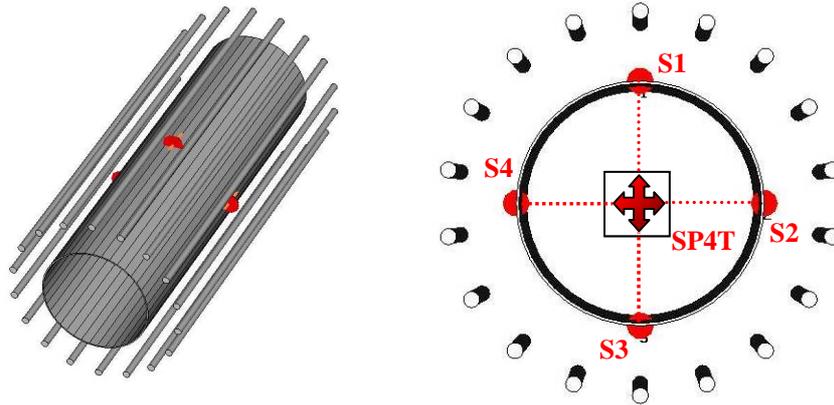


Figure II-32: Schéma de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux $4 \times 90^\circ$ avec un exemple de système de commutation

II.5.3.1. Couplage inter-sources

Le couplage entre les différentes sources d'excitation est un paramètre important à regarder. Il peut influencer sur les performances de l'antenne. Les courbes tracées sur la Figure II-33 sont celles des couplages entre deux sources adjacentes ou opposées.

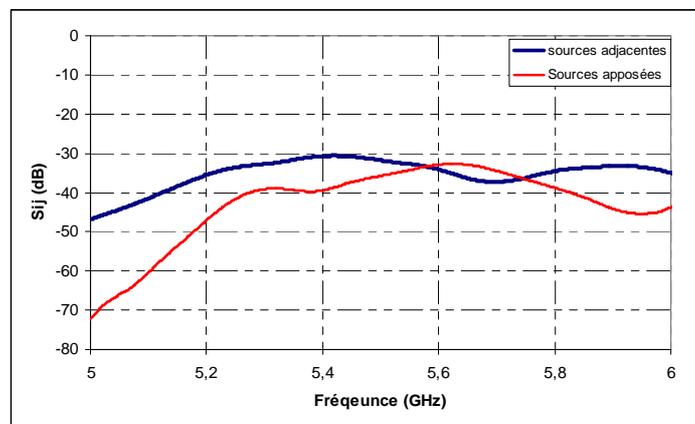


Figure II-33: Couplage entre les sources d'excitation

Le couplage étant très faible (inférieur à 30 dB), son effet sur les performances de l'antenne est négligeable.

II.5.3.2. Cartographies de champs et rayonnement

Dans les plans verticaux ($\Phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ et -90°), les cartographies de champ électrique apporté par chacune des sources sont similaires. Ainsi, Les diagrammes de rayonnement correspondants dans ces plans sont les mêmes (Tableau II-17).

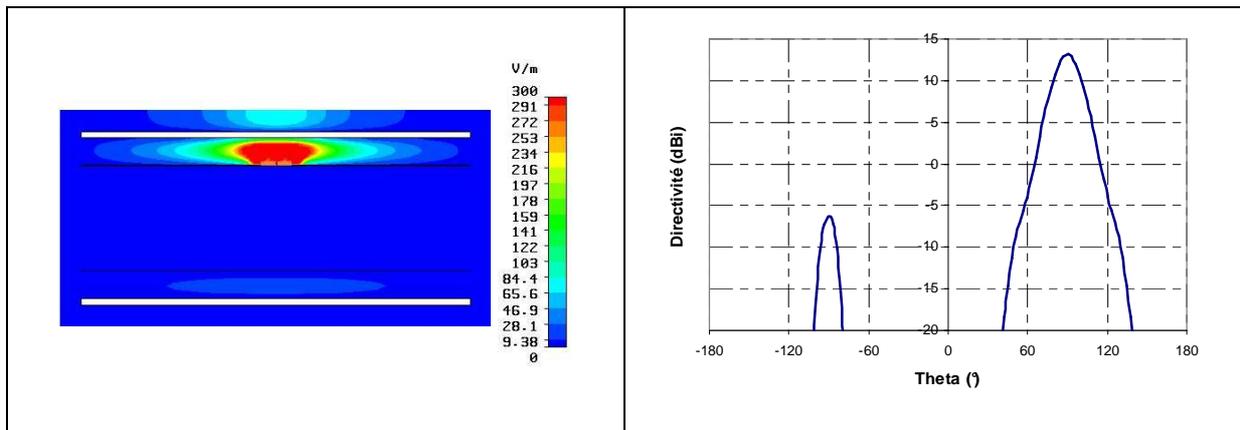
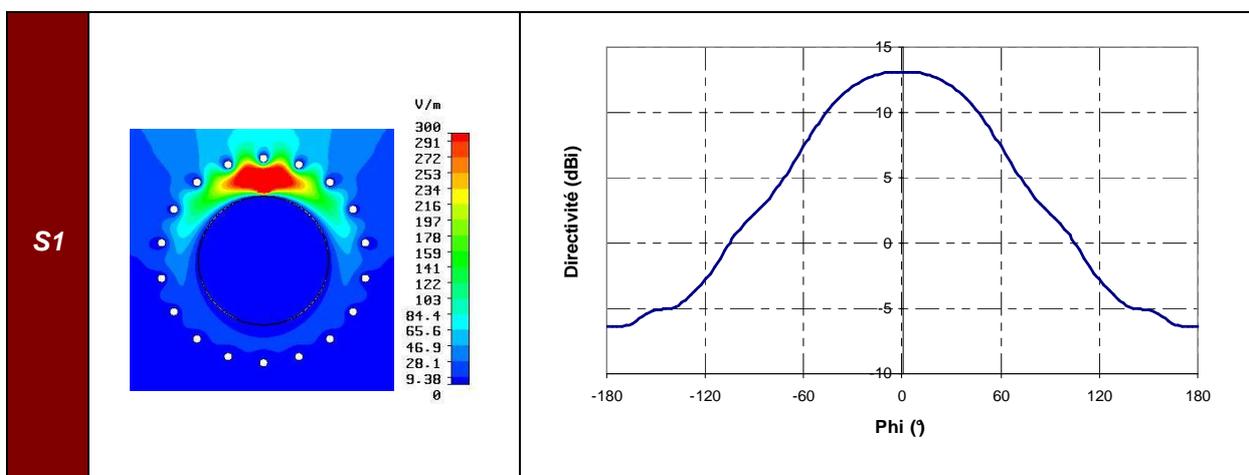


Tableau II-17: cartographie de champ et diagramme de rayonnement dans le plan vertical à f_0 , pour chacune des sources d'excitation

Le Tableau II-18 contient les cartographies de champ électrique correspondant à chaque source dans le plan horizontal et à la fréquence de fonctionnement de l'antenne.



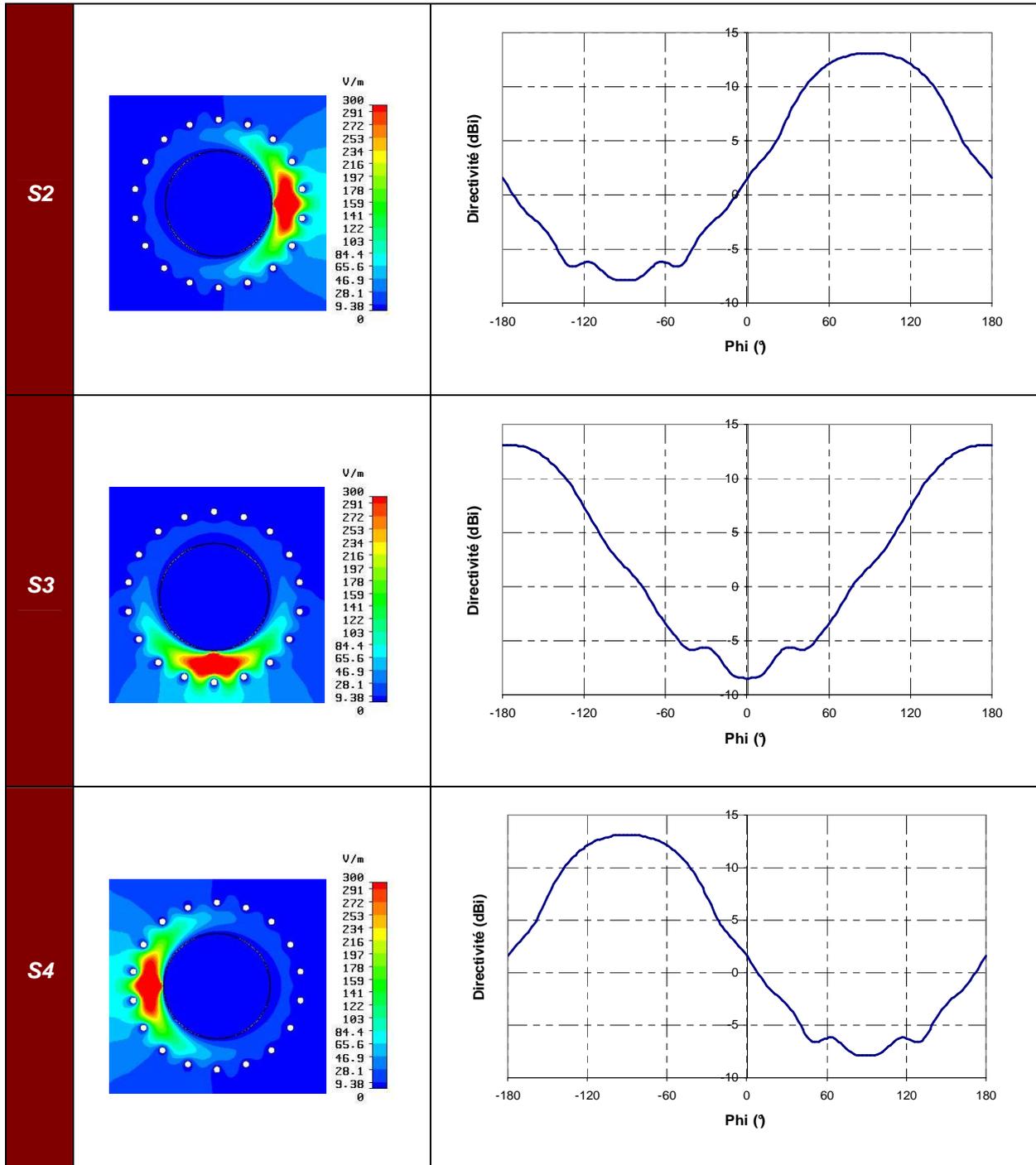


Tableau II-18: cartographies de champ et diagramme de rayonnement dans le plan horizontal à f_0 , pour chacune des sources d'excitation

Les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal pour chacune des sources est sectoriel avec un angle d'ouverture de 91° . Les lobes de rayonnement se recoupent à -2.9 dBi du maximum.

II.5.3.3. Reconstitution du rayonnement omnidirectionnel

Nous allons maintenant comparer les performances de cette antenne après reconstruire son rayonnement omnidirectionnelle dans le plan horizontal à celle de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle de référence étudiée, et conclure les avantages que nous gagnons par la procédure de sectorisation du rayonnement.

Les coefficients de qualité des cavités BIE coaxiales utilisées dans le cas de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle et l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux $4 \times 90^\circ$ sont les mêmes (Figure II-34).

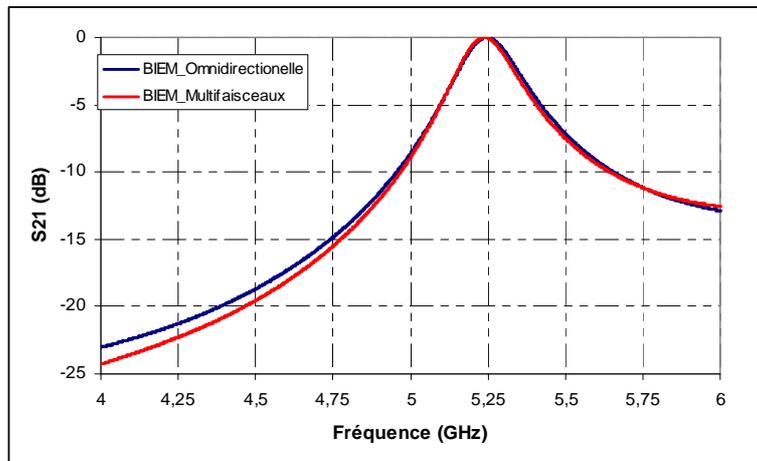


Figure II-34: Coefficients de transmission des matériaux BIE utilisés pour la structure omnidirectionnelle et multifaisceaux

Les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical de l'antenne BIE multifaisceaux $4 \times 90^\circ$ est comparé à celui de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle sur la Figure II-35.

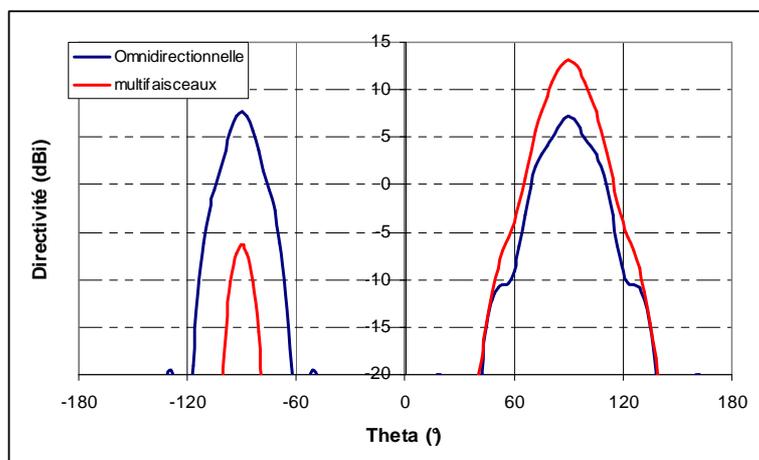


Figure II-35: Diagrammes de rayonnement des deux structures dans le plan vertical à f_0

La Figure II-36 présente les quatre diagrammes de rayonnement de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux $4 \times 90^\circ$ et le rayonnement omnidirectionnel reconstitué, comparé au rayonnement de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle.

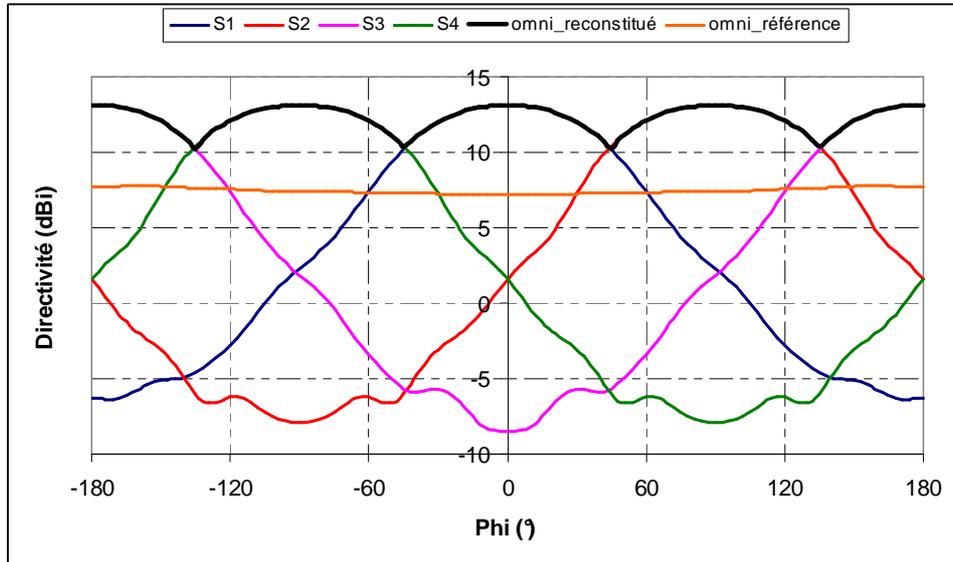


Figure II-36: Diagramme de rayonnement omnidirectionnel reconstitué de l'antenne multifaisceaux, comparé à celui de la structure omnidirectionnelle de référence

Nous présentons dans le Tableau II-19 le résumé des performances de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle, comparées à celle de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux $4 \times 90^\circ$ avant faire une conclusion sur les avantages et les désavantages de chacune des structures.

	<i>BIE omnidirectionnelle</i>	<i>BIE multifaisceaux $4 \times 90^\circ$</i>
Directivité	7.2 dBi	13.1 dBi
Ouverture _ plan vertical (par faisceau)	21°	20.5°
Ouverture _ plan horizontal (par faisceau)	360°	91°
Ondulations dans le rayonnement omnidirectionnel	0.5 dB	2.9 dB

Tableau II-19: Comparaison entre les performances des deux structures à f_0

Dans le plan vertical, les lobes à $+90^\circ$ des deux structures ont le même angle d'ouverture, vu que le coefficient de qualité des cavités BIE coaxiale est le même.

Le passage d'un rayonnement omnidirectionnel dans le plan horizontal à un rayonnement sectoriel, nous a permis de gagner 6 dBi de directivité, puisque l'angle d'ouverture est divisé par 4 (passage de 360° à 91°).

II.6. Augmentation du nombre de sources dans le plan horizontal

Dans ce paragraphe, nous étudions l'impact de l'augmentation du nombre de sources d'excitation dans le plan horizontal sur les performances de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux. Premièrement, la simulation d'une antenne BIE coaxiale sectorielle en présence de la source d'excitation seule sera effectuée. Après, les performances de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux en présence de toutes les sources, seront étudiées en fonction de nombre de ces sources (aussi rattaché à l'écart angulaire entre les sources).

II.6.1. Simulation de l'antenne BIE sectorielle « en présence de la source d'excitation seule »

II.6.1.1. Structure simulée

La structure simulée avec les valeurs des différents paramètres physiques sont présentées sur la Figure II-37.

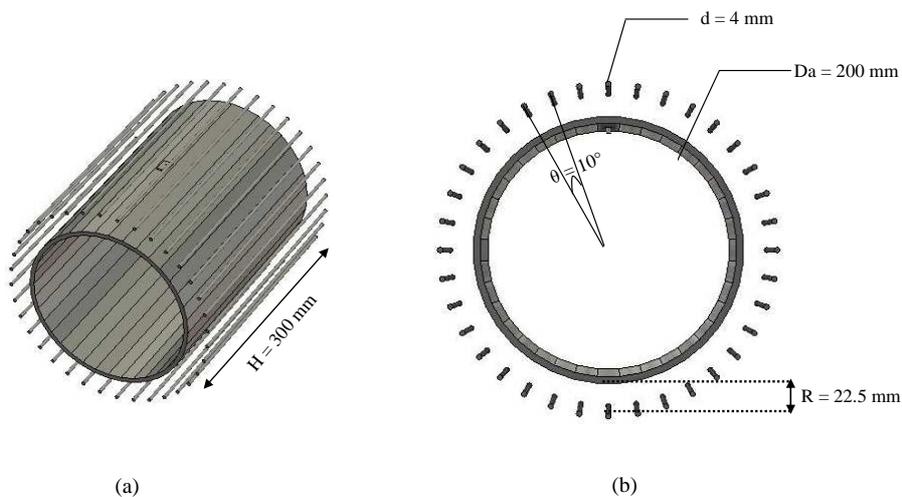


Figure II-37: Antenne BIE coaxiale sectorielle simulée

L'antenne est composée d'une âme centrale de diamètre extérieur « Da » de **200 mm**, entourée de **36** tiges métalliques (soit un espacement angulaire « θ » = **10°**) de section circulaire dont le diamètre « d » est de **4 mm**. La distance « R » entre l'âme centrale et les tiges, pour un fonctionnement autour de la fréquence centrale (5.55 GHz) est égal à **22.5 mm**.

II.6.1.2. Directivité et rayonnement

La directivité de l'antenne BIE coaxiale sectorielle en fonction de la fréquence est présentée sur la Figure II-38.

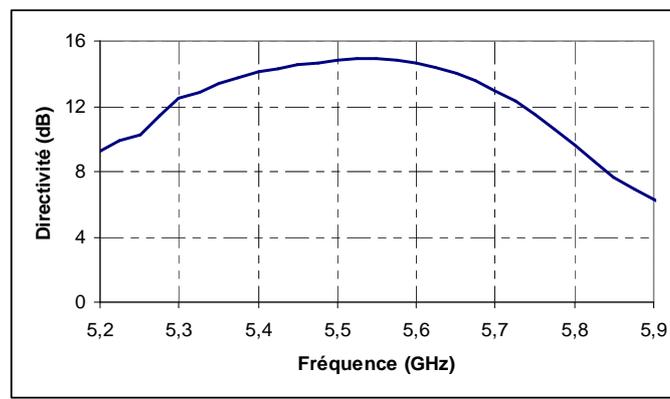


Figure II-38: Directivité fréquentielle de l'antenne BIE coaxiale simulée

La directivité présente une valeur maximale à 5.55 GHz. les diagrammes de rayonnement à cette fréquence dans le plan vertical et horizontal de la structure, sont montrés respectivement sur la Figure II-39.

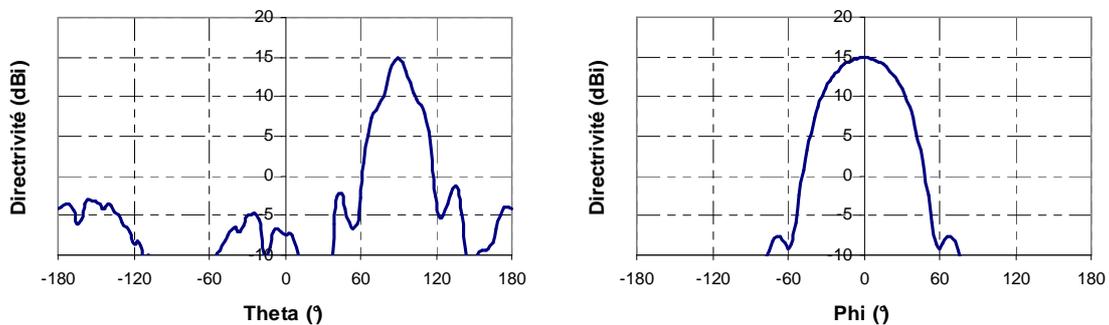


Figure II-39: Diagrammes de rayonnement simulés à 5.55 GHz dans le plan vertical et horizontal de l'antenne BIE coaxiale à rayonnement sectorielle

II.6.2. Analyse de l'impact du nombre de sources dans le plan horizontal sur les performances de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux

Quand nous parlons du nombre de sources, nous parlons aussi de l'écart angulaire entre ces sources. L'écart entre les sources « Δ » est lié au nombre de source « N » par l'équation II-5.

$$\Delta = \frac{360}{N} \quad \text{Equation II-5}$$

Nous rappelons que dans le cas de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux, une seule source d'excitation est active. Les autres sources à côté sont inactives. Un système de commutation est toujours nécessaire pour commuter entre les différentes sources (Figure II-40).

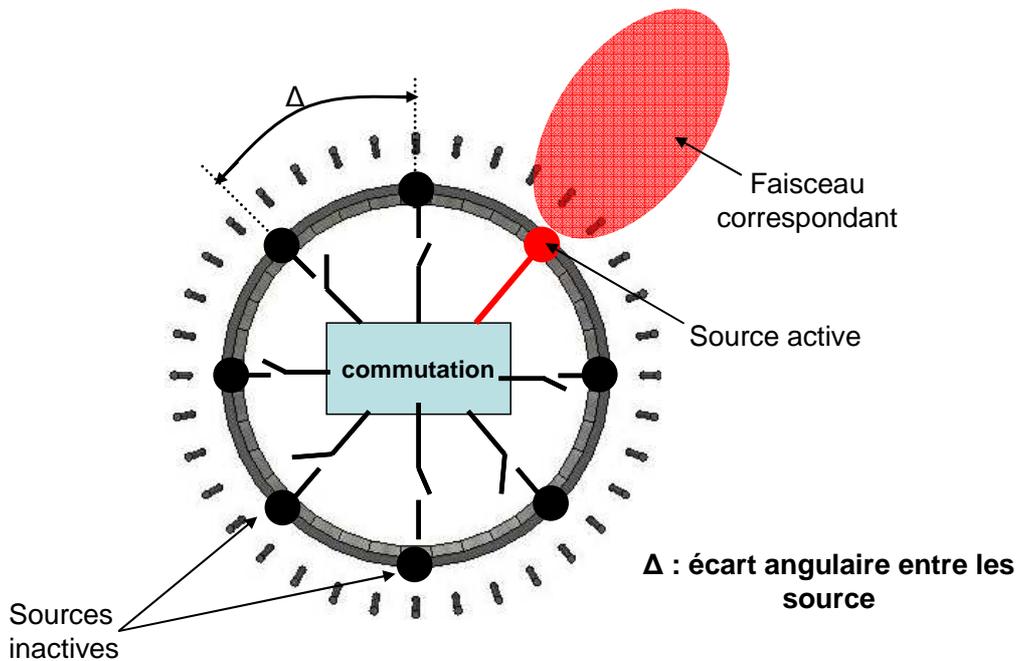


Figure II-40: Exemple d'une antenne BIE coaxiale multifaisceaux avec son système de commutation

La source active est branchée sur la voie active du commutateur, par contre les autres sont branchées sur les voies inactives. Il faut donc connaître les impédances ramenées par les voies inactives du commutateur sur les sources correspondantes afin d'en appréhender leur impact sur les performances de l'antenne dans notre étude.

Pour assurer une couverture omnidirectionnelle rapide du plan horizontal, le temps de commutation entre les sources doit être très court. Les commutateurs à diode PIN sont un bon choix, puisque leurs temps de commutation est inférieur que la microseconde (25 ns ~ 100

ns). Pour ce type de commutateurs, deux topologies existent : les commutateurs absorbitifs et les commutateurs réfléchifs. L'analyse de l'impact du nombre de sources sur les performances va être étudiée dans les deux cas.

II.6.2.1. Cas d'un commutateur absorbitif

La Figure II-41 montre un schéma d'un commutateur absorbitif à base de diode PIN.

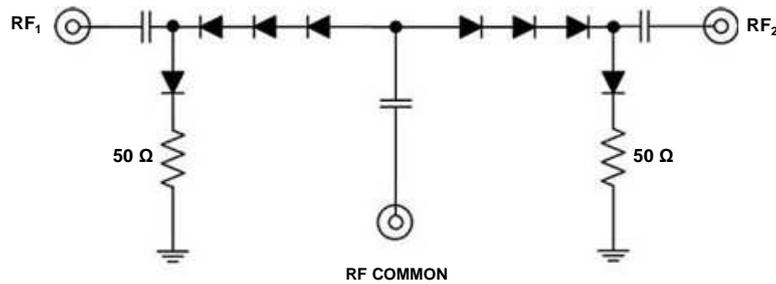


Figure II-41: Schématique d'un commutateur absorbitif à base de diodes PIN

Lorsque la diode est en état bloqué, elle réagit comme un circuit ouvert, le signal est donc passant. La source correspondante est alors activée. Dans le cas où la diode est passante, la voie correspondante est inactive. Ainsi, le commutateur ramène une charge 50Ω sur les sources inactives.

La Figure II-42 montre le couplage entre deux sources adjacentes en fonction de l'écart angulaire entre les sources.

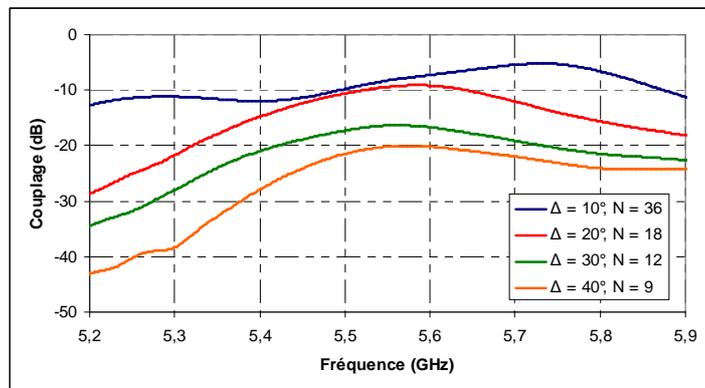


Figure II-42: Couplage entre deux sources adjacentes pour des différentes valeurs de Δ

Nous remarquons que quand l'écart angulaire entre les sources diminue, le couplage entre deux sources adjacentes devient plus important. Pour un écart angulaire de 10° , le couplage atteint les -5 dB.

Les courbes de la directivité fréquentielle de l'antenne pour les différentes valeurs de Δ sont présentées sur la Figure II-43.

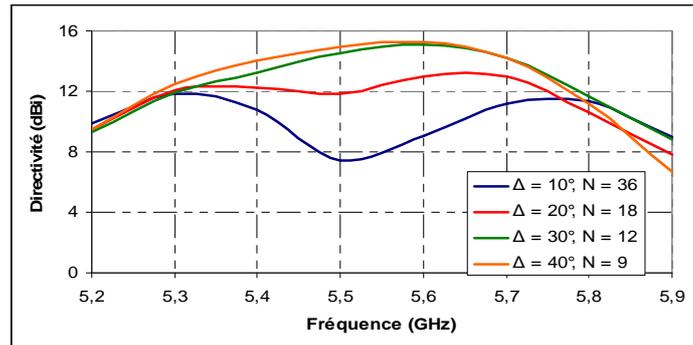


Figure II-43: Courbes de la directivité fréquentielle pour des différentes valeurs de Δ

Le couplage augmente avec la diminution de l'écart angulaire. Ainsi son effet sur la directivité fréquentielle devient nettement remarquable. Pour $\Delta = 10^\circ$ et 20° , la directivité présente un creux important autour de 5.55 GHz. à partir d'un écart angulaire de 30° , l'effet du couplage sur la directivité commence à disparaître. La directivité fréquentielle sera quasiment identique à celle de l'antenne BIE coaxiale sectorielle simulée avant (cf. Figure II-38)

Observons l'influence de l'écart angulaire sur les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal de l'antenne (Figure II-44).

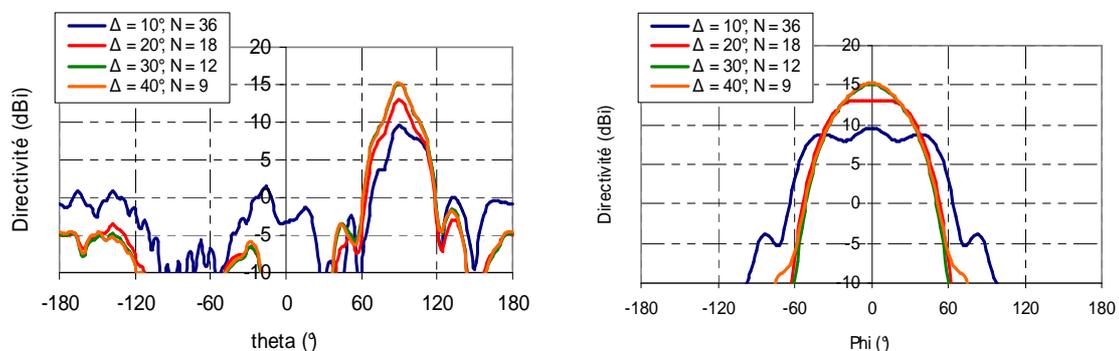


Figure II-44: Diagrammes de rayonnement à 5.55 GHz dans le plan vertical et horizontal de l'antenne pour des différentes valeurs de Δ

Pour un écart angulaire de 10° , le fort couplage introduit une chute de directivité dans le plan vertical et horizontal, avec l'apparition des ondulations dans le lobe principale du plan horizontal. Pour un écart angulaire de 20° , les ondulations dans le lobe principal du plan horizontal disparaissent, mais la chute de directivité est toujours existante. A partir d'un écart de 30° , les diagrammes de rayonnement deviennent identiques. L'influence du couplage est donc négligeable.

II.6.2.2. Cas d'un commutateur réflectif

Le schéma d'un commutateur réflectif à base de diodes PIN est montré sur la Figure II-45.

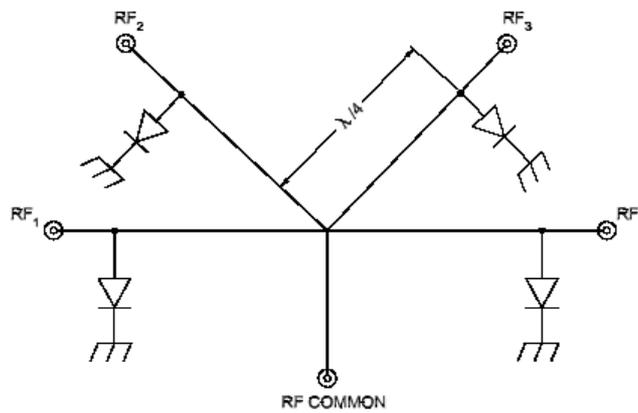


Figure II-45: Schématisation d'un commutateur réflectif à base de diodes PIN

Comme dans le cas d'un commutateur absorbant, le signal est passant quand la diode est bloquée. Par contre, quand la diode est passante, les voies inactives ramènent des courts-circuits sur les sources inactives.

Les courbes de la directivité fréquentielle pour les différentes valeurs de Δ quand les sources inactives sont court-circuitées sont présentées sur la Figure II-46.

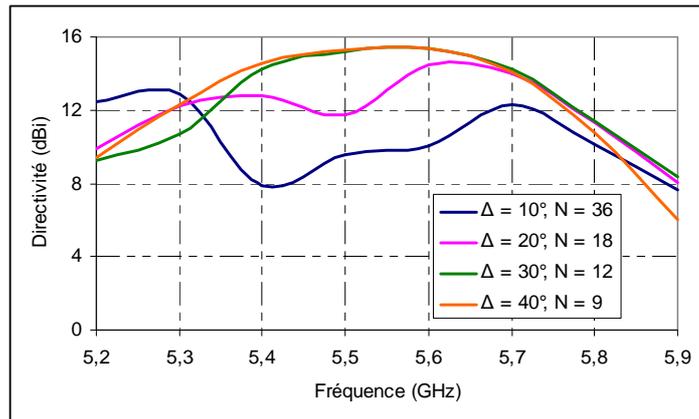


Figure II-46: Courbes de la directivité fréquentielle pour des différentes valeurs de Δ

Dans les cas où $\Delta = 10^\circ$ et 20° , l'influence du fort couplage est toujours existant sur la directivité fréquentielle, d'où l'apparition des creux. À partir d'un écart angulaire de 30° , l'effet du couplage devient négligeable. La directivité fréquentielle sera quasiment identique à celle de l'antenne BIE coaxiale sectorielle simulée avant (cf. Figure II-38)

Les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal quand les sources inactives sont court-circuitées sont présentés sur la Figure II-47 pour des différentes valeurs d'écart angulaire.

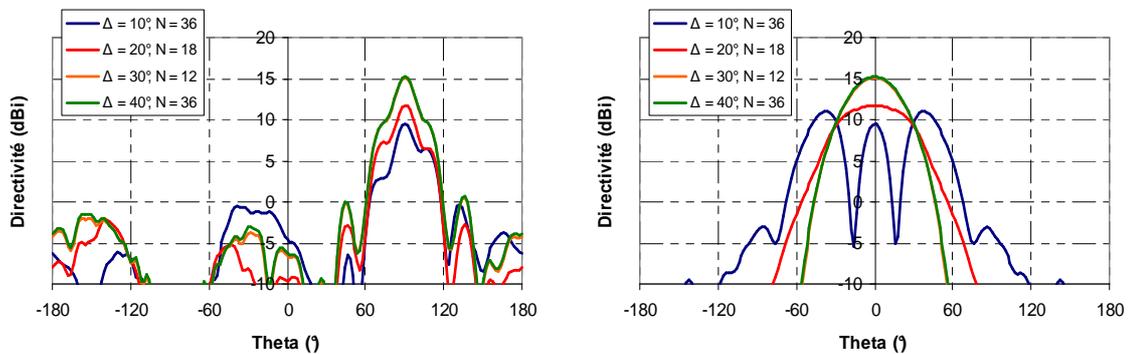


Figure II-47: Diagrammes de rayonnement à 5.55 GHz dans le plan vertical et horizontal de l'antenne pour des différentes valeurs de Δ .

Pour un écart angulaire de 10° , la chute de directivité est toujours présente dans le plan vertical et horizontal quand les sources inactives sont court-circuitées, avec des fortes ondulations dans le lobe principal du plan horizontal. Pour un écart angulaire de 20° , les ondulations dans le lobe principal du plan horizontal disparaissent, mais la chute de directivité

existe toujours. A partir d'un écart angulaire de 30° , les diagrammes de rayonnement deviennent identiques. L'influence du couplage est donc négligeable.

L'étude des performances de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux en fonction du nombre des sources dans le plan horizontal nous a montré que quand le nombre de ces dernières augmente, le couplage devient de plus en plus fort et son influence sur les performances de l'antenne sont de plus en plus néfastes.

II.7. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, la **méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux**, inspirée de la structure BIE coaxiale omnidirectionnelle a été présentée. Les différentes étapes de conception (sectorisation de rayonnement puis excitation multi-sources) ont été expliquées.

Dans la deuxième partie, une **étude de l'antenne BIE coaxiale sectorielle en fonction de la fréquence** nous a permis de comprendre son fonctionnement général et d'apercevoir le comportement du champ électrique à l'intérieur de la structure, ce qui nous a aidé à comprendre l'évolution des diagrammes de rayonnement.

La troisième partie a été consacrée à **étudier l'influence des différents paramètres physiques** de l'antenne sur son fonctionnement. Les dimensions des différents composants de l'antenne ont été faites variées pour observer leurs influences sur le comportement du champ électrique aussi que les diagrammes de rayonnement.

Dans la quatrième partie, et en se basant sur les études effectuées avant, une première **antenne BIE coaxiale multifaisceaux 4*90°**, a été conçue. Le recouvrement entre les différents faisceaux a été étudié pour reconstituer l'omnidirectionnalité. Les performances ont été comparées à celles d'une antenne BIE omnidirectionnelle pour conclure le gain apporté par la procédure de sectorisation.

Dans la dernière partie, une antenne BIE coaxiale multifaisceaux a été étudiée en **fonction du nombre de sources dans le plan horizontal**. Une analyse de l'impact de l'augmentation du nombre de source sur les performances a été effectuée. Les différentes simulations nous ont montré que **le couplage** devient plus important quand le nombre de source augmente et introduit une dégradation des performances de l'antenne.

Dans le chapitre suivant nous présenterons une méthode pour minimiser le couplage entre les sources dans le cas où nous nous intéressons à concevoir une antenne BIE multifaisceaux avec un grand nombre de sources dans le plan horizontal.

CHAPITRE III

Antenne BIE multisectorielle dans le plan horizontal.

Applications associées.

- ❖ Réduction du couplage entre les sources
- ❖ Agilité de l'antenne BIE multisectorielle
- ❖ Première application : Reconfiguration du diagramme dans le plan horizontal
- ❖ Deuxième application : Détection d'angles d'arrivée
- ❖ Troisième application : RADAR

III.1. Introduction

L'étude de l'antenne BIE **coaxiale multifaisceaux 4*90°** nous a montré son intérêt pour l'amélioration de la couverture omnidirectionnelle dans le plan horizontal. Cependant, en augmentant le nombre de sources dans le plan horizontal pour avoir plus de faisceaux dans ce plan, **le couplage** entre les sources devient fort, d'où une dégradation de performances

Dans une première partie, nous présenterons **une méthode pour minimiser le couplage** entre les sources dans le cas où leur nombre dans le plan horizontal est important, par l'insertion des murs métalliques entre chacune de ces sources. Ainsi, le mode BIE cylindrique évanescence en « ϕ » n'existe plus. La nouvelle structure sera considérée comme un réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles que nous appellerons **l'antenne BIE multisectorielle**.

La deuxième partie sera consacrée à la conception et la réalisation d'une **antenne BIE multisectorielle pour une application de reconfiguration de diagramme**. D'abord, Le cahier de charges amendé sera présenté. Ensuite, une première simulation de l'antenne nous montrera que ses performances ne sont pas assez satisfaisantes. C'est pourquoi nous essayerons **d'améliorer les performances** de l'antenne.

Enfin, les résultats de simulation seront validés par la **fabrication d'un prototype**. Les mesures seront comparées à la simulation. **Un système de commutation** à base de commutateurs SP6T pour le prototype fabriqué sera aussi décrit.

Dans la troisième partie, l'antenne BIE multisectorielle utilisée pour la reconfiguration de diagramme sera étudiée pour des **applications de diversité et de caractérisation de canal de propagation**. Ces deux applications nécessitent une détection de directions d'arrivée des signaux. les faisceaux doivent de préférence être étroits pour avoir une bonne résolution angulaire dans le plan horizontal. Cependant, Les faisceaux de l'antenne BIE multisectorielle déjà étudiée sont larges ($\approx 50^\circ$). Cette antenne, étant considérée comme un réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles, le pincement du lobe dans le plan horizontal sera possible en alimentant simultanément plusieurs secteurs avec les phases correspondantes. Les performances de l'antenne après le pincement du lobe dans le plan horizontal seront présentées.

Dans la dernière partie de ce chapitre, la même antenne BIE multisectorielle sera étudiée pour des **applications RADAR**. Des différentes applications RADAR seront citées. Pour certaines de ces applications le gain de l'antenne doit être très élevé (≥ 25 dB) pour avoir une **portée suffisante**. Il est donc nécessaire d'alimenter simultanément plusieurs secteurs dans le plan horizontal et utiliser **la technique multisource [45, 46]** dans le plan vertical pour avoir le maximum de directivité. Ensuite, nous verrons que la directivité de l'antenne peut aussi être améliorée en élargissant le diamètre du cylindre et augmentant le nombre de secteurs dans le plan horizontal. Des différentes simulations seront effectuées et leurs résultats seront présentés.

III.2. Obtention de l'antenne BIE multisectorielle par la réduction du couplage inter-sources

L'étude de l'antenne BIE coaxiale dans le chapitre précédent, nous a montré que les performances de l'antenne se dégradent, quand le nombre de sources dans le plan horizontal augmente. Cette dégradation a été due au couplage entre les sources qui devient de plus en plus fort avec l'augmentation du nombre de sources dans le plan horizontal.

III.2.1. Origine du couplage

Nous expliquons dans ce paragraphe les causes du fort couplage. En effet, le fait que les sources soient placées à l'intérieur d'une cavité BIE résonante laisse le champ créé par la source active, malgré son évanescence suivant φ , atteindre les sources inactives adjacentes et leur céder une partie de l'énergie apportée (Figure III-1).

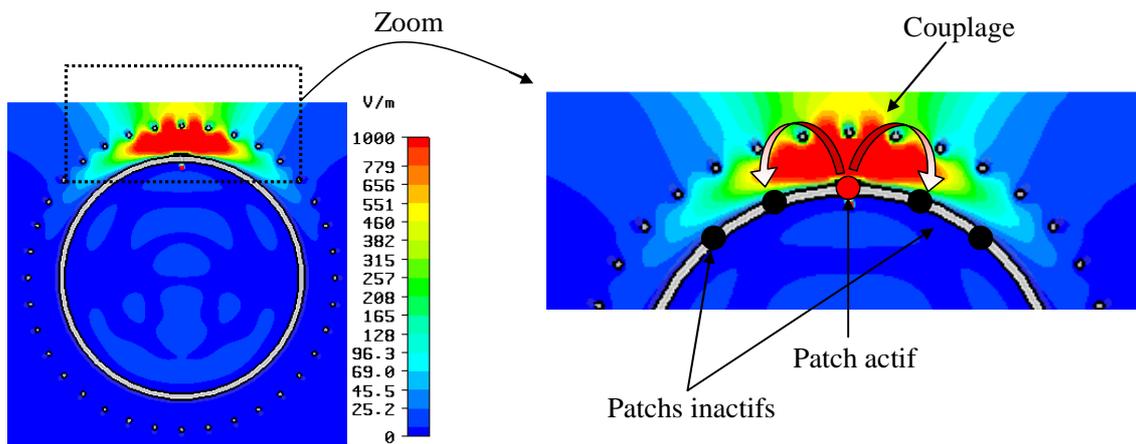


Figure III-1: cartographie de champ électrique dans le plan horizontal et couplage entre les sources

III.2.2. Insertion des murs métalliques

Pour réduire le couplage, nous avons eu l'idée d'empêcher le champ électrique créé par la source active d'atteindre les autres sources inactives. Nous allons prendre un exemple du chapitre précédent où nous avons **18 sources** dans le plan horizontal.

En effet, la composante principale du champ électrique dans la cavité est la composante E_z , vu que la polarisation de l'antenne est verticale. Donc pour éliminer ce champ, nous pouvons placer verticalement des courts-circuits-électriques (CCE) entre les différentes sources (Figure III-1). Le champ E_z , étant tangentiel à ces courts-circuits, sera nul. D'autre

part, l'évanescence du champ suivant φ , nous laisse insérer ces murs métalliques sans affecter la phase du champ à ces endroits (cf. chapitre I, paragraphe I.3.2.4).

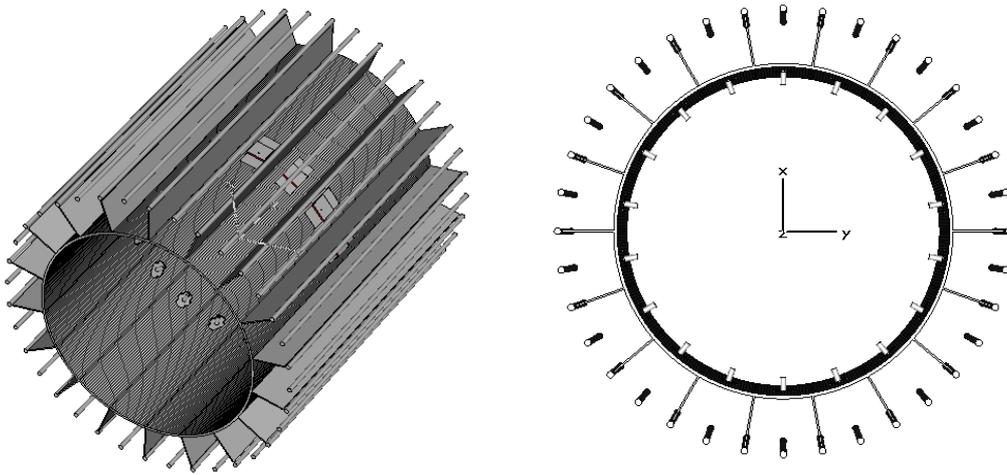


Figure III-2: Exemple d'une Structure BIE multisectorielle après insertion des murs métalliques

Ainsi, le champ est piégé entre les deux murs métalliques (Figure III-3.a). Dans ce cas, le mode coaxiale évanescence en « φ » n'existe plus. L'antenne est ainsi considérée comme un réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles, dont la forme est légèrement différente de l'antenne BIE sectorielle planaire (Figure III-3.b) mais le fonctionnement, comme nous allons voir, est le même. La nouvelle structure sera appelée : **antenne BIE multisectorielle**.

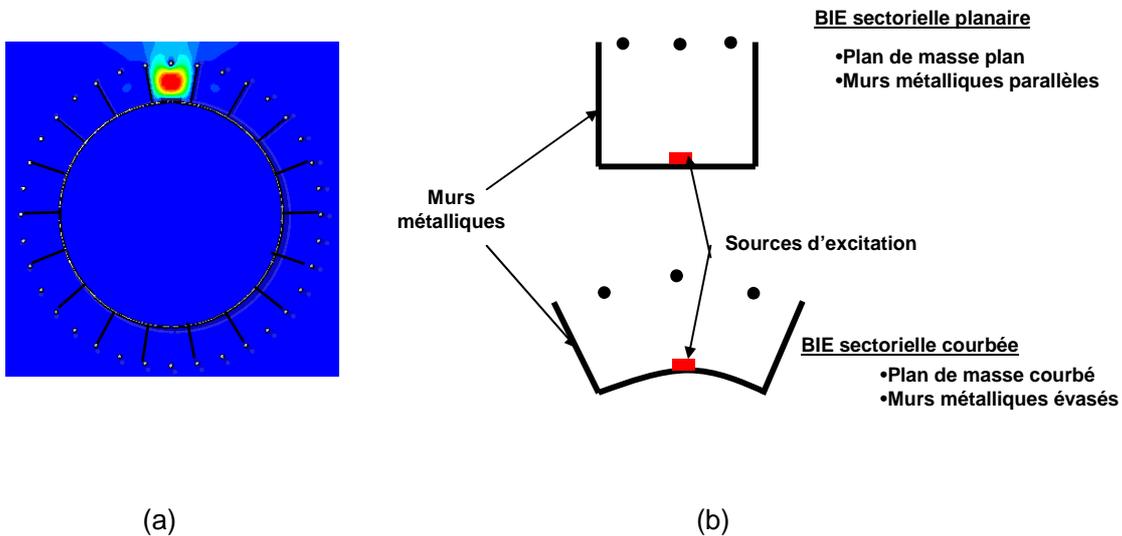


Figure III-3: (a).cartographies de champ E après insertion des murs métalliques, (b) différence entre l'antenne BIE sectorielle planaire et courbée

La courbe du module de champ E au sein de la cavité en fonction de φ est tracée sur la Figure III-4, où nous avons forcé le champ à s'annuler à $\pm 10^\circ$.

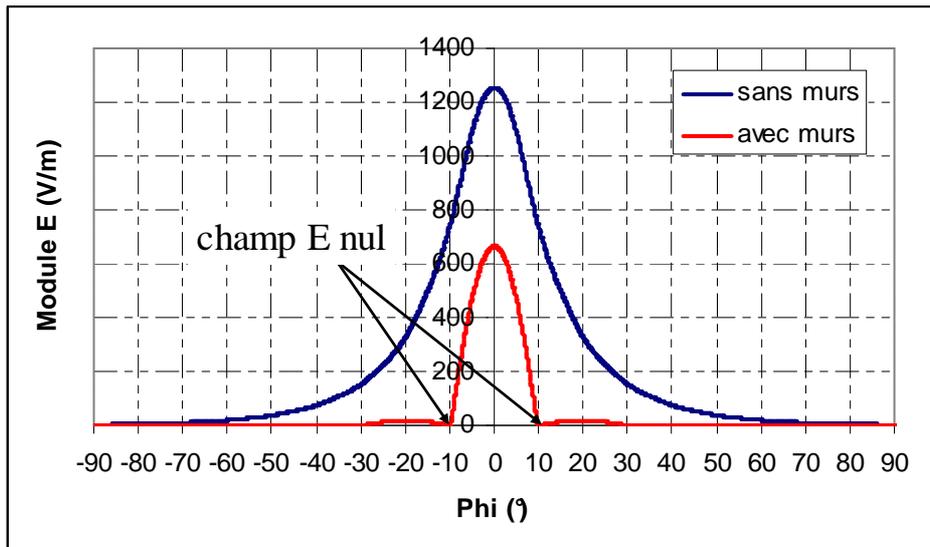


Figure III-4: Module de champ E en fonction de l'angle « phi »

III.2.2.1. Couplage inter-sources de la nouvelle structure

Le couplage entre deux sources adjacentes après insertion des murs métalliques est montré sur la Figure III-5, comparé à celui de la structure sans murs.

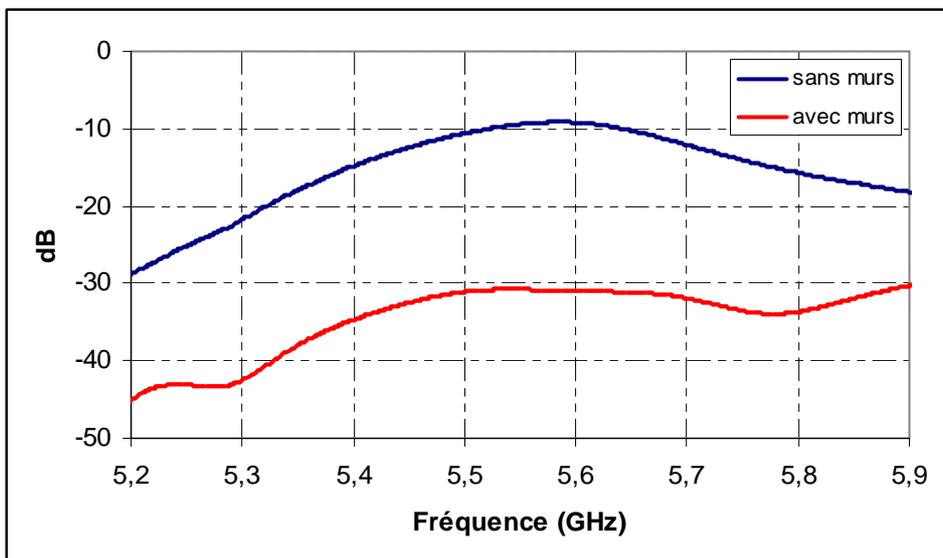


Figure III-5: couplage entre deux patches adjacents avant et après insertion des murs métalliques

Nous pouvons observer l'avantage de l'utilisation des murs métalliques sur la courbe de couplage, ce dernier passe de -8 dB à -30 dB entre deux sources adjacentes.

III.2.2.2. Rayonnement de la nouvelle structure

Observons maintenant la directivité fréquentielle et les diagrammes de rayonnement après l'insertion des murs métalliques (Figure III-6 et Figure III-7 respectivement).

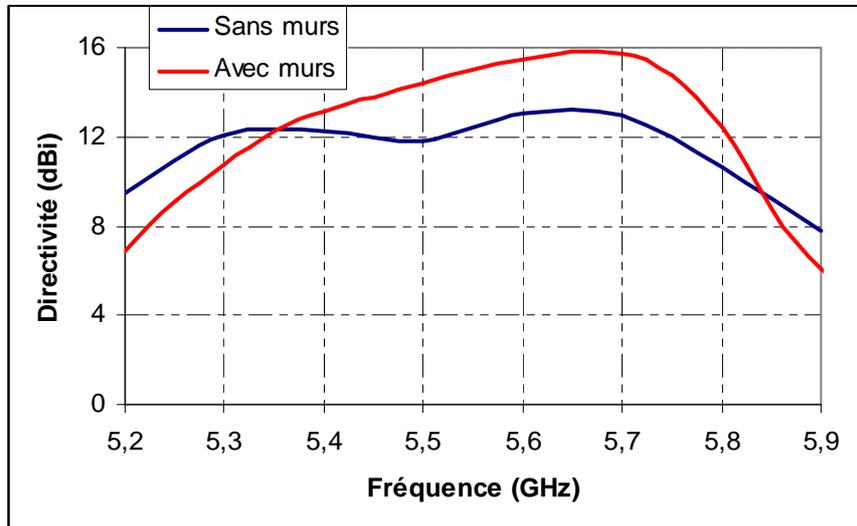


Figure III-6: Directivité fréquentielle avant et après insertion des murs métalliques

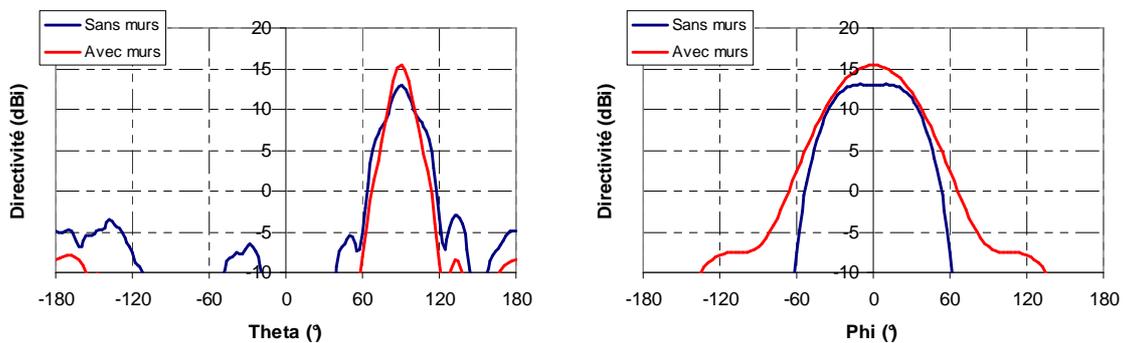


Figure III-7: Diagrammes de rayonnement à 5.6GHz dans le plan vertical et horizontal des structures avant et après insertion des murs métalliques

Nous remarquons l'absence de l'effet du couplage après l'insertion des murs métalliques entre les sources. Le creux dans la courbe de la directivité fréquentielle a disparu et les diagrammes de rayonnement sont plus propres.

III.3. Agilité de l'antenne BIE multisectorielle

L'antenne BIE multisectorielle est capable de couvrir le plan horizontal par un certain nombre de faisceaux. Un système de commutation est donc nécessaire pour assurer l'agilité de

l'antenne. D'autre part, cette antenne est considérée comme un réseau cylindrique de N antennes BIE sectorielles. Ainsi, un ou plusieurs antennes BIE sectorielles peuvent être alimentées simultanément, selon la forme du faisceau que l'on veut (large ou étroit). Les principes de commutation dans les cas où nous alimentons un seul ou plusieurs secteurs à la fois sont présentés sur les respectivement.

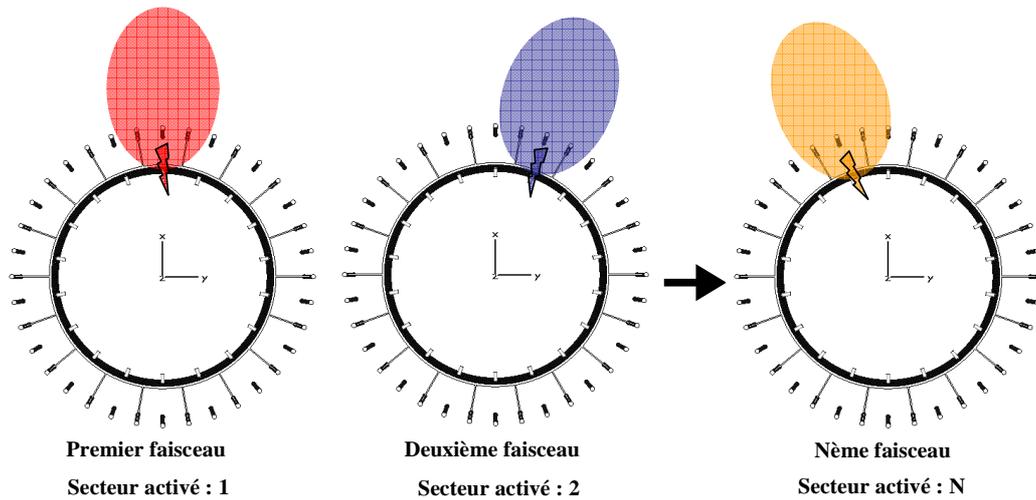


Figure III-8: Principe de commutation dans le cas où un seul secteur est alimenté dans le plan horizontal

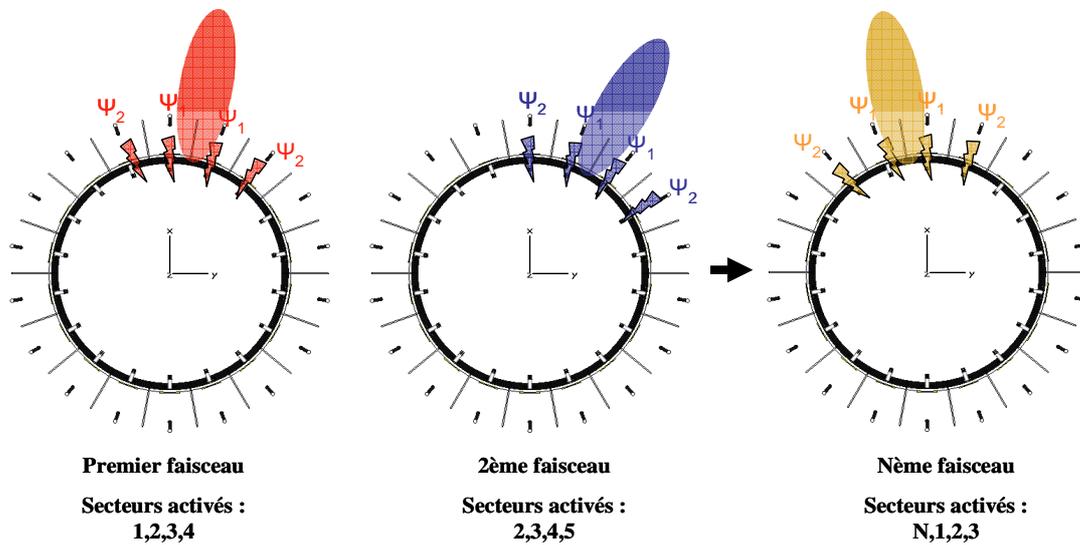


Figure III-9: Principe de commutation dans le cas où plusieurs secteurs sont alimentés dans le plan horizontal (Exemple pour 4 secteurs)

Le principe de l'antenne BIE multisectorielle ainsi que le principe de la commutation sont présentés. Nous verrons dans la suite les différentes applications pour lesquelles cette antenne est adéquate.

III.4. La reconfiguration du diagramme dans le plan horizontal

III.4.1. Objectifs et cahier de charges

L'antenne BIE multisectorielle dédiée à cette application doit être capable de changer sa couverture dans le plan horizontal pour satisfaire les abonnés. Nous pouvons imaginer, par exemple, l'alimentation d'un nombre de secteur pour couvrir une zone industrielle la journée (Figure III-10.a), et un autre nombre de secteur pour couvrir une zone résidentielle le soir (Figure III-10.b). Cette antenne fait partie du projet **SYSMART** intégré au pôle limousin **ELOPSYS** et associant la société **RADIALL SYSTEMS**, le laboratoire **XLIM** (avec son département **O.S.A**) et **CISTEME**. Ce projet porte sur la mise au point de « **smart antennas** » ou « **antennes intelligentes** »

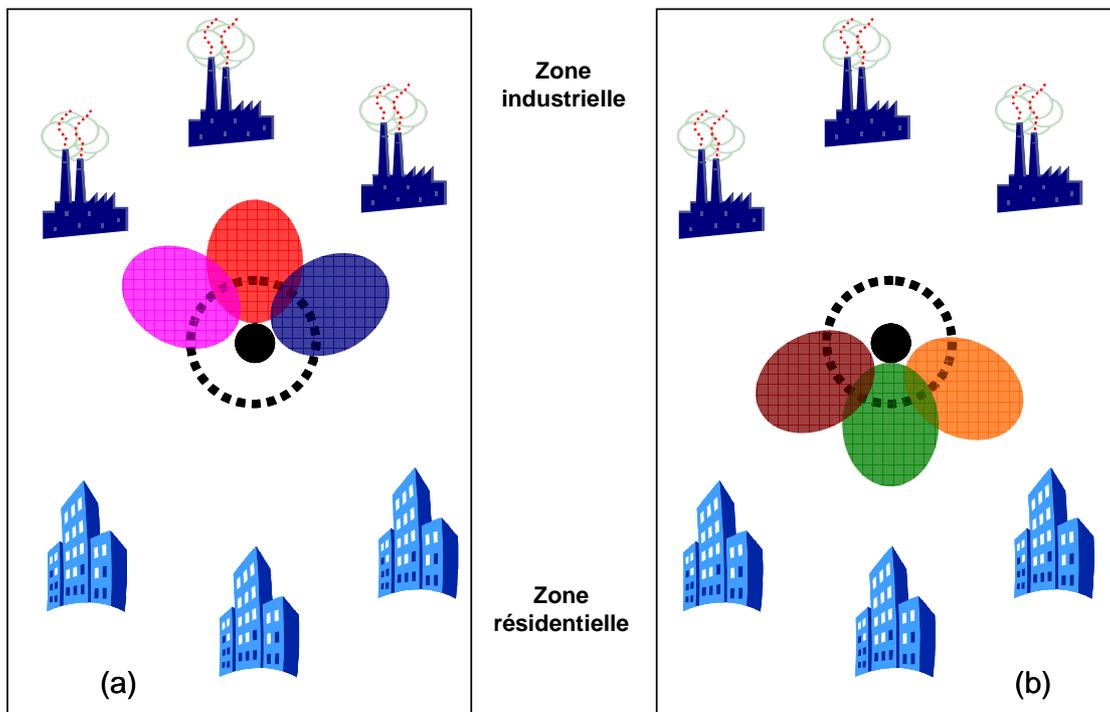


Figure III-10: Configuration pendant la journée (a) et configuration pendant le soir (b)

Un cahier de charges nous a été demandé pour ce type d'applications. Il comporte les caractéristiques techniques mentionnées dans le Tableau III-1.

Bande de fréquences	5.4 – 5.7 GHz soit 5.4%
Nombre de faisceaux	18, soit un faisceau tous les 20°
TOS	2 max ($ S_{11} < -10$ dB)
Caractéristiques d'un faisceau	
Gain maximal	15 dB
Ouverture plan H	~ 50 °
Ouverture plan E	~ 20°
Polarisation	Verticale
Dimensions	
Diamètre	300 mm maximum
Hauteur	300 mm maximum

Tableau III-1: Cahier de charges

III.4.2. Antenne BIE multisectorielle simulée

III.4.2.1. Description de l'antenne

L'antenne BIE multisectorielle simulée avec ses différents paramètres physiques sont présentés sur la Figure III-11.

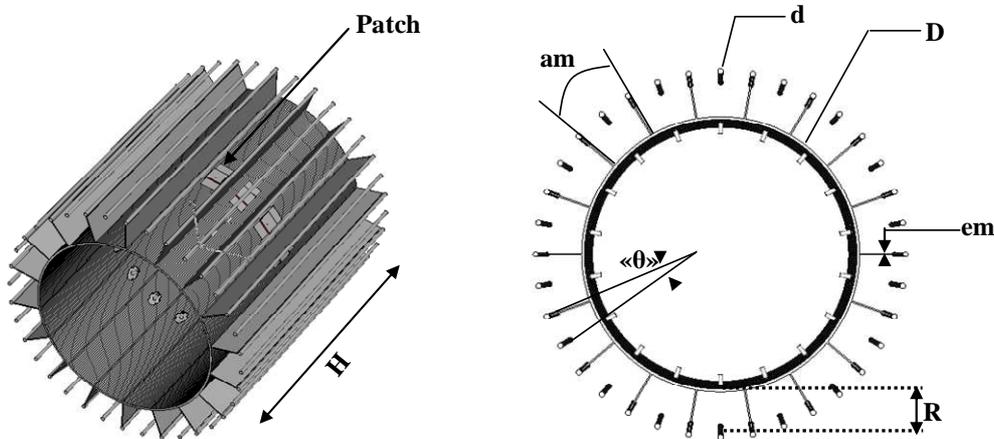


Figure III-11: Antenne BIE multisectorielle simulée

L'antenne est composée d, un cylindre métallique de diamètre « D » de **200 mm**, entourée de 36 tiges métalliques (soit un espacement angulaire « θ » = **10°**) de section circulaire dont le diamètre « d » est de **4 mm**. La distance « R » entre le cylindre métallique et les tiges métalliques pour un fonctionnement autour de la fréquence centrale (5.55 GHz) est égale à **31 mm**. 18 mur métalliques dont l'épaisseur « em » est égale à **1 mm** sont placées autour du cylindre avec un espacement angulaire « am » de 20°. Les sources d'excitation dont le

nombre est **18** sont des antennes patch (Figure III-12) placées chacune entre deux murs métalliques.

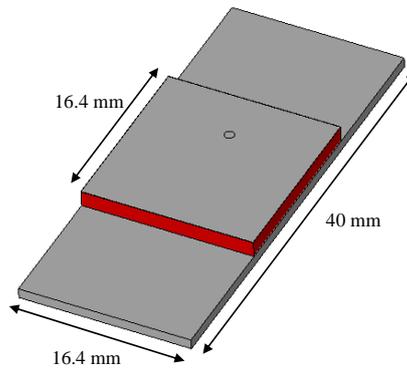


Figure III-12: Patch d'excitation

Dû à la présence des murs, le couplage entre deux secteurs adjacents est négligeable (inférieur à -30 dB). Nous avons donc constatés que les caractéristiques peuvent être obtenues en simulant un seul secteur de l'antenne complète, composé de 2 murs métalliques, 3 tiges métalliques, une partie du cylindre métallique et un patch d'excitation (Figure III-13).



Figure III-13: Un secteur de l'antenne complète

III.4.2.2. Résultats de simulations

Le coefficient de réflexion du secteur du secteur simulé est présenté sur la Figure III-14.

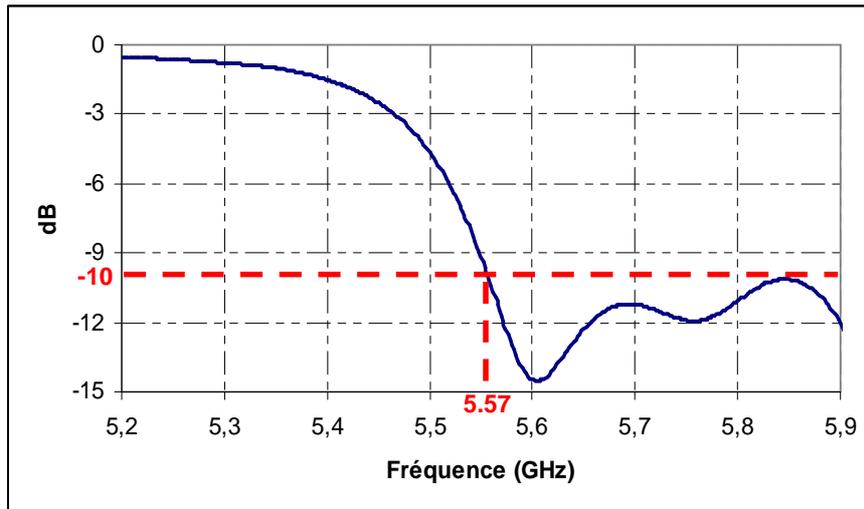


Figure III-14: Coefficient de réflexion du secteur simulé

Dans la bande (5.57 – 5.7) GHz, le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB. Entre 5.4 GHz et 5.57 GHz, il varie entre -2 dB et -10 dB, ce qui nécessitent une étude supplémentaire ou la conception d'un circuit d'adaptation.

La Figure III-15 montre la directivité et le gain réalisé du secteur simulé en fonction de la fréquence.

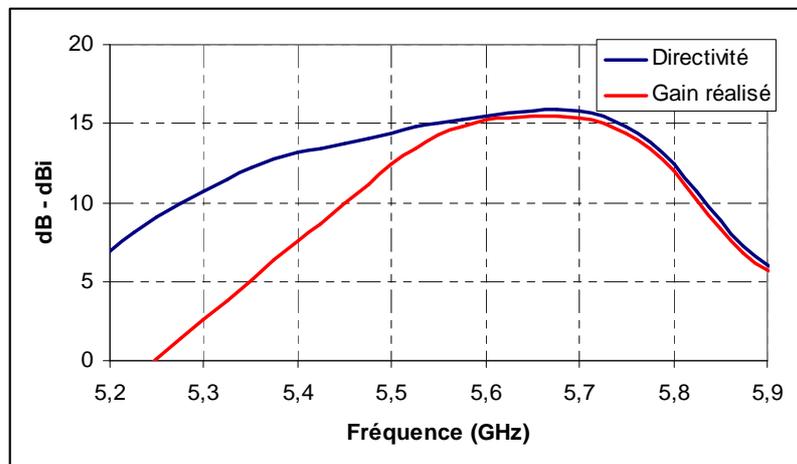


Figure III-15: Directivité et gain réalisé fréquentiels du secteur simulé

Dans la bande (5.4 – 5.7) GHz, la directivité varie entre 13 dBi et 15.75 dBi (soit 2.75 dB de variations). Quant au gain réalisé, il présente une chute par rapport à la directivité entre 5.4 GHz et 5.57 GHz du à la désadaptation du secteur dans cette bande.

L'évolution des diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal et vertical est montrée dans le Tableau III-2.

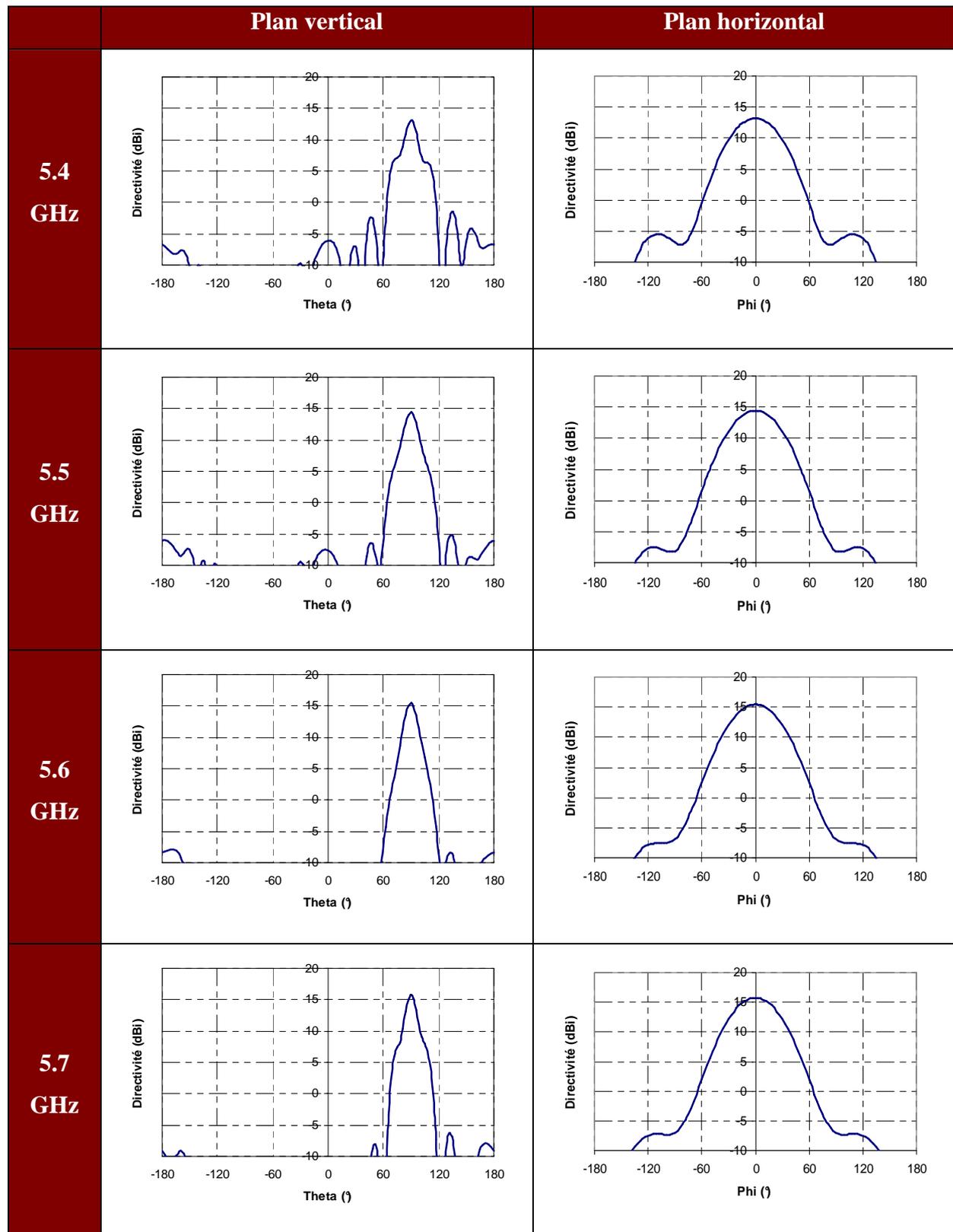


Tableau III-2: Evolution des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal du secteur simulé

Dans le plan vertical, les diagrammes de rayonnement sont acceptables, à l'exception d'un petit épaulement à 5.4 GHz, avec des lobes secondaires inférieur à -15 dB du maximum. L'angle d'ouverture dans ce plan est de l'ordre de 15°.

Dans le plan horizontal, le rayonnement est correct sur toute la bande (5.4 - 5.7) GHz, avec des lobes secondaires inférieur à -20 dB du maximum et un angle d'ouverture de 54°.

III.4.3. Amélioration des performances

La simulation du secteur dans le paragraphe précédent a donné des résultats intéressants. Cependant, il nous semblait que des améliorations peuvent être apportées à la structure. En effet, la directivité du secteur simulé avant présente des variations de 2.75 dB dans la bande (5.4 – 5.7) GHz. l'adaptation à -10 dB a été obtenue sur 130 MHz (5.57 - 5.7) GHz.

Le but dans ce paragraphe est de modifier la structure pour réduire la variation de la directivité dans la bande (5.4 – 5.7) GHz, mais aussi d'élargir la bande d'adaptation à -10 dB.

III.4.3.1. Modifications apportées

Le nouveau secteur modifié est montré sur la Figure III-16.

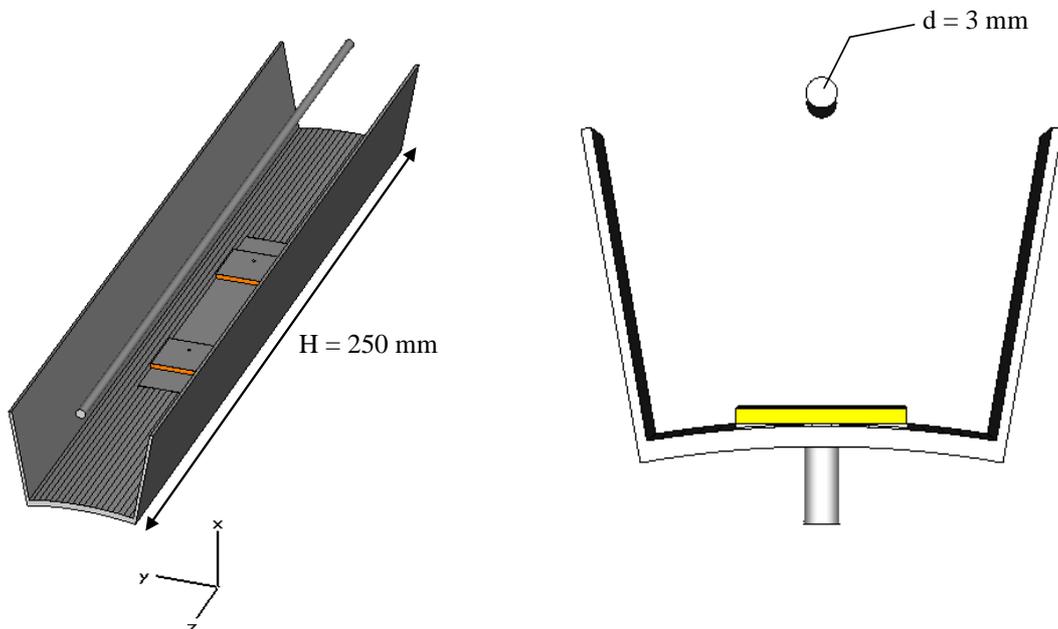


Figure III-16: Nouveau secteur modifié

Les trois tiges circulaires de diamètre $d = 4\text{ mm}$ ont été remplacées par une seule tige avec un nouveau diamètre $d = 3\text{ mm}$. La cavité BIE est ainsi moins résonante, d'où un élargissement de la bande de rayonnement et une possibilité d'élargir la bande d'adaptation. La hauteur H de la structure est réduite à **250 mm**.

La cavité BIE est moins résonante, ce qui va introduire une chute de directivité. Ainsi, pour revenir à la directivité voulue, nous avons utilisé deux patches mis en réseau dans le plan vertical, excitant simultanément le secteur modifié (Figure III-17).

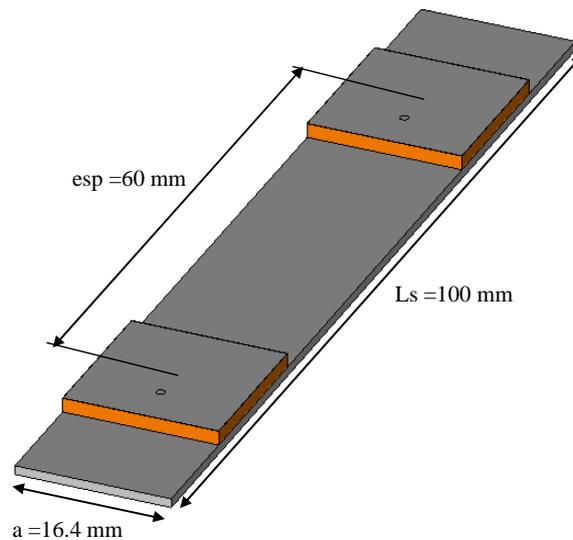


Figure III-17: les deux patches d'excitation du secteur modifié

Le substrat utilisé est toujours le TACONIC TLY-3, avec une épaisseur de 1.575 mm. Les deux patches sont séparés de 60 mm et placés sur une semelle métallique de longueur 100 mm, de largeur 16.4 mm et d'épaisseur 1 mm.

III.4.3.2. Résultats de simulation

Les résultats de simulation du secteur modifié sont comparés à ceux de l'ancien secteur, pour bien remarquer les améliorations apportées. Le coefficient de réflexion (Figure III-18) a été calculé en tenant compte du couplage existant entre les deux patches d'excitation et du fait que les deux patches excitent simultanément la cavité.

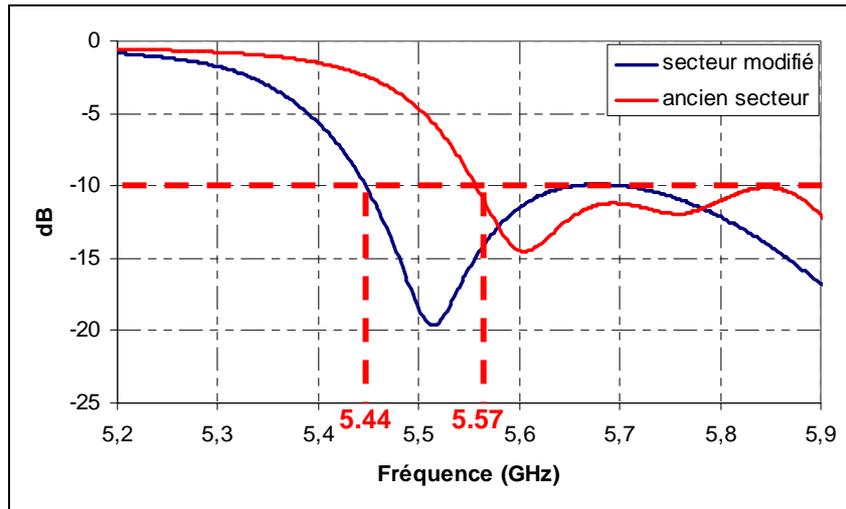


Figure III-18: Coefficient de réflexion du nouveau secteur comparé à celui de l'ancien secteur

La bande adaptée à -10 dB est comprise entre 5.44 GHz et 5.7 GHz (bande élargie de 130 MHz par rapport à l'ancien secteur). Entre 5.4 et 5.44 le coefficient de réflexion est inférieur à -6 dB.

La directivité et le gain réalisé du secteur modifié en fonction de la fréquence sont tracés sur la Figure III-19.

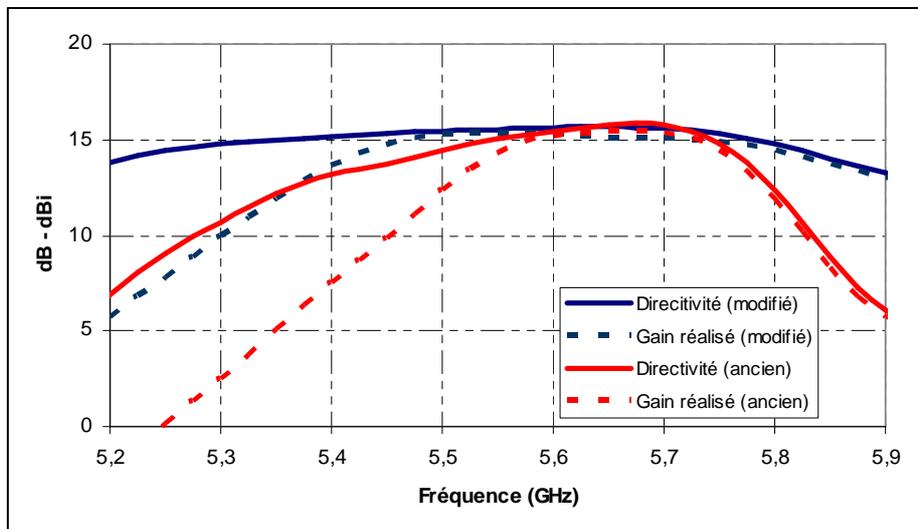


Figure III-19: Directivité et gain réalisé du secteur modifié comparés à ceux de l'ancien secteur

La directivité de la structure modifiée est supérieure à 15 dB dans la bande (5.4 – 5.7) GHz avec de faibles variations. Quant au gain réalisé, il est compris entre 13.6 et 15.35 dB.

Les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal sont contenus dans le Tableau III-3

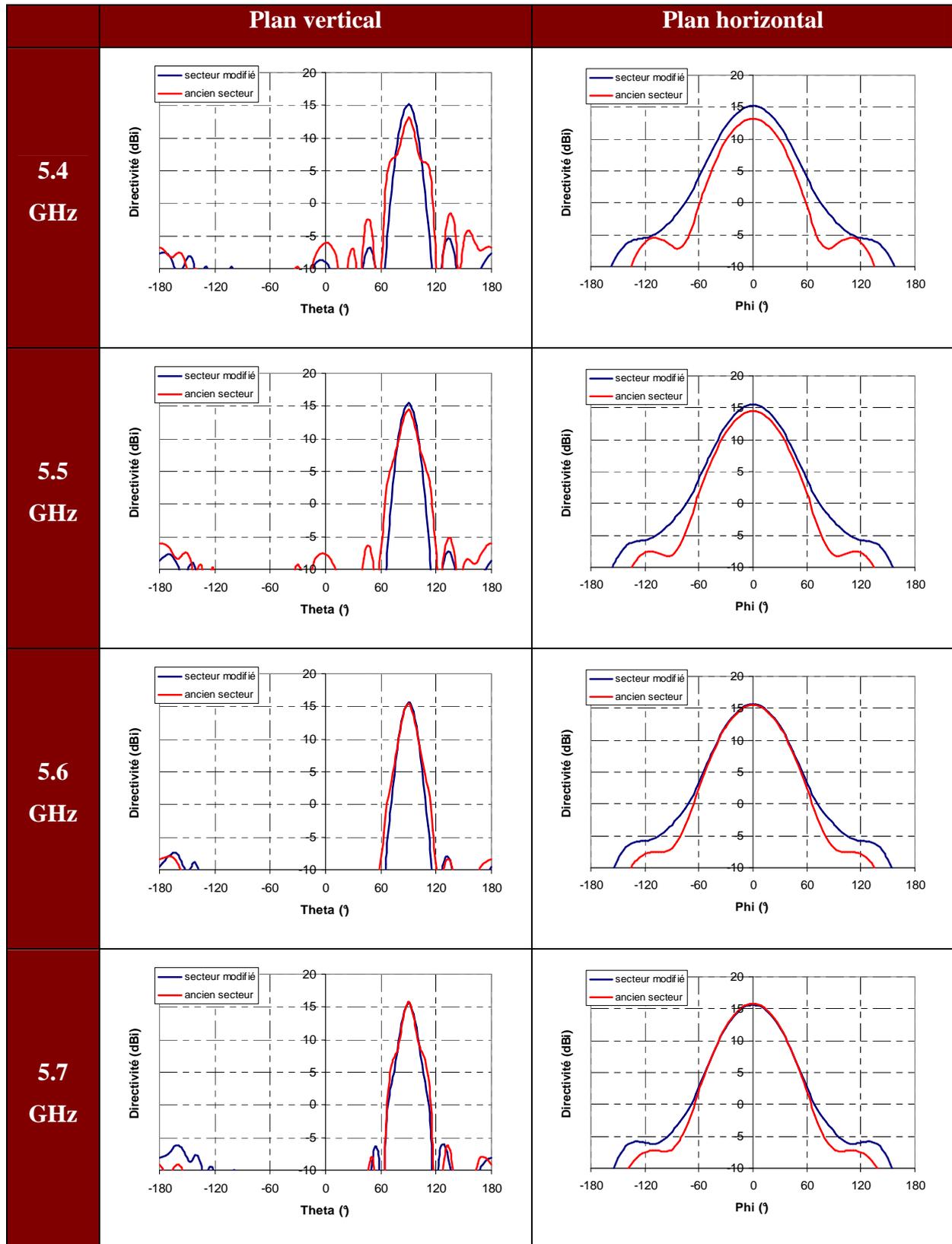


Tableau III-3: Evolution des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal du secteur modifié comparés à ceux de l'ancien secteur

Les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal sont corrects dans toute la bande (5.4 – 5.7) GHz, avec des lobes secondaires inférieur à 20 dB du maximum, et un angle d’ouverture de 15° dans le plan vertical et 53° dans le plan horizontal.

III.4.4. Antenne BIE multisectorielle finale

L’antenne BIE multisectorielle finale est composée de 18 secteurs (cf. Paragraphe III.4.2.1), un secteur tous les 20° (Figure III-20).

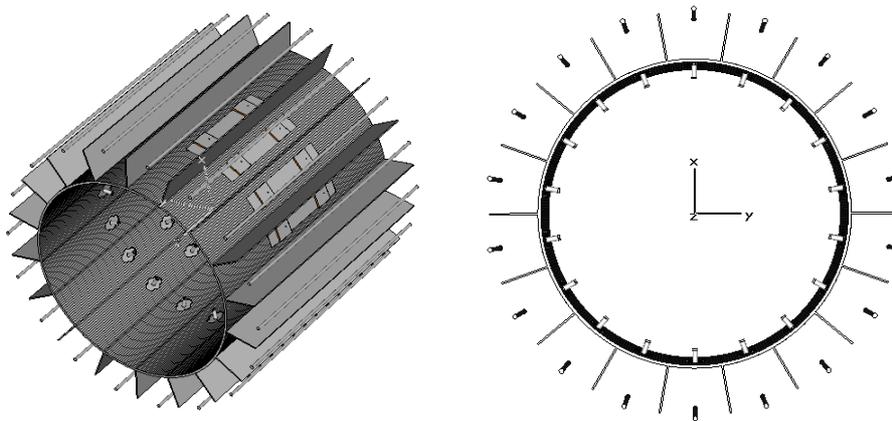


Figure III-20: Schéma de l'antenne BIE multisectorielle finale

Les 18 faisceaux qui peuvent être émis par cette antenne dans le plan horizontal sont présentés sur la Figure III-21. Le recouvrement entre deux lobes adjacents est à 0.4 dB du maximum.

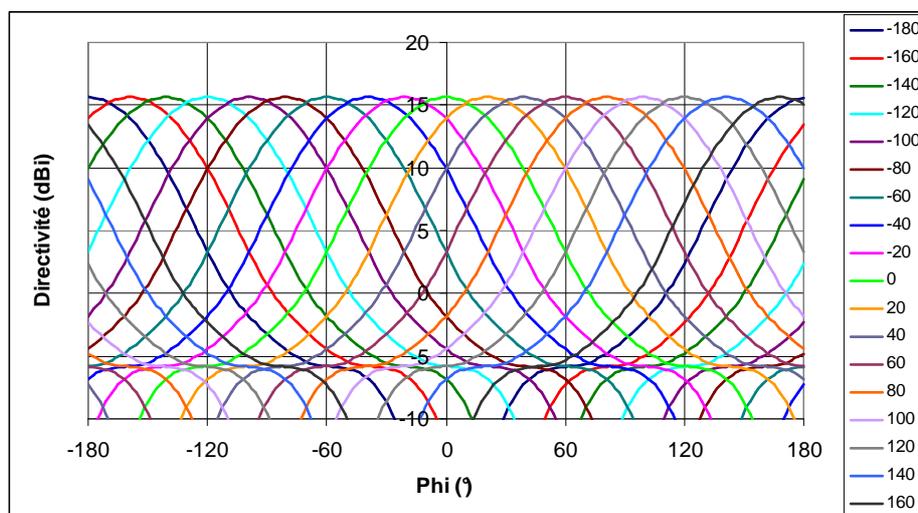


Figure III-21: Les 18 faisceaux émis par l'antenne multifaisceaux tous les 20°

III.4.5. Réalisation et mesures

La structure telle qu'elle est maintenant, donne de très bonnes performances en termes de rayonnement et d'adaptation. Un premier devis a été demandé pour une première réalisation d'un prototype, avec une erreur de précision de $\pm 30 \mu\text{m}$ sur tous les paramètres physiques de la structure.

Le coût de cette antenne a été évalué en tenant compte du coût de la matière première, le temps de travail nécessaire à sa réalisation mais aussi la précision demandée. Le montant final paraissait très élevé (**5000 € HT**), c'est la raison pour laquelle nous avons essayé de réduire le coût de fabrication en simplifiant la structure d'un part, et relâcher la précision sur les paramètres physiques d'un autre part.

III.4.5.1. Réduction du coût de l'antenne

- **Modifications**

La Figure III-22 montre le secteur avec les nouvelles modifications apportées pour simplifier la réalisation. Les murs métalliques ont une épaisseur de **3 mm** au lieu de **1 mm**, pour éviter l'erreur de la planéité tout au long de la structure. L'élargissement des murs a entraîné un décalage fréquentiel. La distance « **R** » entre l'âme centrale et les tiges est donc réglé à **33 mm** pour revenir à la fréquence voulue

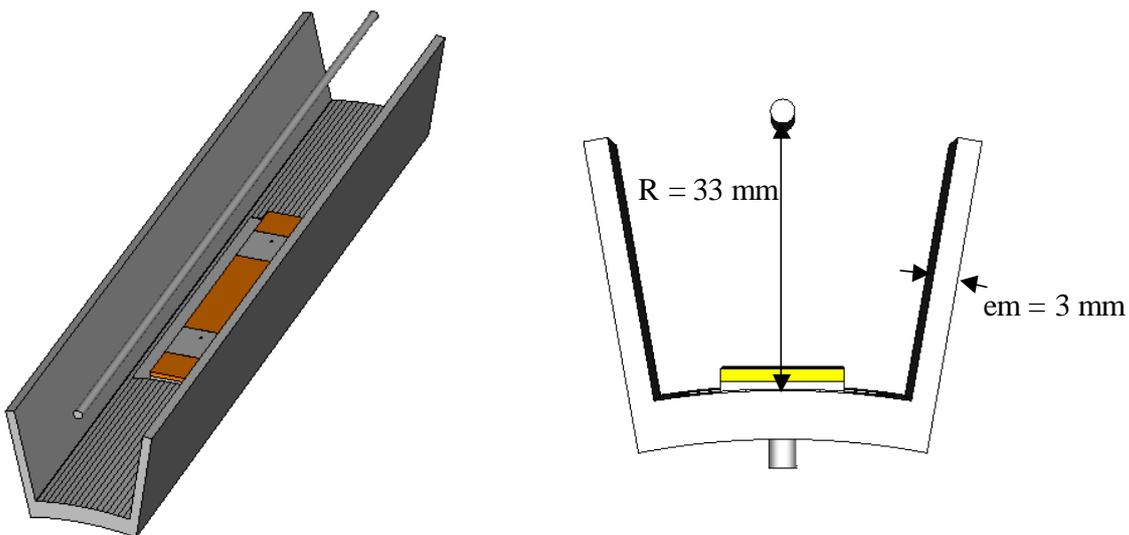


Figure III-22: Secteur avec nouvelles modifications

Le système d'excitation est toujours constitué de deux patchs de 15.5 mm de côté, espacés de 60 mm, mais imprimés sur un seul substrat pour éviter le travail de découpage (Figure III-23).

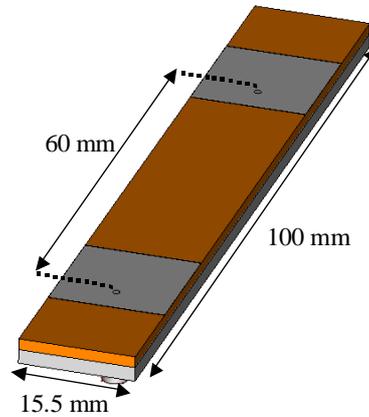


Figure III-23: système d'excitation du secteur avec les nouvelles modifications

Dû à une rupture de stock, le **TACONIC TLY-3** a été remplacé par du **ROGERS RT5870** ($\epsilon_r = 2.33$, $\text{tg}\delta = 12\text{e-}4$).

Le coefficient de réflexion du secteur avec les nouvelles modifications est présenté sur la Figure III-24.

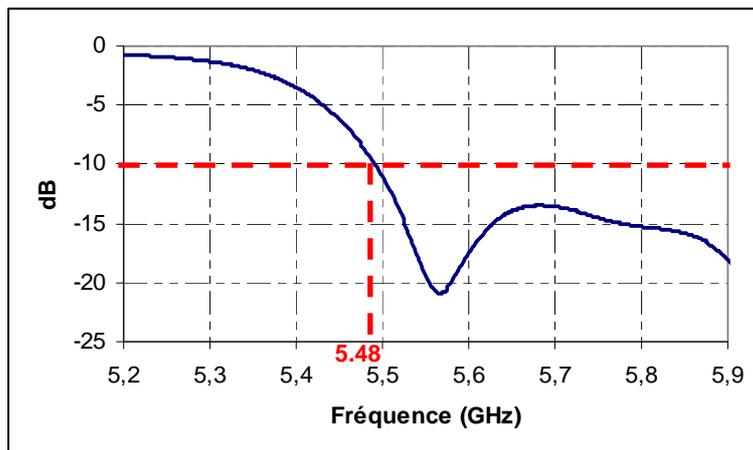


Figure III-24: coefficient de réflexion du secteur avec les nouvelles modifications

Les modifications apportées sur la forme du secteur ont introduit un décalage fréquentiel de 40 MHz. La nouvelle bande adaptée à -10 dB est comprise entre 5.48 GHz et 5.7 GHz, soit 220 MHz au lieu des 260 MHz obtenus avec la structure précédente.

La directivité fréquentielle et le gain réalisé fréquentiel du secteur ont l'allure suivante (Figure III-25).

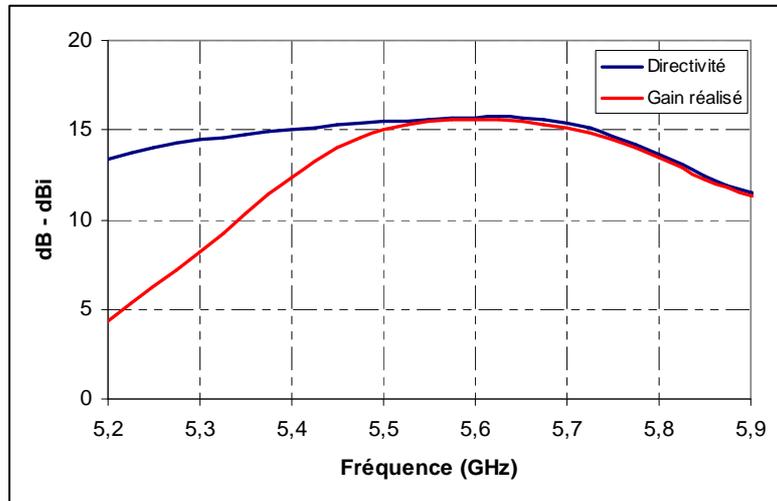
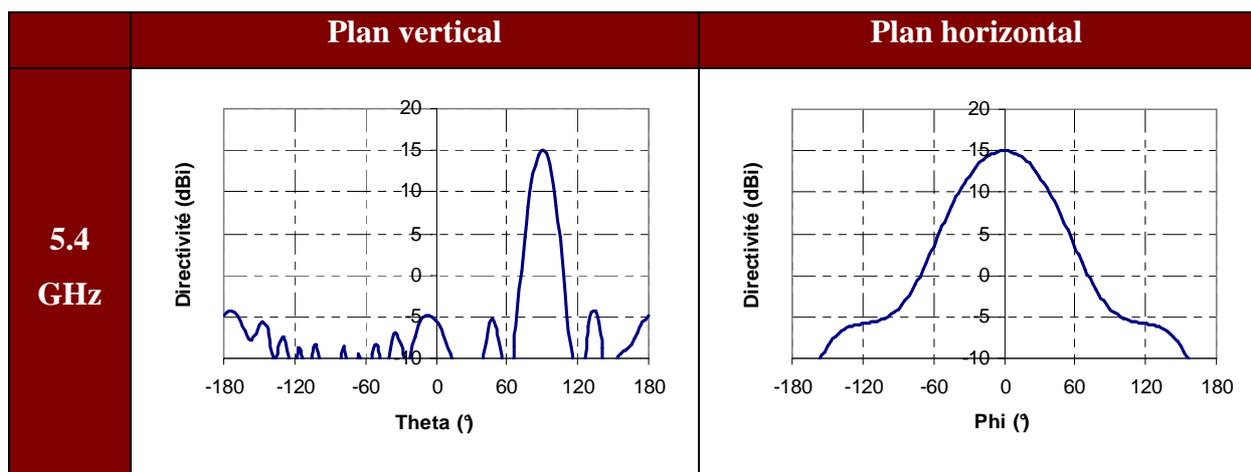


Figure III-25: Directivité et gain réalisé du secteur avec les nouvelles modifications en fonction de la fréquence

Dans la bande (5.4 – 5.7) GHz, la directivité est toujours supérieure à 15 dBi. Le gain réalisé est compris entre 12.36 dB et 15.6 dB.

L'évolution des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal de la structure est montrée dans le Tableau III-4.



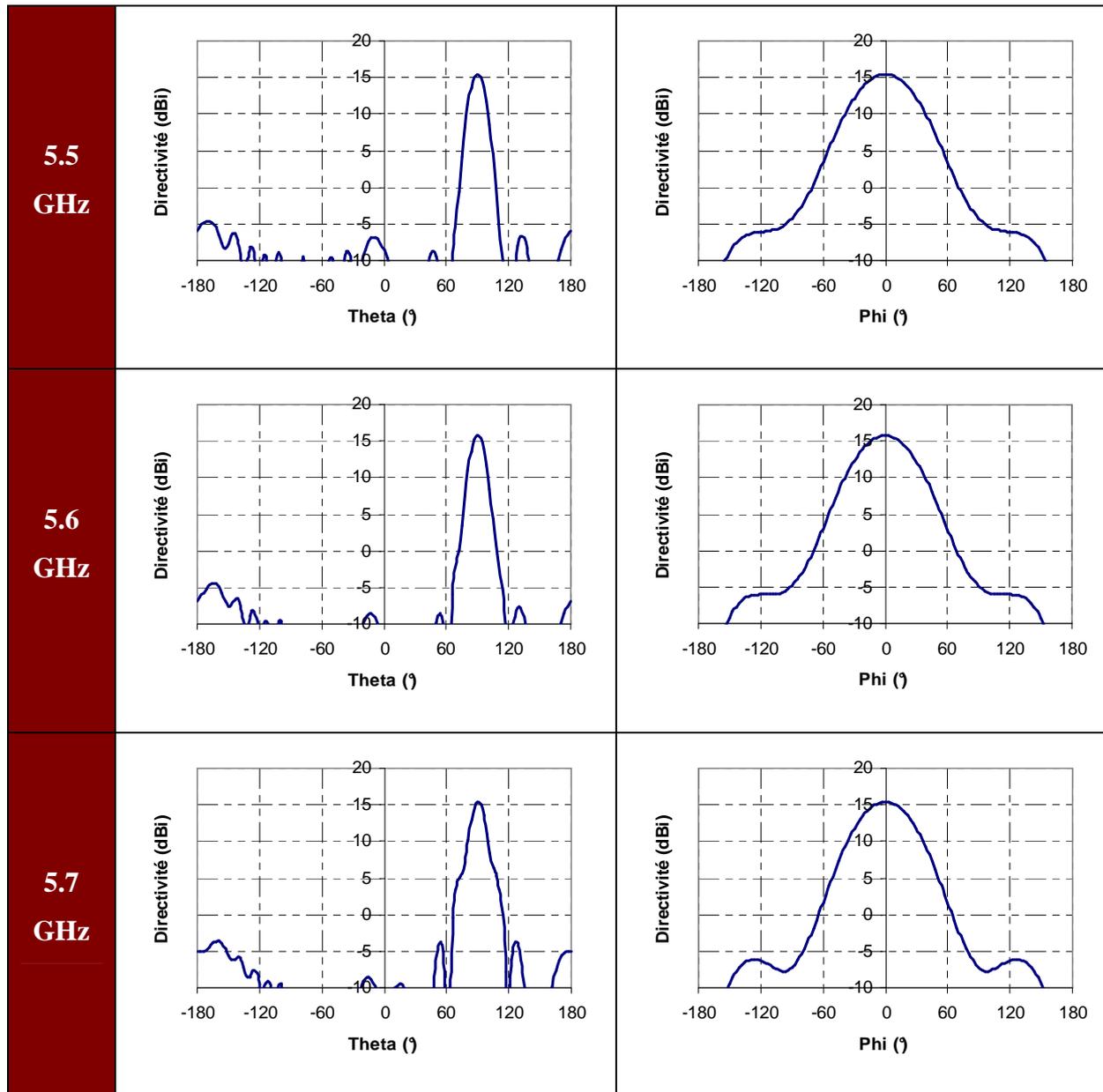


Tableau III-4: Evolution des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal du secteur avec les nouvelles modifications

Les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal sont toujours propres, avec des lobes secondaires inférieurs à -20 dB du maximum et des angles d'ouverture de 15° dans le plan vertical et 53° dans le plan horizontal.

- **Tolérances**

Les erreurs de précision permises pour la réalisation du premier prototype étaient de ± 30 μm sur tous les paramètres physiques de la structure, pour satisfaire au maximum le cahier de charges demandés. Cette précision a joué un rôle important dans l'augmentation du coût total

de l'antenne. Nous avons donc essayé de relâcher les tolérances pour réduire au maximum le coût de l'antenne tout en garantissant des performances acceptables de l'antenne.

Nous présentons dans ce paragraphe les nouvelles erreurs de précision demandées sur les différents paramètres physiques, avec les différents résultats correspondants à ces erreurs. La Figure III-26 montre le secteur en 2D (a) et le système d'excitation (b) avec les différents paramètres physiques à varier.

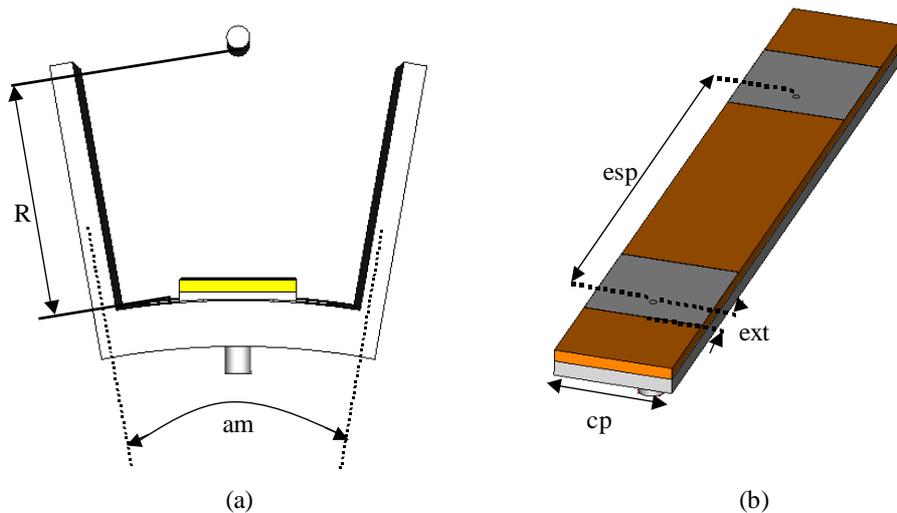


Figure III-26: Secteur (2D) et système d'excitation avec les paramètres à varier

Le Tableau III-5 contient les valeurs initiales des différents paramètres avec les nouvelles erreurs de précision demandées.

	<i>Valeur initiale</i>	<i>Erreur de précision</i>
<i>Distance « R »</i>	33 mm	± 1 mm
<i>Angle entre les murs am</i>	20 °	± 1.3 °
<i>Côté d'un patch cp</i>	15.5 mm	± 300 μm
<i>Espacement entre patch esp</i>	60 mm	± 5 mm
<i>Point d'excitation ext</i>	4.25 mm	± 300 μm

Tableau III-5: Nouvelles erreurs de précision demandées

Nous allons maintenant présenter l'influence des différentes erreurs de précision sur les performances de l'antenne. Les courbes à montrer sont la directivité fréquentielle et l'adaptation.

Paramètres liés à la taille de la cavité BIE

➤ *Variation de « R »*

La Figure III-27 montre les variations de performances fonction de l'erreur de précision sur la distance « R » entre le cylindre métallique et les tiges métalliques.

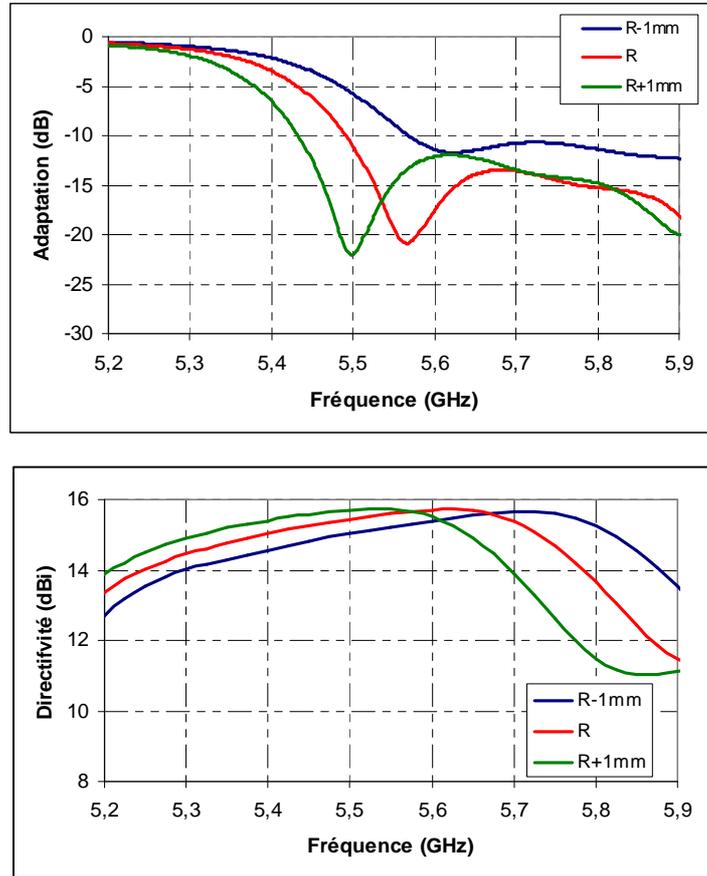


Figure III-27: Variation de l'adaptation et la directivité en fonction de « R »

➤ *Variation de « am »*

L'influence de la variation de l'angle entre les murs métalliques « am » sur la directivité et l'adaptation est montrée sur la Figure III-28.

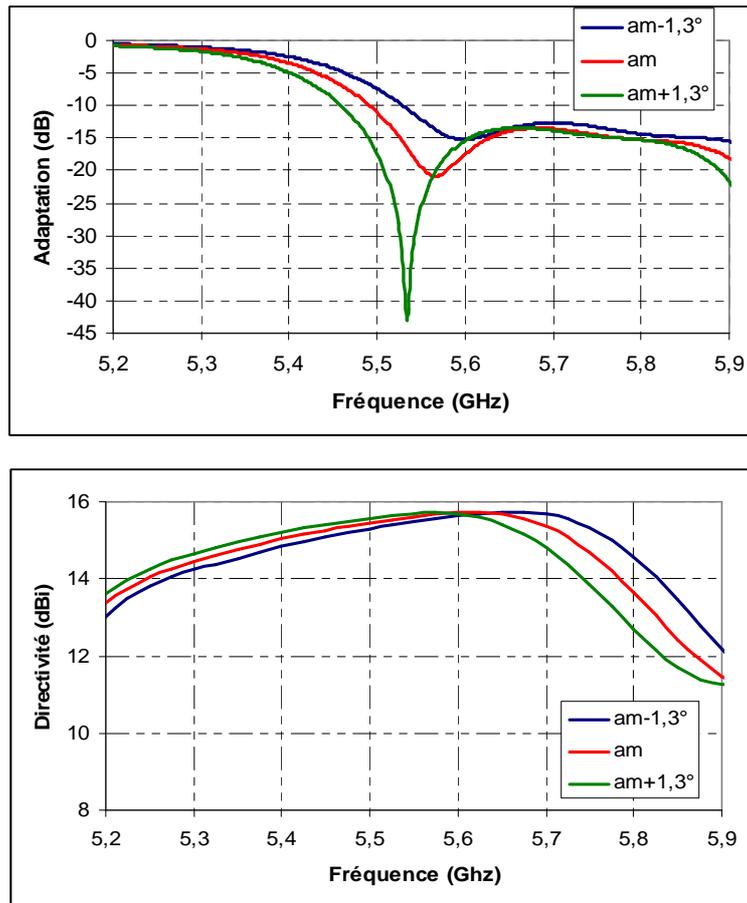
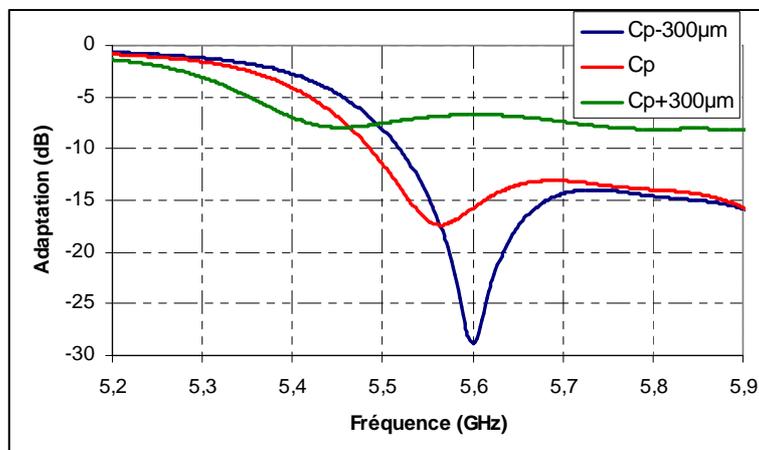


Figure III-28: Variation de l'adaptation et la directivité en fonction de « am »

Paramètres liés aux patches d'excitation

➤ Variation de « cp »

La variation du côté du patch « Cp » influe sur l'adaptation et la directivité fréquentielle de la manière suivante (Figure III-29).



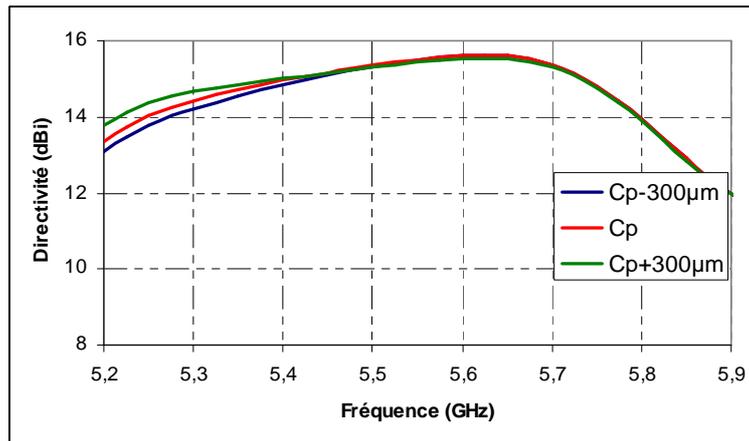


Figure III-29: Variation de l'adaptation et la directivité en fonction de « Cp »

➤ Variation de « esp »

Regardons maintenant l'influence de l'espacement « esp » entre les deux patchs sur l'adaptation et la directivité fréquentielle (Figure III-30).

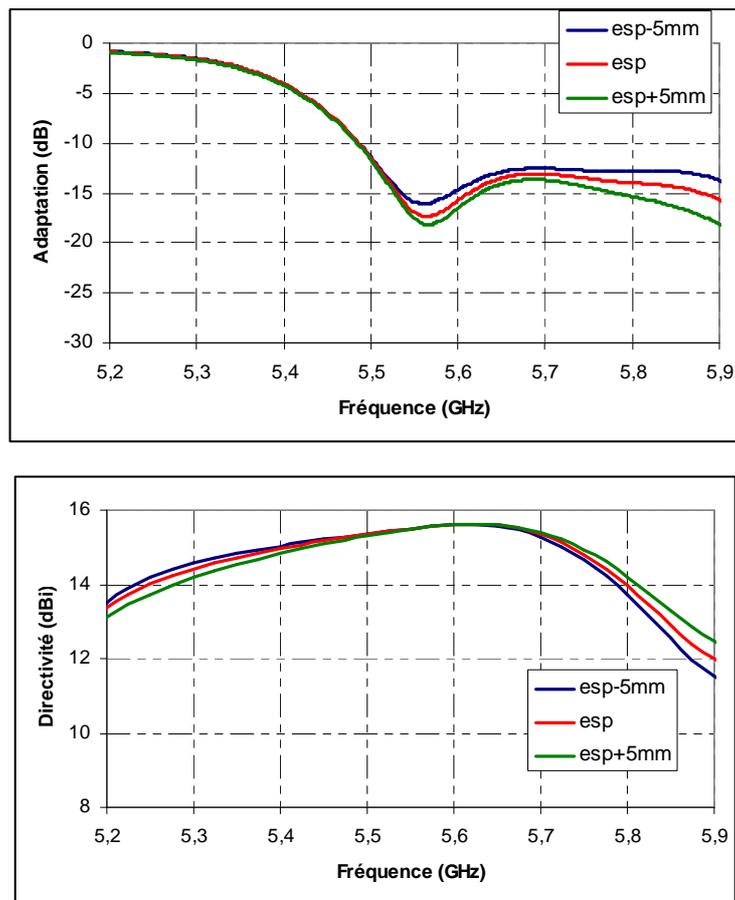


Figure III-30: Variation de l'adaptation et la directivité en fonction de « esp »

- *Variation de « ext »*

Nous allons finir l'étude des tolérances par montrer l'influence de la position du point d'excitation du patch « **ext** » sur l'adaptation et la directivité fréquentielle (Figure III-31).

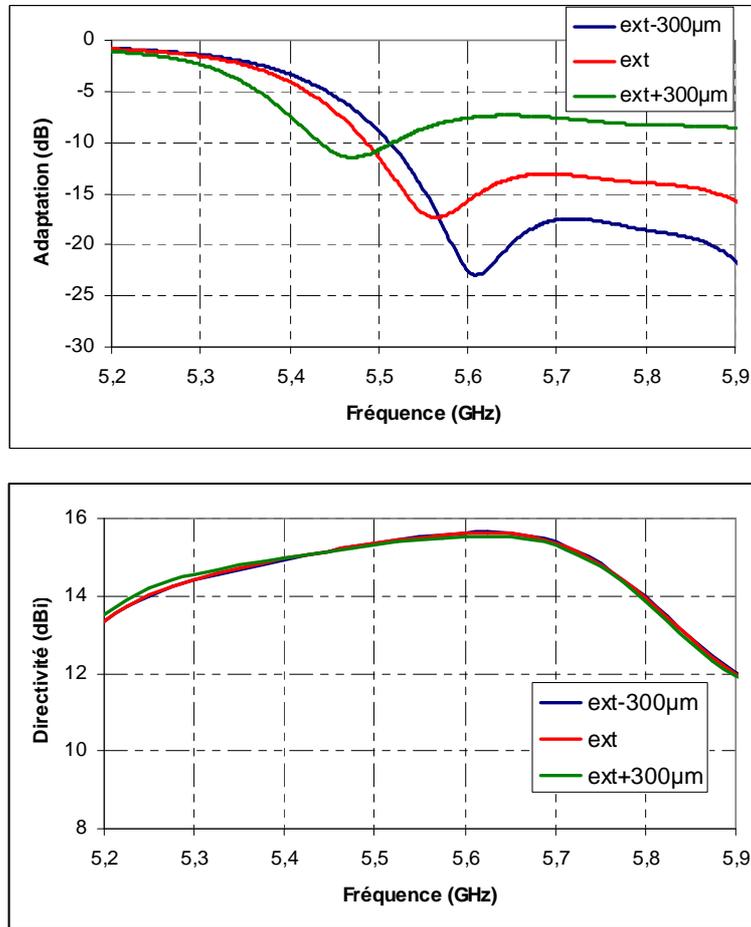


Figure III-31: Variation de l'adaptation et la directivité en fonction de « ext »

Nous remarquons que la structure est sensible à la variation des paramètres liés à la taille de la cavité BIE (**R** et **am**). Une variation de **1 mm** de **R** ou **1.3°** de **am** entraîne un décalage fréquentiel de **100 MHz** de la directivité fréquentielle, mais aussi un décalage fréquentiel de la bande adaptée à -10 dB. Cependant, la variation des paramètres liés au patchs d'excitation n'influe que sur la bande d'adaptation à -10 dB.

Malgré la sensibilité de la structure, le principe de conception de la structure reste valide. Ainsi, la structure a été fabriquée en tenant compte des erreurs de précisions contenues dans le Tableau III-5.

III.4.5.2. Structure réalisée

Après avoir effectué les modifications sur la structure et sur les tolérances, un autre devis de réalisation de prototype a été demandé. La structure envoyée pour la réalisation est constituée de 9 secteurs (arrangement de 3 secteurs adjacents tous les 120°). Le nouveau montant demandé pour la réalisation de cette nouvelle structure a été réduit d'un facteur de 2 (**2350 euros HT** au lieu de **5000 euros HT**).

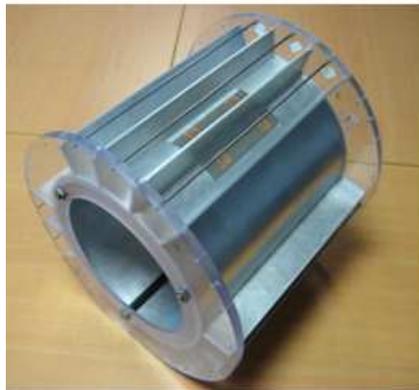
Le prototype présenté sur la Figure III-32 est fabriqué par l'entreprise **PROTOTIG** [47]. Le matériau utilisé pour l'âme centrale, les murs métalliques est l'aluminium ($\sigma = 3.27E+7$ s/m). Deux disques de polycarbonate ($\epsilon_r = 2.9$), ont été utilisés pour fixer l'ensemble. Les patches ont été réalisés avec la machine LPKF au sein de l'équipe O.S.A, et fixés sur des semelles métalliques en aluminium à l'aide de la colle Cyanoacrylate. Les connecteurs qui ont servis à exciter les patches sont des connecteurs **SMA Radiall R125.461.231**.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III-32: Photographies du prototype fabriqué. (a) patches d'excitation, (b) structure BIE sans excitation, (c) structure avec excitation, (d) vue du l'intérieur du cylindre

- **Simulation**

Le prototype fabriqué ne correspond exactement à l'antenne que nous avons présentée. En effet, les disques de maintien en Polycarbonate n'ont pas été pris en compte dans la simulation de l'antenne. C'est la raison pour laquelle nous avons simulé l'antenne réalisée, mais avec trois motifs, pour en extraire les performances et les comparer dans la suite aux mesures. L'antenne réalisée « simulée » est présentée sur la Figure III-33.

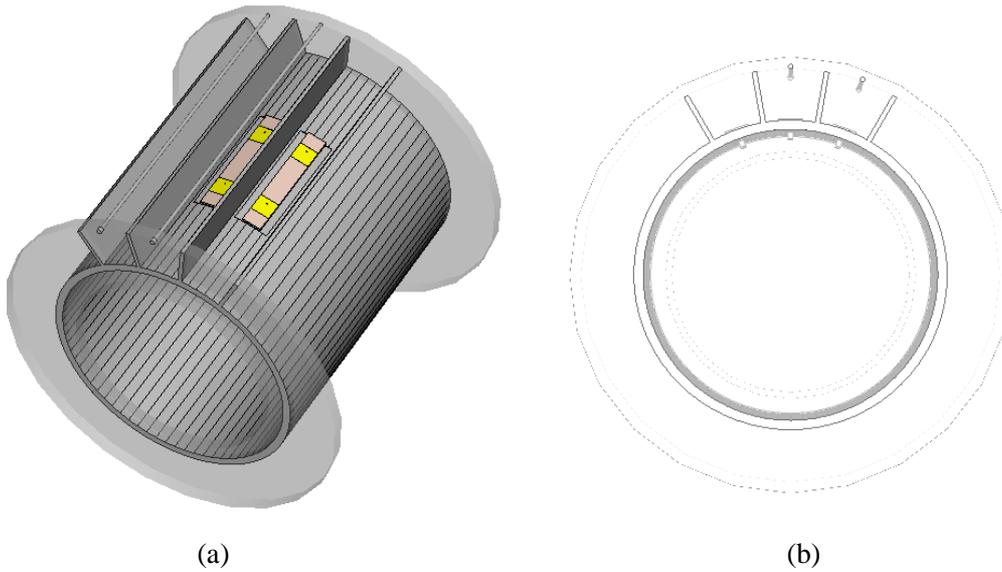


Figure III-33: Antenne réalisée simulée. (a) 3D, (b) vue de dessus

Le secteur excité est celui du milieu. Les résultats de simulation sont présentés ci-dessous et comparés à ceux de l'antenne sans support. Le coefficient de réflexion est montré sur la Figure III-34.

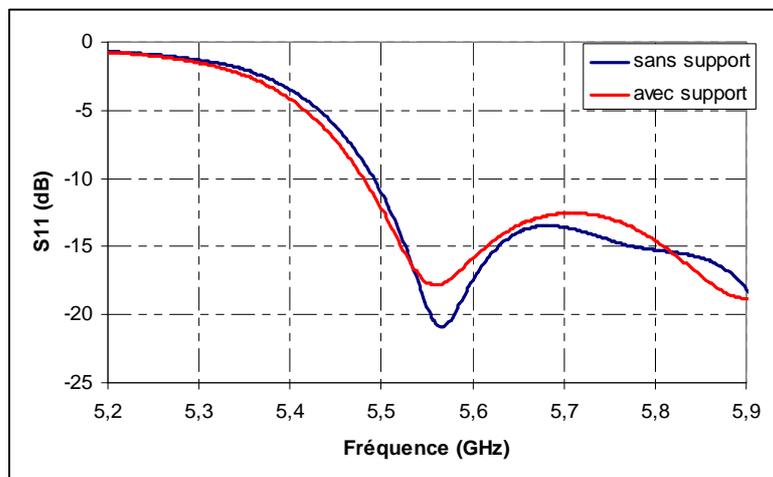


Figure III-34: Coefficient de réflexion de l'antenne avec et sans support

L'influence du support sur le coefficient de réflexion est négligeable. Nous allons donc voir son influence sur la directivité fréquentielle (Figure III-35).

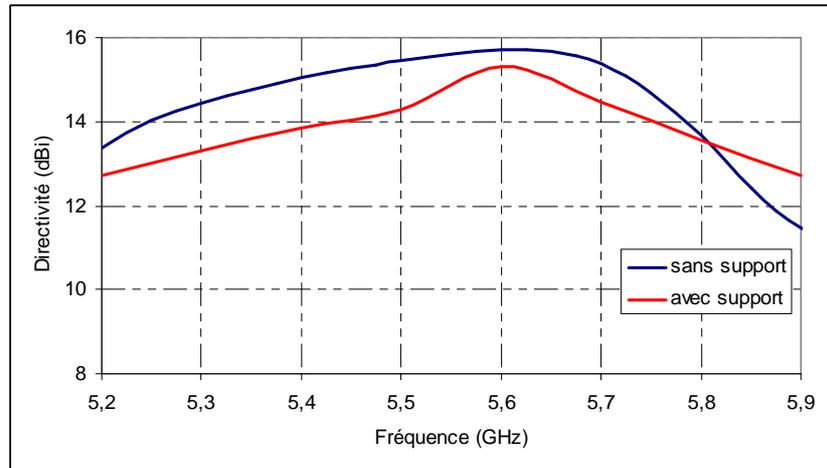
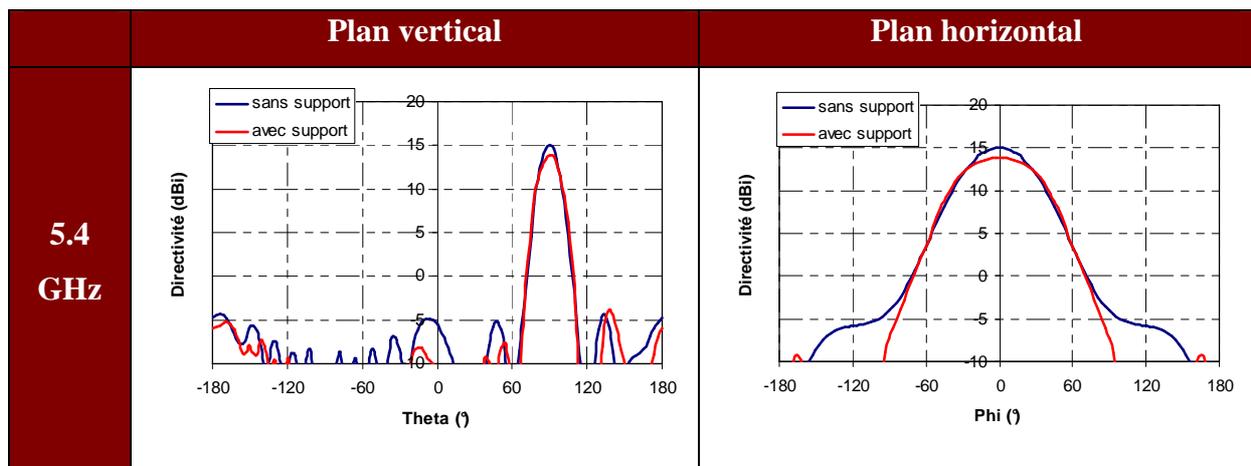


Figure III-35: Directivité fréquentielle de l'antenne sans et avec support

Il est à noter que les supports ont de l'influence sur la directivité en début et en fin de bande de fonctionnement, où nous remarquons une chute de 1 dB à 5,4 GHz et 5,7 GHz. un décalage fréquentiel de 50 MHz est aussi remarquable ; la directivité maximale se trouve à 5,6 GHz au lieu de 5,65 GHz, avec une petite chute de 0,4 dB.

Regardons maintenant l'évolution des diagrammes de rayonnement avec la fréquence pour les deux cas (Tableau III-6)



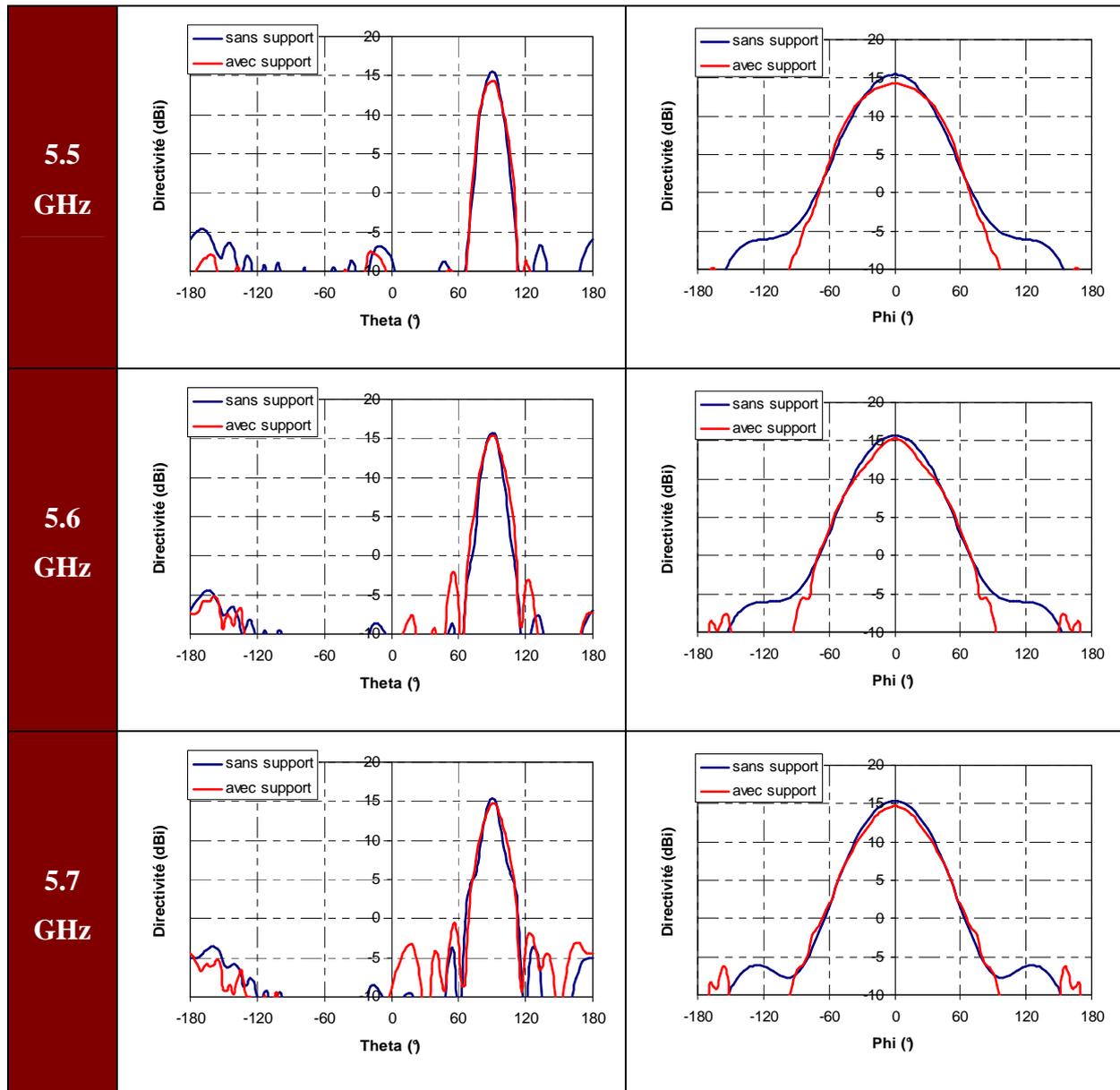


Tableau III-6: Evolution des diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal de l'antenne avec et sans support

L'influence du support sur la directivité se voit aussi sur les diagrammes de rayonnement, cependant l'allure de ces derniers n'est pas déformée par la présence du support ; les lobes secondaires reste toujours à -15 dB du maximum.

En conclusion, il est important de noter que l'influence de support est négligeable sur l'adaptation de l'antenne et la forme des diagrammes de rayonnement. Par contre, le support a introduit un décalage fréquentiel de 50 MHz sur la directivité, et une perte de 1 dB en début et en fin de bande.

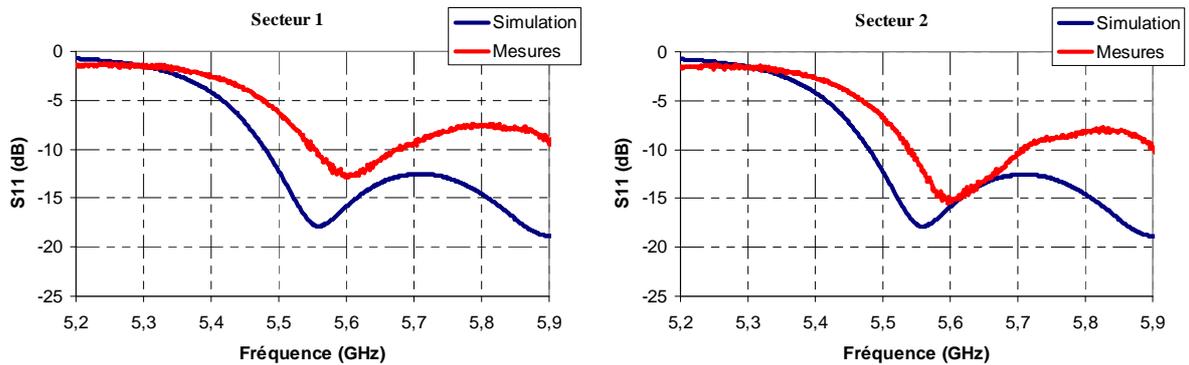
- **Mesures**

Après avoir simulé la structure réalisée, il est temps maintenant de comparer résultats de cette simulation aux mesures effectuées dans la chambre anéchoïde (Figure III-36).



Figure III-36: Photographie du prototype fabriqué dans la chambre anéchoïde

La Figure III-37 montre les 9 coefficients de réflexion des 9 secteurs mesurés, comparés au coefficient de réflexion simulé.



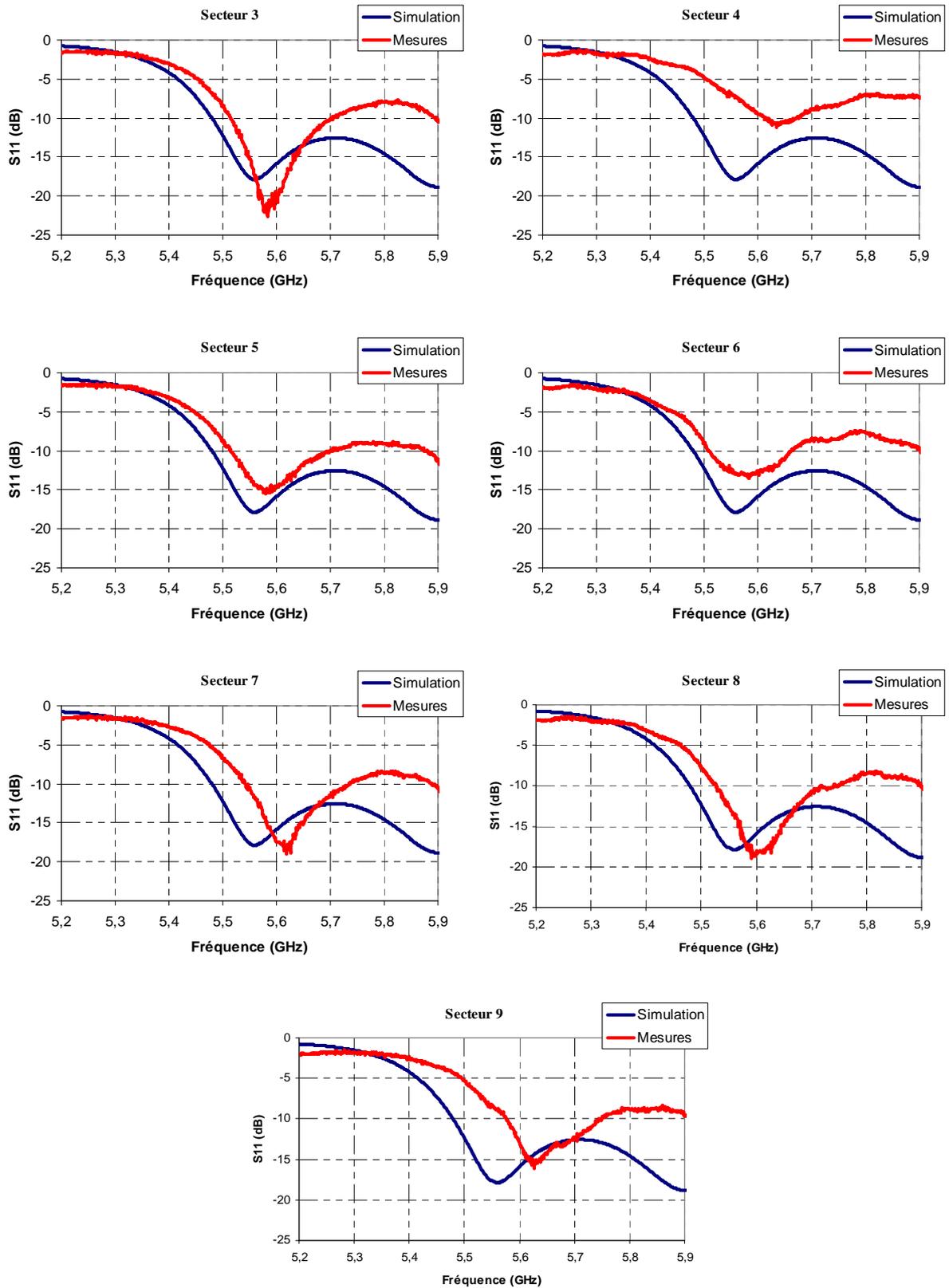
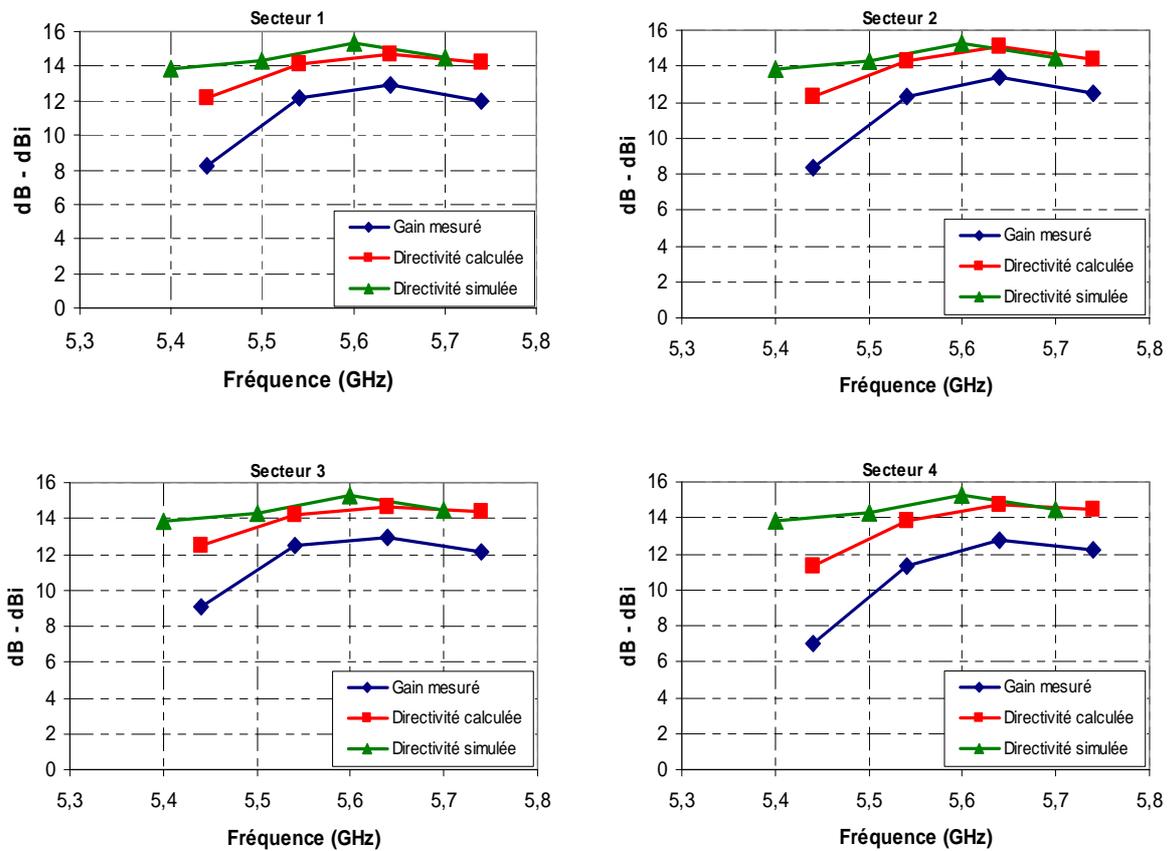


Figure III-37: Coefficients de réflexion mesurés des 9 secteurs du prototype fabriqué

Nous pouvons remarquer une bonne correspondance entre les coefficients de réflexion mesurés et simulés. Cependant un décalage fréquentiel jusqu'à 70 MHz existe. Ce décalage est principalement dû à une erreur de réalisation des patchs d'excitation (explication dans l'annexe I).

En ce qui concerne les gains et les directivités, nous montrons, pour chacun des 9 secteurs, les trois courbes (Figure III-38) :

- la courbe du **gain réalisé mesuré**.
- la courbe de la **directivité calculée** à partir de ce gain, en rajoutant les pertes métalliques et diélectriques (0.25 dB), les pertes dues au coupleur (0.2 dB) et aux deux câbles coaxiaux (0.5 dB par câble) utilisés pendant la séance de mesures ainsi que les pertes d'adaptation.
- Les deux courbes précédentes sont comparées à la **directivité simulée** du secteur.



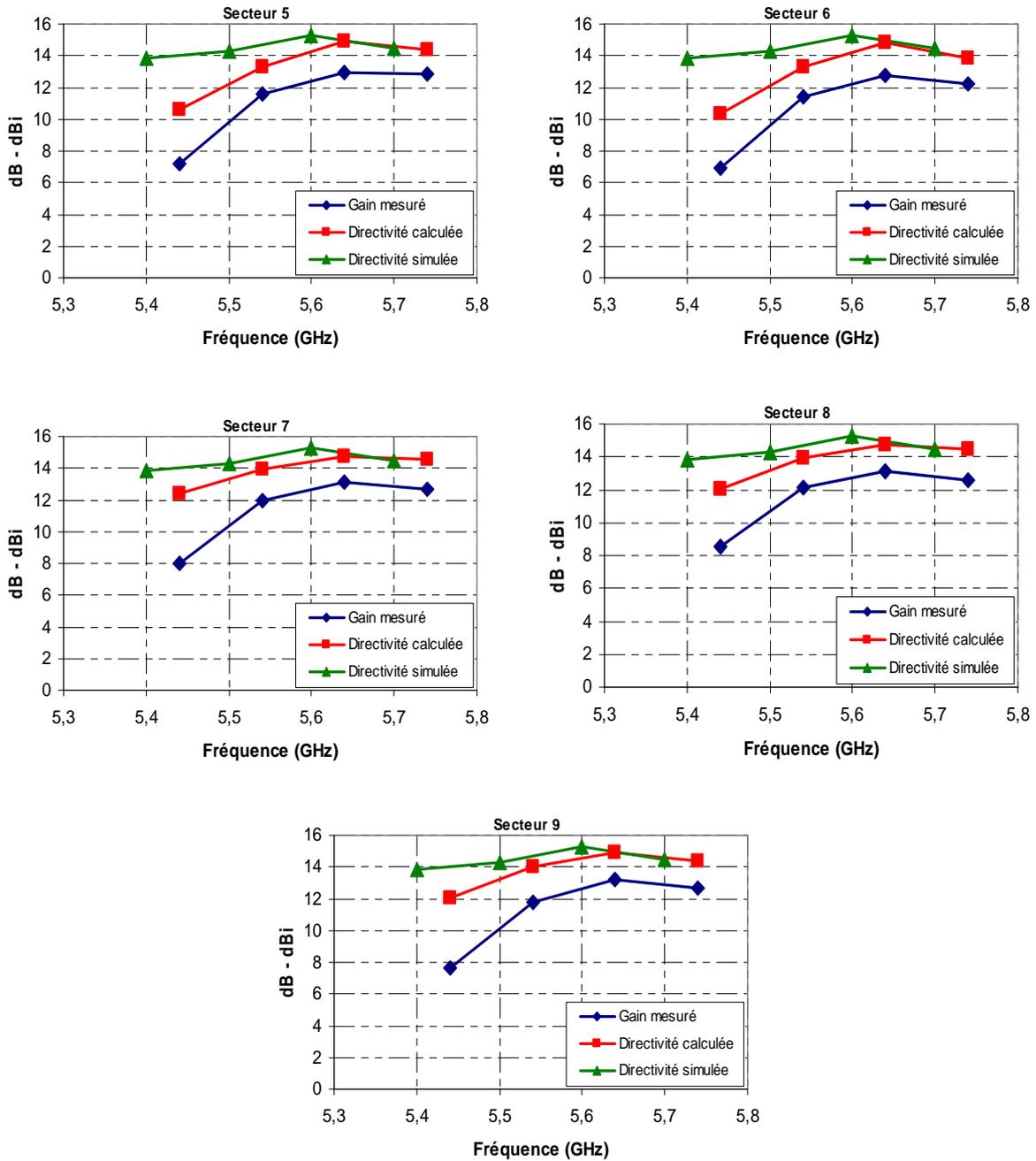
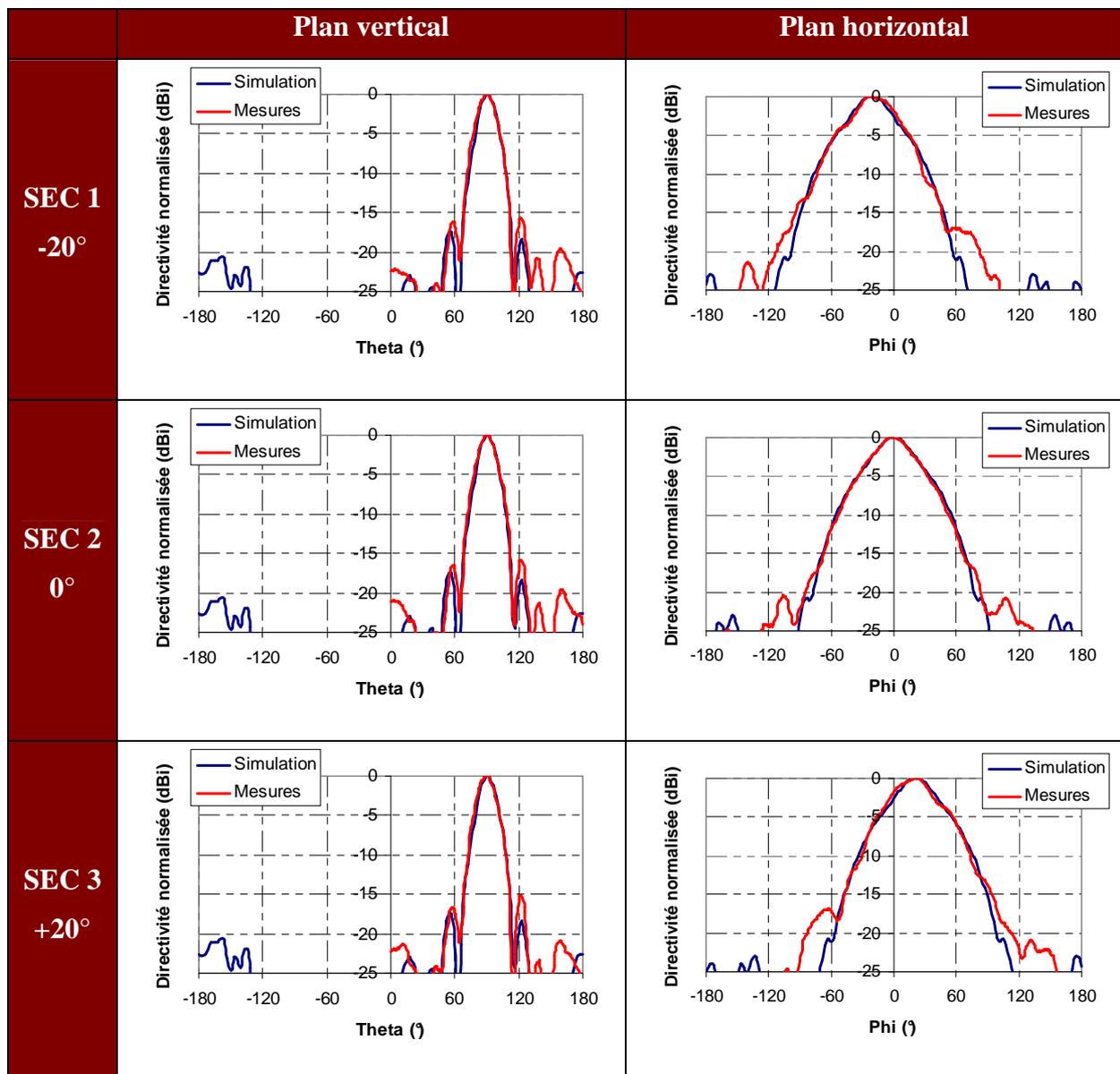


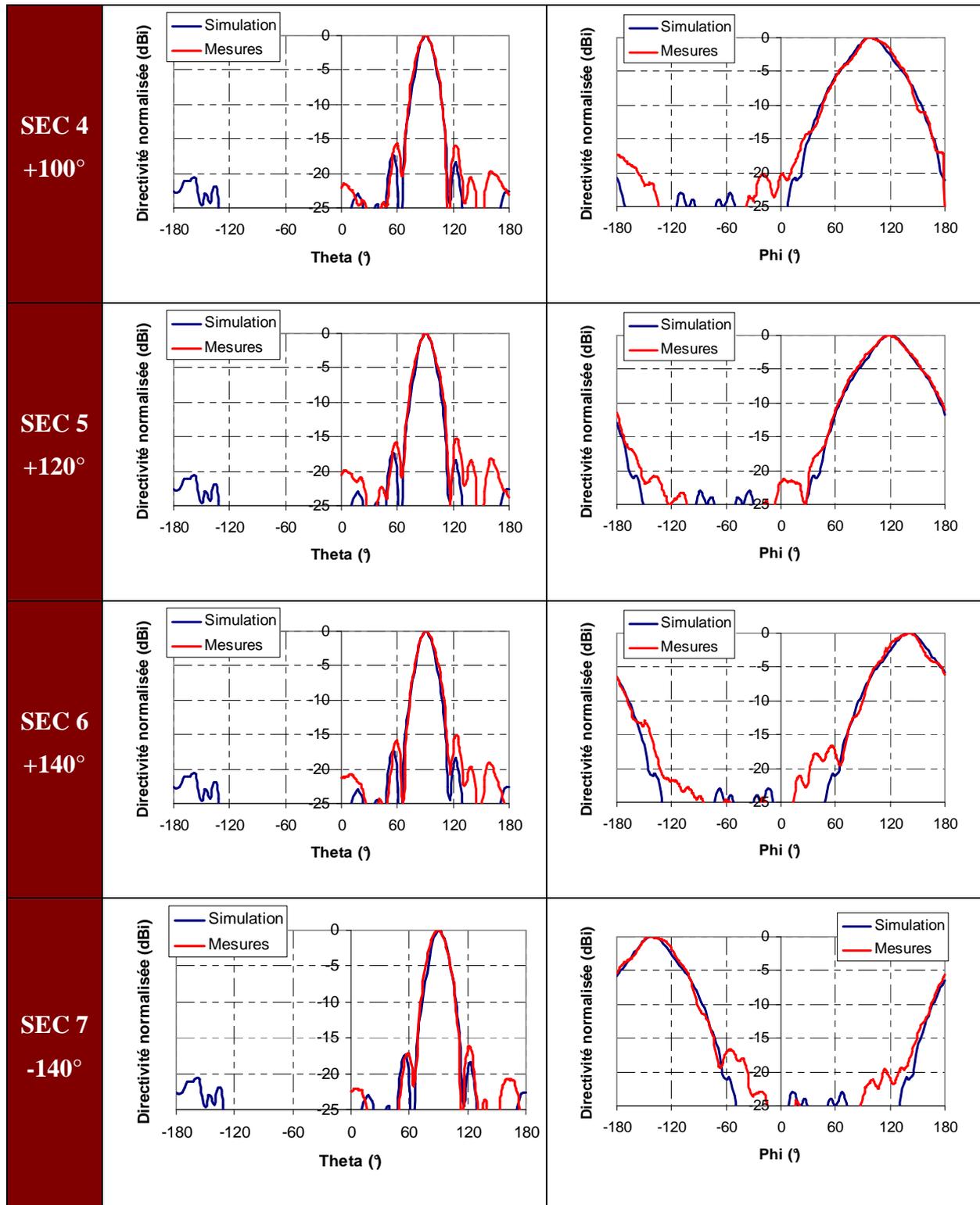
Figure III-38: Gain mesuré des 9 secteurs, directivité calculée et directivité simulée

Le gain réalisé maximal mesuré pour les 9 secteurs est de l'ordre de 13.5 ± 0.5 dB. Après calcul de directivité, en rajoutant les différentes pertes, la directivité maximale calculée pour ces 9 secteurs se trouve à 5.64 GHz au lieu de 5.6 GHz trouvée en simulation. Ce décalage fréquentiel est dû à une erreur de précision sur les dimensions du secteur (distance **R** entre le cylindre et les tiges ou bien l'angle entre les murs **am**).

En début de bande, à 5.4 GHz, nous remarquons une différence qui atteint 3 dB entre la directivité calculée à partir du gain mesuré, et la directivité simulée. Cependant, les valeurs de la directivité calculée et simulée se ressemblent dans le reste de la bande avec une erreur de ± 0.5 dB.

Regardons maintenant les diagrammes de rayonnement mesurés dans le plan vertical et horizontal de l'antenne (Tableau III-7). Ces diagrammes sont uniquement tracés à la fréquence où la directivité est maximale. L'évolution du rayonnement des 9 secteurs avec la fréquence est présentée dans l'annexe II.





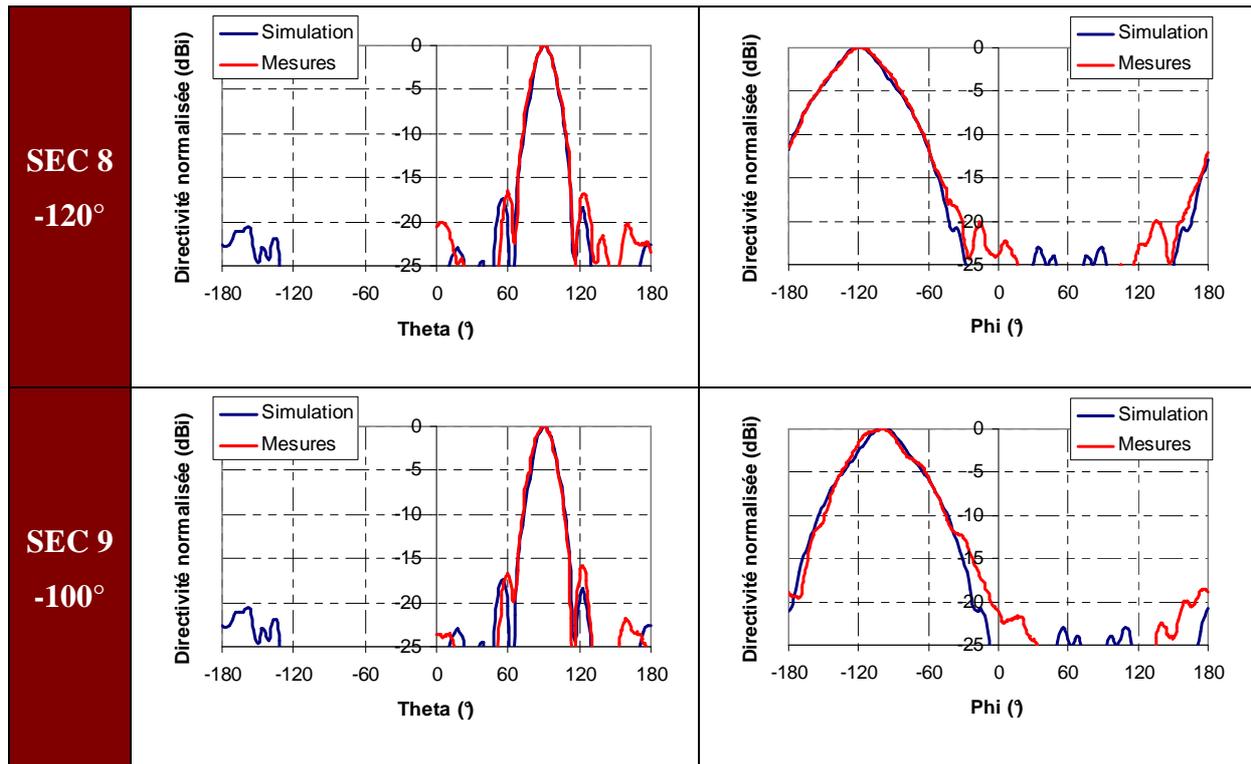


Tableau III-7: Diagrammes de rayonnement mesurés et simulés dans le plan vertical et horizontal des 9 secteurs

La corrélation entre les diagrammes de rayonnement mesurés et simulés dans le plan vertical et horizontal de l'antenne est très satisfaisante au niveau du lobe principal. Les ouvertures angulaires simulées et mesurées sont identiques. Ainsi, le principe de conception de l'antenne BIE multisectorielle composée d'un réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles est très bien validé.

III.4.5.3. Système de commutation pour le prototype fabriqué

Nous présentons dans ce paragraphe un système de commutation (1 vers 9), à base de 3 commutateurs réflectifs à base de diodes PIN « SP6T ».

- **Description et caractéristiques des commutateurs utilisés**

Les commutateurs utilisés pour notre système sont des commutateurs PULSAR « SW6RD - 12 » réflectifs à diode PIN (Figure III-39).

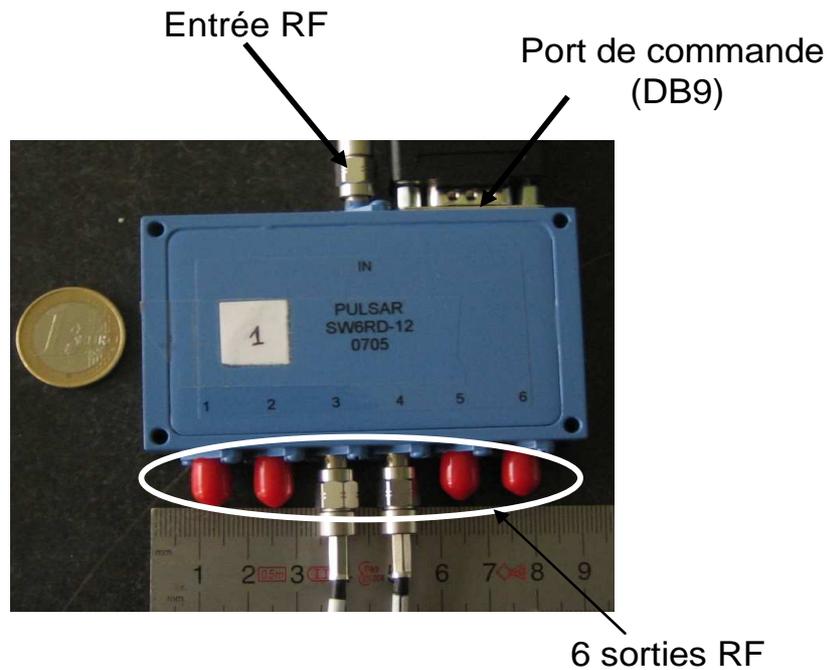


Figure III-39: photographie d'un commutateur PULSAR « SW6RD-12 » réflectif

Quand une diode PIN est inversement polarisée, elle se comporte comme un circuit ouvert. La voie correspondante est alors activée. Dans le cas contraire, le signal RF sera dirigé vers la masse.

La courbe de la vitesse de commutation du SP6T est montrée sur la Figure III-40. Le temps de commutation « ON » est égal à 100 ns. Il est défini par l'intervalle [50% TTL – 90% RF]. Dans cette intervalle est compris le temps de montée « T_r », qui est le temps de passage de 10% à 90% du signal RF à la sortie d'une voie.

De même, le temps de commutation « OFF », donné par l'intervalle [50% TTL – 10% RF] est égal à 100 ns. Dans cet intervalle nous trouvons également le temps de chute « T_f », le temps de passage de 90% à 10% du signal RF à la sortie d'une voie.

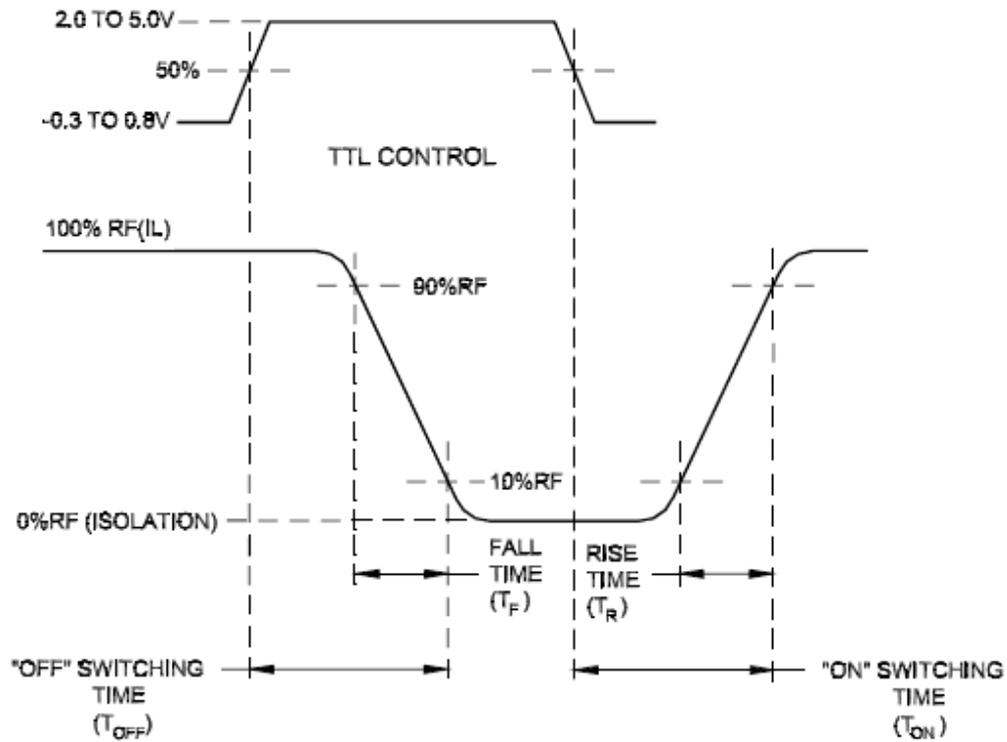


Figure III-40: Courbe de la vitesse de commutation

Un connecteur DB9 (Figure III-41) est intégré dans le commutateur pour assurer la polarisation (TTL) et la commande des voies des sorties.

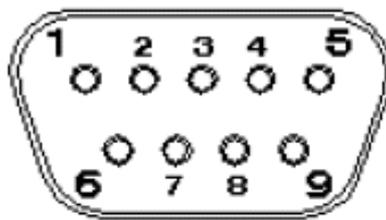


Figure III-41: Schématique du connecteur DB9 du commutateur

- 1 – 6 : commande des voies
- 7 : masse
- 8 : + 5V
- 9 : -5V

- **Caractérisation d'un commutateur «SW6RD-12 »**

La Figure III-42 montre le principe de caractérisation du commutateur.

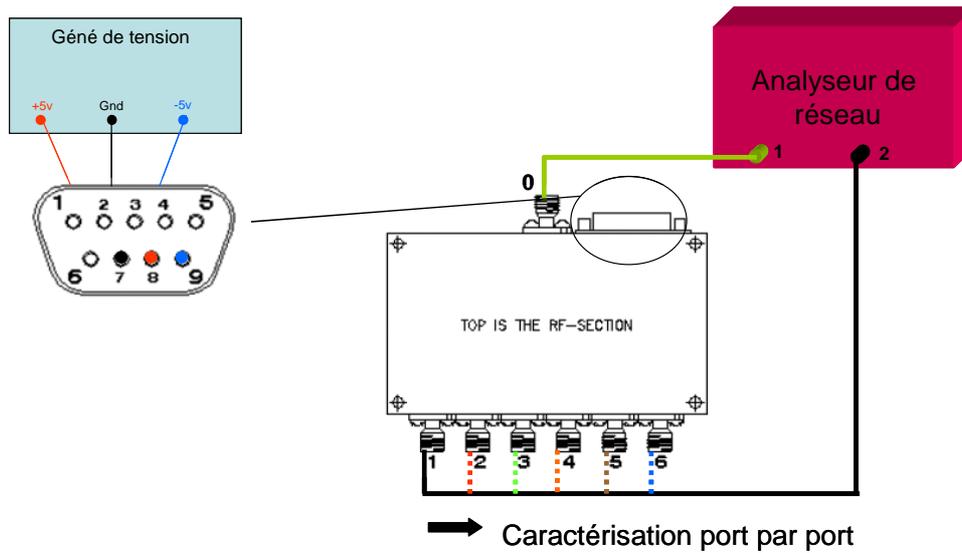


Figure III-42: Principe de caractérisation du commutateur

La tension appliquée sur les broches (1- 6), dépend de la voie que nous voulons activer. La logique « 0 » correspond à une tension entre -0.3V et +0.8V ; la voie correspondante est en état ON. Dans le cas contraire (logique « 1 », ce qui correspond à une tension entre +2V et +5V), la voie est en état OFF.

Un exemple de coefficients de réflexion et de transmission mesurés pour chacune des voies d'un commutateur « SW6RD-12 » sont montrées sur la Figure III-43.

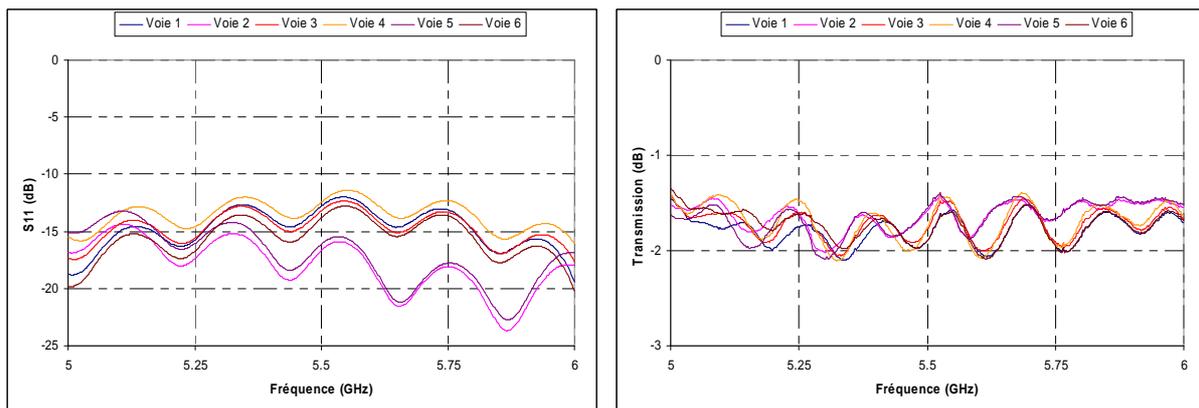


Figure III-43: Exemple de coefficients de réflexion et de transmission

- **Système de commutation complet pour le prototype fabriqué**

Un exemple de système de commutation pour le prototype fabriqué, à base de 3 commutateurs « SW6RD – 12 » est montré sur la Figure III-44. les tensions appliquées sur

chacune des broches de commande des trois commutateurs sont contenues dans le Tableau III-8.

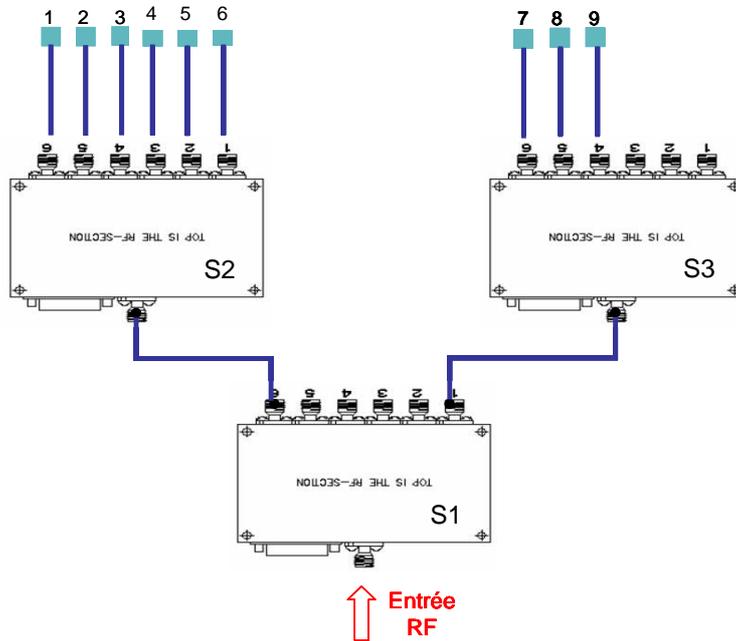


Figure III-44: Système de commutation pour le prototype fabriqué

N° Broche sur les ports DB9 des 3 commutateurs

	S1						S2						S3					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1

Tableau III-8: Table de vérité du système de commutation (0 ⇔ 0V, 1 ⇔ +5V)

Le système de commutation présenté assure l'agilité du prototype fabriqué (9 secteurs). En rajoutant un commutateur en plus dans le deuxième étage, le système peut assurer l'agilité de l'antenne BIE multisectorielle complète (18 secteurs).

III.5. La détection de directions d'arrivées

III.5.1. Application de diversité:

L'application de diversité (Cf. Chapitre II, paragraphe II.5.3.3) utilise la technique de détection de direction d'arrivée pour augmenter le débit de communication. Un système antenne multifaisceaux, utilisée en réception, doit balayer le plan horizontal pour détecter les directions d'arrivée d'un signal. Une fois le plan horizontal balayé, le système sélectionne le faisceau correspondant à la direction dans laquelle la puissance du signal reçu est maximale (Figure III-45).

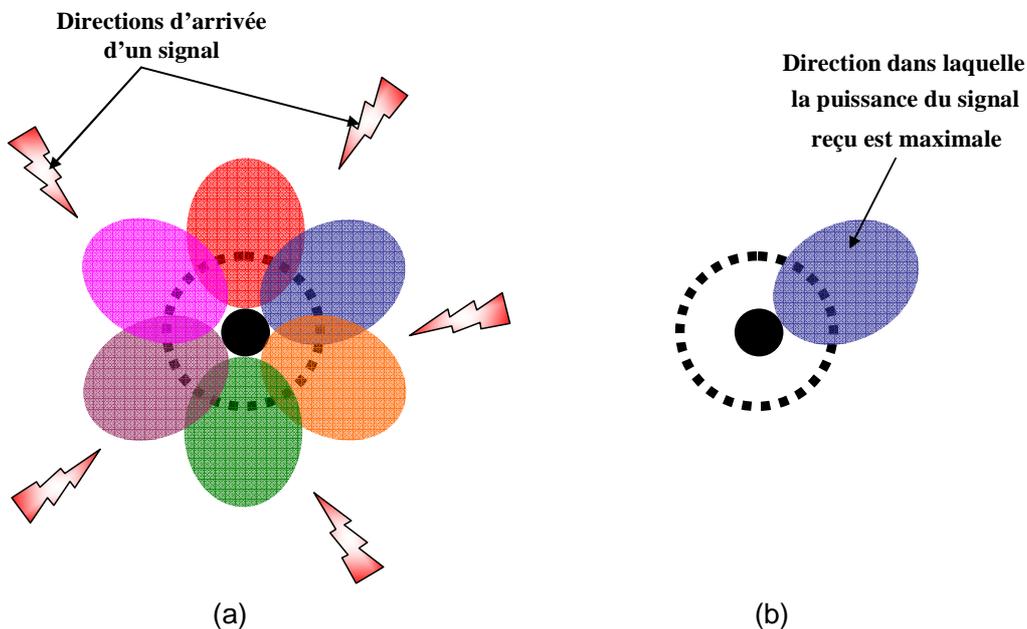


Figure III-45: Balayage du plan horizontal (a). Exemple d'un secteur sélectionné (b)

Un système antenne multifaisceaux (4 faisceaux) dédié à ce type d'application, à base de 4 patchs placés sur les 4 facettes d'un cube, a fait une partie du projet **SYSMART** (Cf. paragraphe III.4.1). Nous présenterons dans la suite une antenne BIE multisectorielle qui peut remplacer ce système mais avec un nombre plus grand de faisceaux et des ouvertures étroites pour améliorer la précision du système.

III.5.2. Caractérisation du canal de propagation:

La direction d'arrivée est un parmi les important paramètres à connaître dans le but de comprendre le comportement d'un canal de propagation et optimiser les dimensions d'un

système (WIFI, WiMAX, UMTS ...) du point de vue de la capacité et de la couverture. Cette application fait une partie du projet **ORIANA** associant les sociétés **Radiall Systems**, **France Telecoms**, **ETSA** et les laboratoires **XLIM** et **CEA LETI** et **L'ENST Paris**.

L'antenne BIE multisectorielle peut alors être intégrée dans un système de mesure de direction d'arrivée pour caractériser un canal de propagation **outdoor – indoor**. L'antenne doit balayer le plan horizontal avec un faisceau étroit afin de localiser précisément les différentes directions d'arrivée des différents signaux (Figure III-46.a). La tension des signaux reçus est mesurée par l'antenne. Ensuite, Un système de traitement de signal analysera cette tension pour en conclure les différentes directions d'arrivée des signaux (Figure III-46.b).

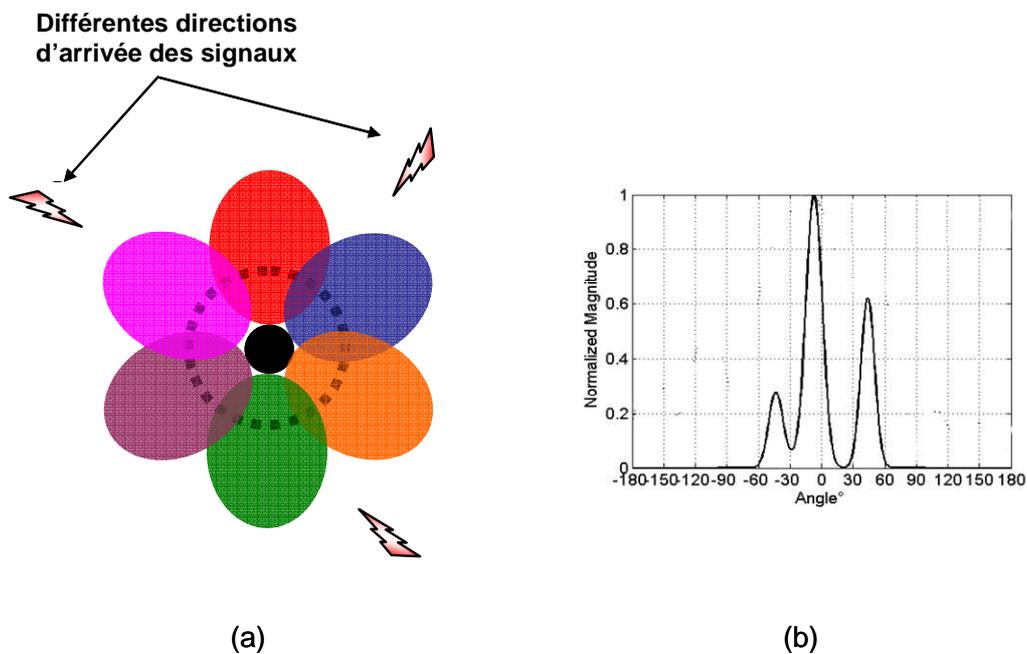


Figure III-46: Balayage du plan horizontal (a). Exemple de localisation de trois directions d'arrivée (b)

III.5.3. Etude de l'antenne BIE multisectorielle

L'antenne BIE multisectorielle que nous allons étudier pour ces applications est la même que celle pour l'application de reconfiguration de diagramme (cf. Paragraphe III.4.4). Elle est constituée d'un réseau cylindrique de 18 antennes BIE sectorielles, une antenne tous les 20° (Figure III-47).

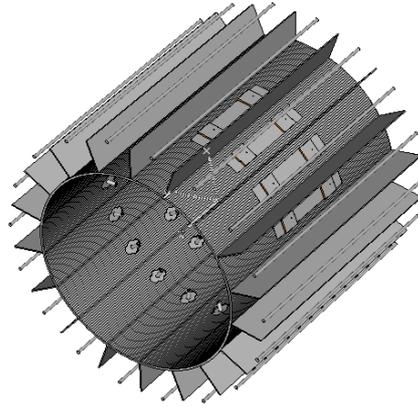


Figure III-47: Antenne BIE multisectorielle étudiée

Nous avons vu que si nous alimentons un seul secteur à la fois, l'ouverture du faisceau correspondant dans le plan horizontal est large (50°). Il faut donc alimenter simultanément plusieurs secteurs dans le plan horizontal avec les phases correspondantes pour pouvoir pincer le faisceau dans ce plan. Le calcul des phases à appliquer sur les éléments rayonnant d'un réseau cylindriques d'antennes est présenté dans l'annexe III.

III.5.3.1. Nombre optimal de secteur alimentés

Pour avoir les meilleures performances, il faut connaître le nombre de secteurs à alimenter dans le plan horizontal. La directivité maximale en fonction du nombre des secteurs alimentés est montrée sur la Figure III-48.

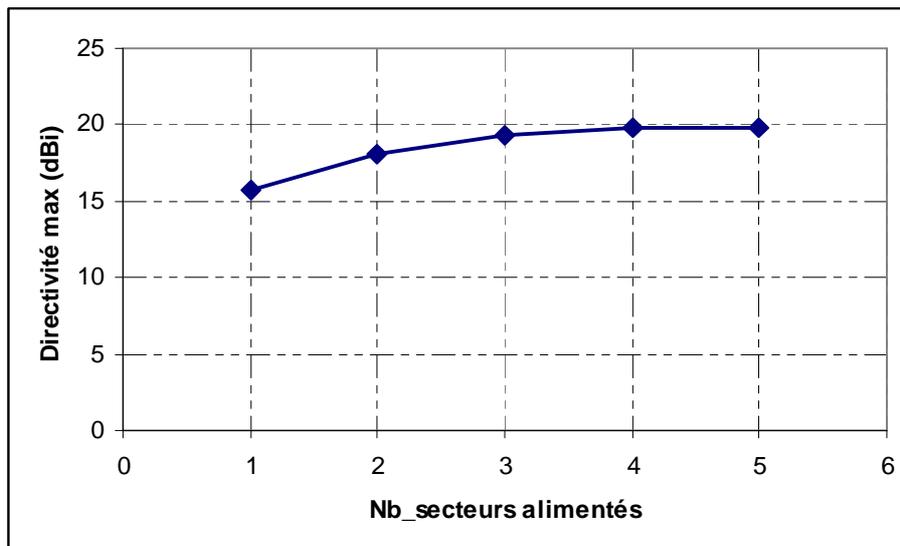


Figure III-48: Directivité maximale en fonction du nombre de secteurs alimentés

Nous remarquons qu'à partir de 4 secteurs alimentés, la directivité ne varie plus et les secteurs alimentés en plus ne contribuent plus d'une manière importante au pincement du faisceau. Regardons maintenant les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal correspondants (Figure III-49)

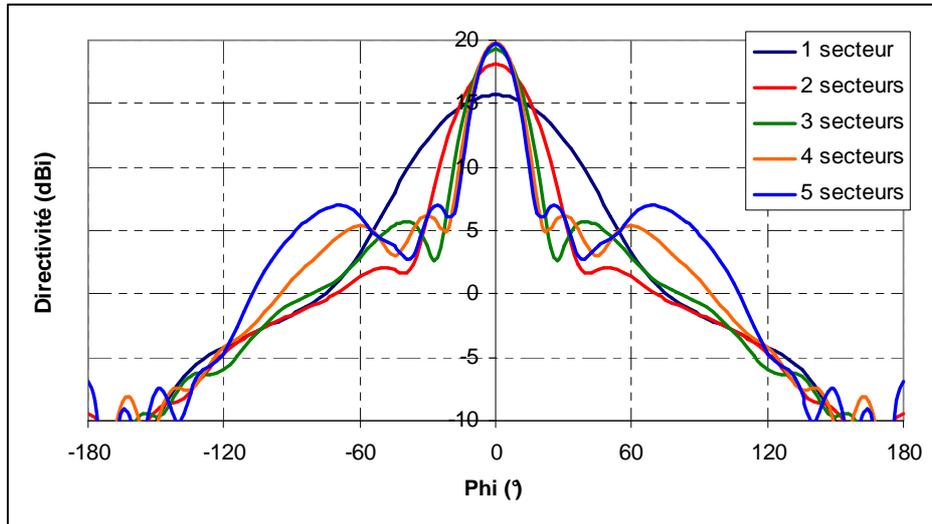


Figure III-49: Evolution du diagramme de rayonnement dans le plan horizontal en fonction du nombre de secteurs alimentés

Dans le cas d'un seul secteur alimenté, la directivité est égale à 15.7 dBi avec un angle d'ouverture de 53°. Si nous alimentons 4 secteurs, la directivité passe à 20 dBi (gain de 4.3 dBi), avec un angle d'ouverture de 20°. A partir de 5 secteurs, des lobes à $\pm 70^\circ$ commencent à apparaître. Le nombre optimal de secteurs à alimenter est alors égal à 4.

III.5.3.2. Performances de l'antenne

Dans ce paragraphe, nous présentons les performances de l'antenne en alimentant simultanément 4 secteurs dans le plan horizontal. La directivité fréquentielle est montrée sur la Figure III-50. Dans la bande [5.4 _ 5.7] GHz, la directivité varie de 0.3 dB avec un maximum de 20 dBi à 5.6 GHz.

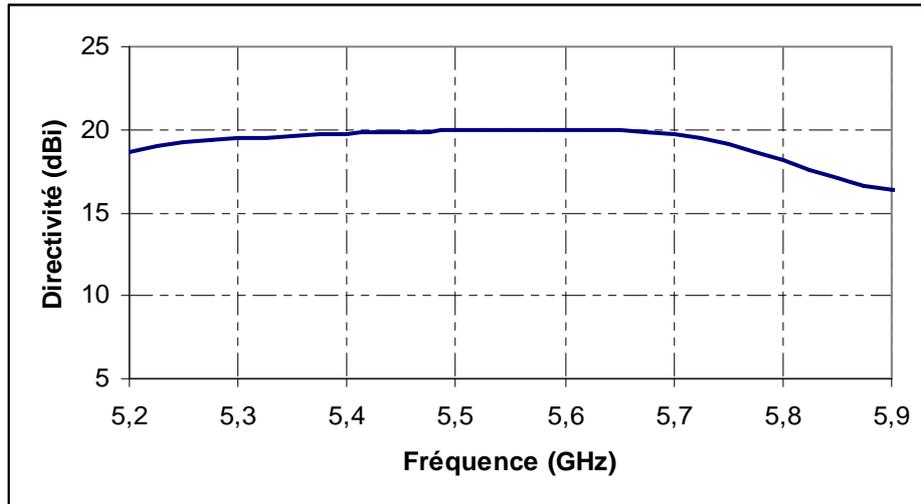


Figure III-50: Directivité fréquentielle (4 secteurs alimentés)

La Figure III-51 montre le digramme 3D de la structure simulée à 5.6 GHz, ainsi que les diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal.

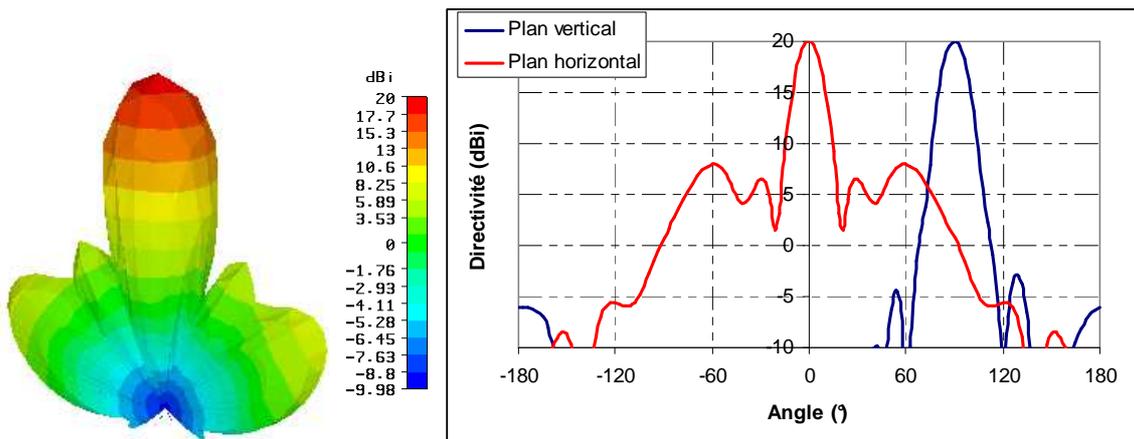


Figure III-51: Diagramme de rayonnement 3D et diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal de la structure à 5.6 GHz

Dans le plan vertical, le lobe est directif avec un angle d'ouverture de 20° et les lobes secondaires sont inférieurs à -20 dB du maximum. Dans le plan horizontal le faisceau est pincé avec un angle d'ouverture de 20° cependant les lobes secondaires sont à -13 dB du maximum. S'il ya besoin ce problème peut être corrigé en appliquant des pondérations d'amplitude sur les secteurs.

La Figure III-52 montre les courbes de 5 faisceaux consécutifs parmi les 18 faisceaux totaux de l'antenne BIE multisectorielle, produits par l'antenne BIE en alimentant 4 secteurs

à la fois. Nous pouvons remarquer que deux lobes consécutifs se recoupent à -3.7 dB du maximum.

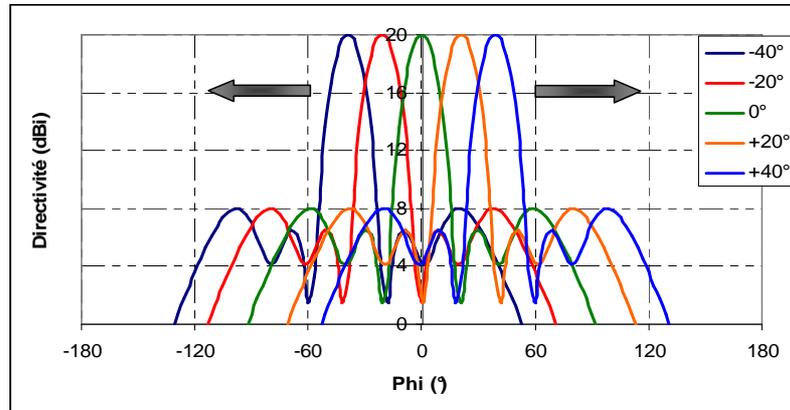


Figure III-52: Exemples de 5 faisceaux consécutifs parmi les 18 faisceaux balayant le plan horizontal

III.6. Le RADAR

III.6.1. Définition d'un RADAR

Le RADAR « Radio Detection And Ranging » est un système qui utilise des ondes radio pour détecter et déterminer la distance et/ou la vitesse d'objets tels que les avions, bateaux, ou encore la pluie, par le balayage d'un faisceau dans un ou deux plan. Un émetteur envoie des ondes radio qui sont réfléchies par la cible et détectées par un récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La distance est estimée grâce au temps de retour du signal et la vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par l'effet Doppler.

Dans la plupart des cas, l'émetteur et le récepteur du radar partagent une électronique et une antenne commune. Nous parlons alors de radar « **monostatique** ».

III.6.2. Types d'applications RADAR

Les premières utilisations opérationnelles du radar ont eu lieu pendant la 2nde guerre mondiale afin de détecter depuis la côte l'approche de formations aériennes et de navires. Aujourd'hui, les radars ont une très grande variété d'applications dans de nombreux domaines :

- Militaire : radars de détection et de surveillance aérienne ou sol ou embarqués, radars de veille en surface sur les navires de guerre, radars d'appontage, autodirecteurs de missiles, radars de détection terrestre et radars d'artilleries.
- Aéronautique : contrôle du trafic aérien ; guidage d'approche d'aéroport ; radars d'altimétrie et radars de navigation.
- Maritime : radars de navigation, radars anticollision.
- Métrologie : détection de précipitations (pluie, neige, grêle,..)
- Circulation routière : Contrôle de la vitesse des automobiles, radars de recul sur automobiles et radars d'assistance au freinage d'urgence
- Scientifique : radars embarqués sur satellite pour l'observation de la terre, du niveau des océans, etc.

Plusieurs applications parmi celles citées en haut nécessitent un système radar avec une antenne à balayage (radars de surveillance, radars de trafic aériens, radars de métrologie, etc.). Par ailleurs le gain de l'antenne doit être élevé (≥ 25 dB) dans le but d'augmenter la portée du système.

III.6.3. Etude de l'antenne BIE multisectorielle

La directivité maximale de l'antenne BIE multisectorielle étudiée (cf. Paragraphe III.4.4), dans le cas où un seul secteur est alimenté, est égale à 15.3 dBi avec un large faisceau (50°). En alimentant simultanément 4 secteurs dans le plan horizontal, la directivité maximale a augmenté de 4.7 dB avec un angle d'ouverture de 20° du faisceau.

Dans le but d'augmenter encore plus la directivité, nous allons utiliser la technique multisource en rajoutant des patchs dans le plan vertical, à condition que le lobe de rayonnement dans ce plan n'ait pas un angle ouverture inférieur à 7° .

III.6.3.1. Description de l'antenne

L'antenne BIE multisectorielle après avoir rajouté les patchs dans le plan vertical des secteurs est montrée sur la Figure III-53.

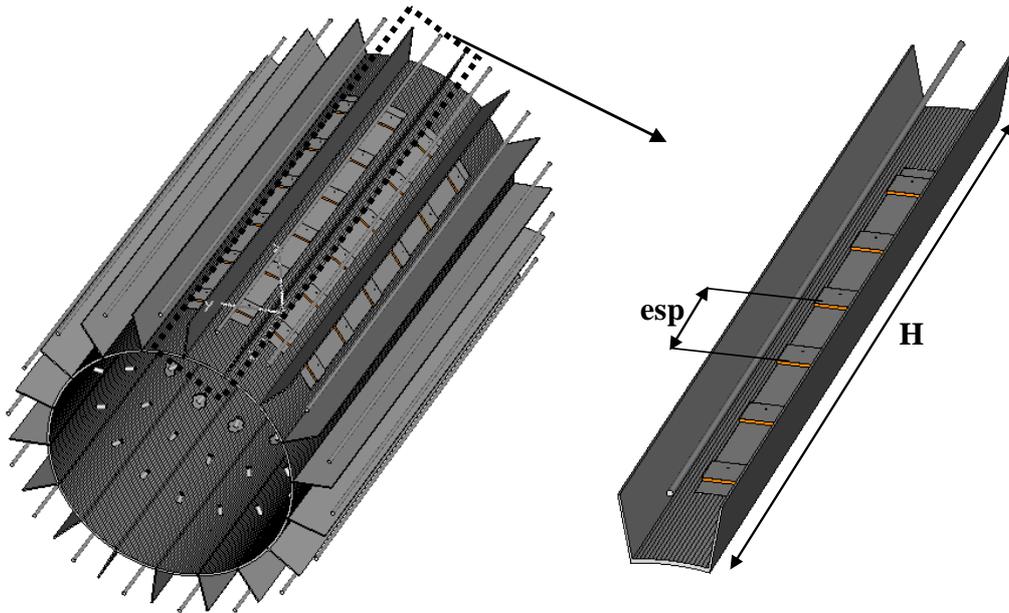


Figure III-53: antenne BIE multisectorielle après avoir rajouté des patches dans le plan vertical

La nouvelle hauteur de l'antenne est $H = 488 \text{ mm}$. Le nombre de patches d'excitation est égal à 6 avec un espacement inter-sources $\text{esp} = 60 \text{ mm}$.

III.6.3.2. Performances de l'antenne

La Figure III-54 présente la directivité fréquentielle en alimentant simultanément 4 secteurs dans le plan horizontal. La directivité maximale est égale à 23.5 dBi à la fréquence 5.6 GHz.

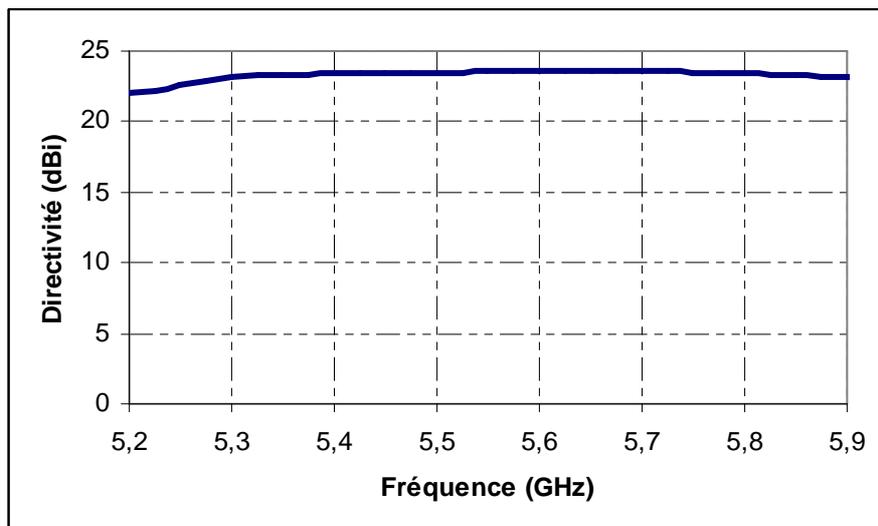


Figure III-54: Directivité fréquentielle (4 secteurs alimentés)

Les diagrammes de rayonnement à 5.6 GHz, dans le plan vertical et horizontal de l'antenne sont montrés respectivement sur la Figure III-55 .

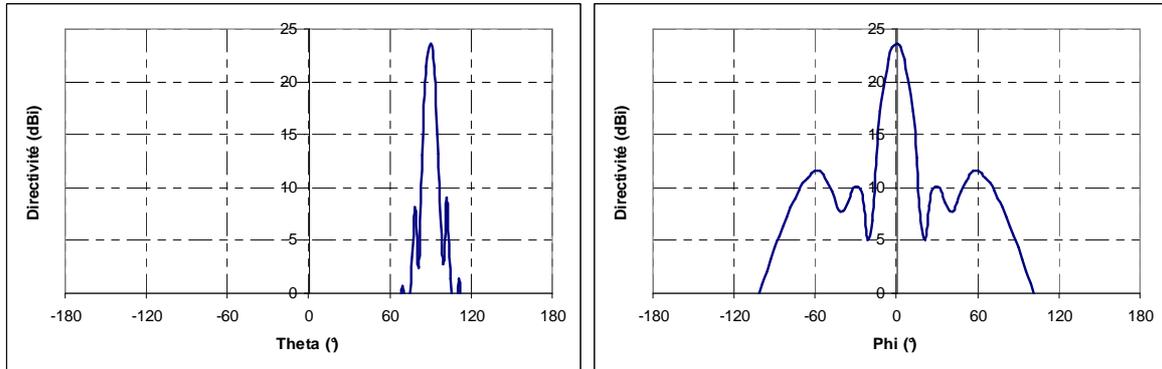


Figure III-55: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal respectivement à 5.6 GHz.

L'angle d'ouverture des lobes dans le plan vertical et horizontal est égal à 7° et 20° respectivement. La Figure III-56 présente les courbes de 5 faisceaux du plan horizontal parmi les 18 totaux de la structure BIE multisectorielle.

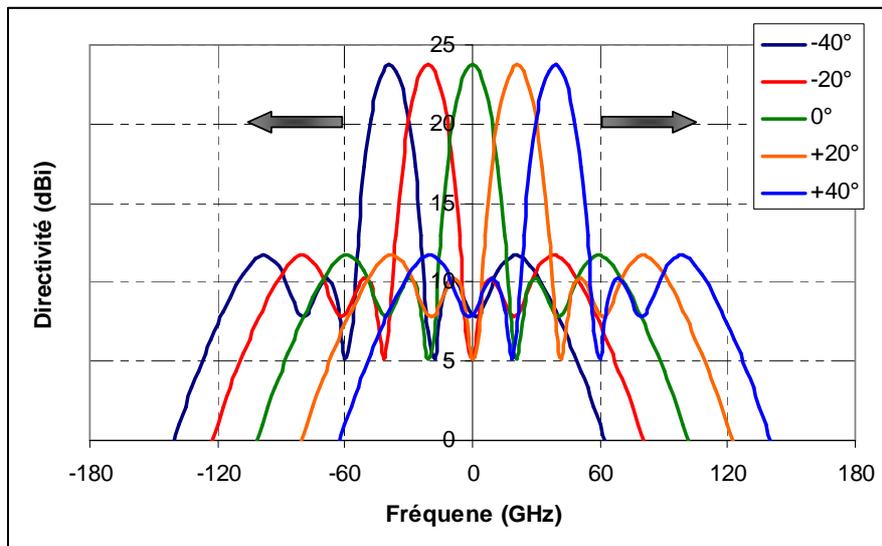


Figure III-56: Exemple de 5 faisceaux consécutifs parmi les 18 faisceaux balayant le plan horizontal

Cette antenne assure le balayage du plan horizontal avec un faisceau tous les 20° . Deux faisceaux consécutifs se recoupent à **-3.5 dB** du maximum. Cependant, la directivité maximale atteinte est égale à 23.5 dBi, ce qui ne correspond pas à la directivité requise pour une application RADAR ($D \geq 25$ dBi). Le niveau des lobes de réseau étant élevé, il est possible de le baisser en appliquant une pondération d'amplitude sur les différentes sources.

III.6.4. Augmentation de la directivité

Une solution pour augmenter la directivité de l'antenne BIE multisectorielle, consiste à élargir le diamètre du cylindre métallique et augmenter le nombre de secteurs dans le plan horizontal. Nous présentons les résultats de deux simulations.

III.6.4.1. Première simulation (Diamètre du cylindre = 150 mm)

L'antenne BIE multisectorielle est présentée sur la Figure III-57. Le diamètre du cylindre métallique est de **150 mm**, et le nombre total de secteurs dans le plan horizontal est égal à **24**. Chaque secteur est excité par **6** patchs dans le plan vertical espacés de **60 mm**.

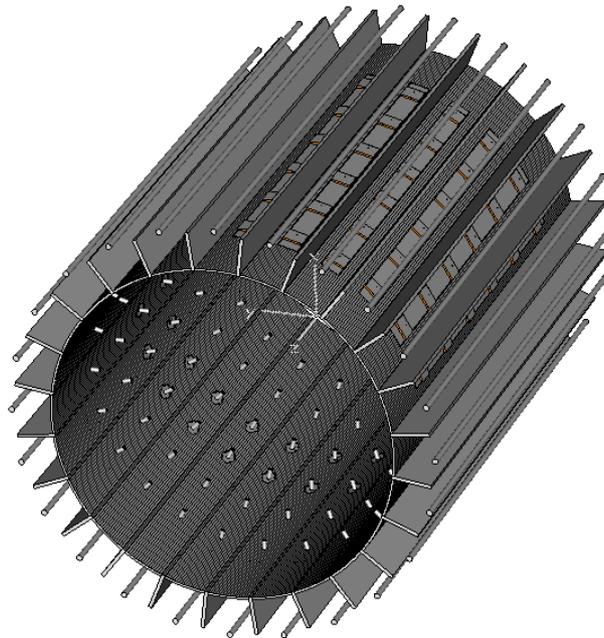


Figure III-57: Antenne BIE multisectorielle à 24 secteurs dans le plan horizontal

Pour cette antenne, le nombre optimal de secteurs à alimenter simultanément dans le plan horizontal est égale à **5**. La directivité fréquentielle en alimentant simultanément 5 secteurs dans le plan horizontal est présentée sur la Figure III-58. Elle atteint une valeur maximale de 25 dBi à 5.6 GHz.

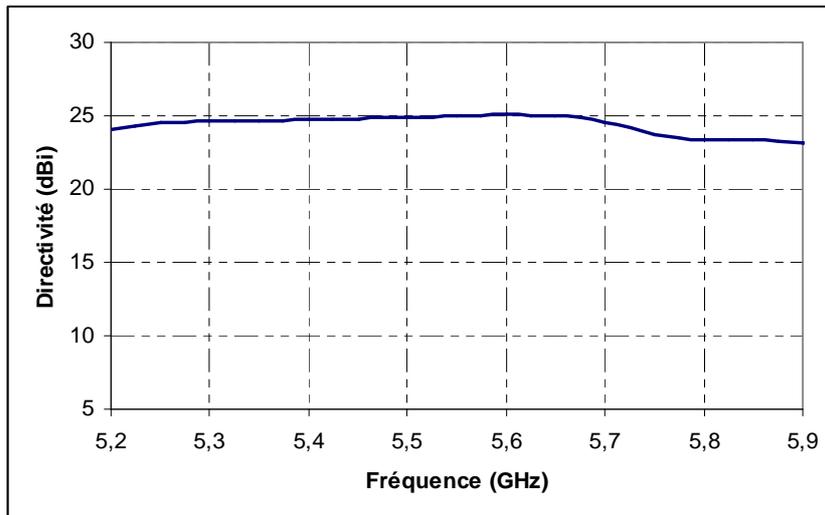


Figure III-58: 4 Directivité fréquentielle (4 secteurs alimentés)

Les diagrammes de rayonnement à 5.6 GHz, dans le plan vertical et horizontal de l'antenne sont montrés respectivement sur la Figure III-59 .

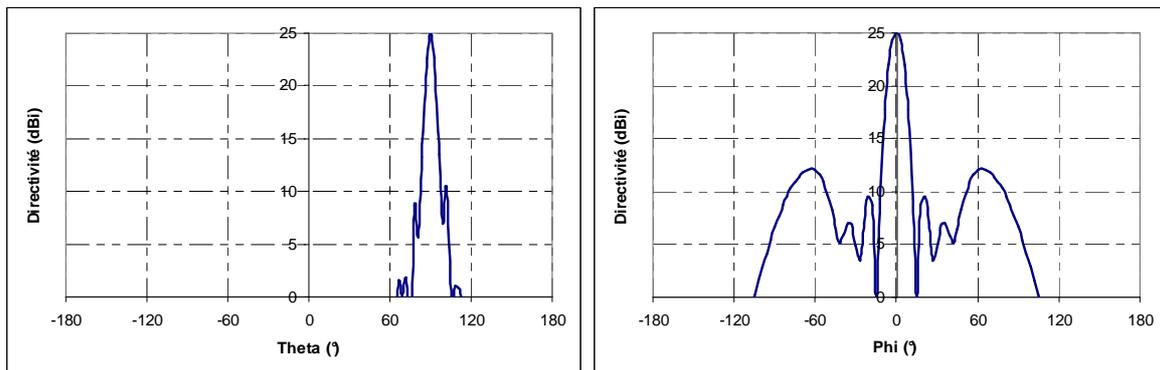


Figure III-59: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal respectivement à 5.6 GHz

L'angle d'ouverture des lobes dans le plan vertical et horizontal est égal à 7° et 14° respectivement. La Figure III-60 présente les courbes de 5 faisceaux du plan horizontal parmi les 24 totaux de la structure BIE multisectorielle. Le recouvrement entre deux faisceaux adjacents se trouve à -4.5 dB du maximum.

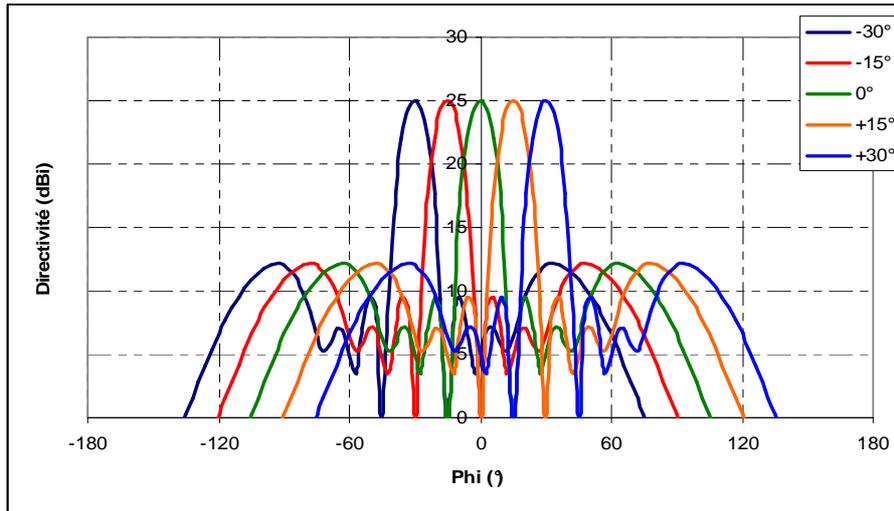


Figure III-60: Exemple de 5 faisceaux consécutifs parmi les 24 faisceaux balayant le plan horizontal

Cette antenne permet le balayage du plan horizontal par 24 faisceaux tous les 15°. Nous avons réussi à atteindre 25 dB de directivité (acceptable pour l'application RADAR) en élargissant le rayon du cylindre métallique et en augmentant le nombre des secteurs dans le plan horizontal. Cependant, les lobes se recoupent à -4.5 dB du maximum.

III.6.4.2. Deuxième simulation (Diamètre du cylindre = 200 mm)

L'antenne BIE multisectorielle est présentée sur la Figure III-61. Le diamètre du cylindre métallique est de **200 mm**, et le nombre total de secteurs dans le plan horizontal est égal à **30**. Chaque secteur est excité par **6** patches dans le plan vertical espacés de **60 mm**.

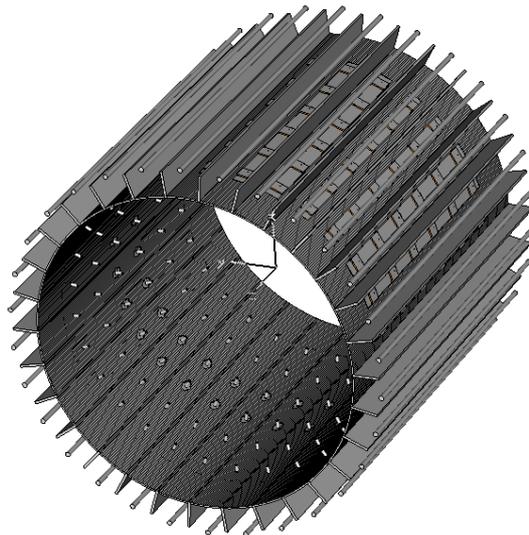


Figure III-61: Antenne BIE multisectorielle à 30 secteurs dans le plan horizontal

Pour cette antenne, le nombre optimal de secteurs à alimenter simultanément dans le plan horizontal est égale à 6. La valeur maximale de la directivité en alimentant simultanément 6 secteurs dans le plan horizontal est de 26.2 dBi à 5.6 GHz (Figure III-62).

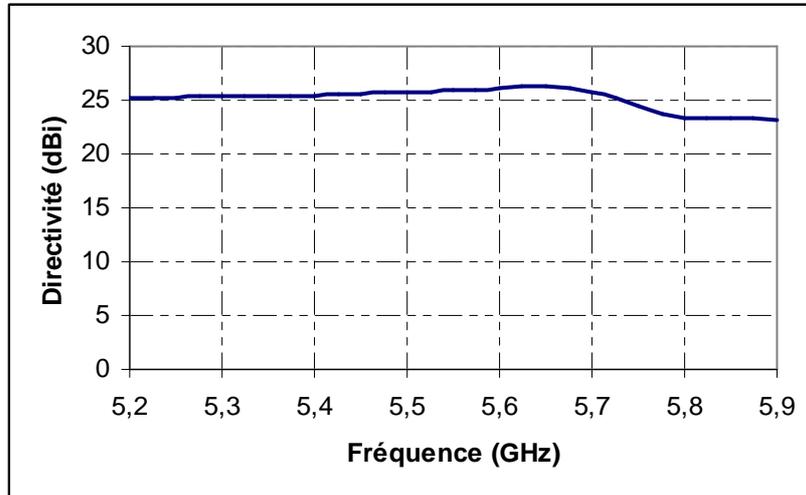


Figure III-62: Directivité fréquentielle (6 secteurs alimentés)

En ce qui concerne le rayonnement à 5.6 GHz, l'angle d'ouverture du lobe est égal à 7° dans le plan vertical et 11° dans le plan horizontal (Figure III-63).

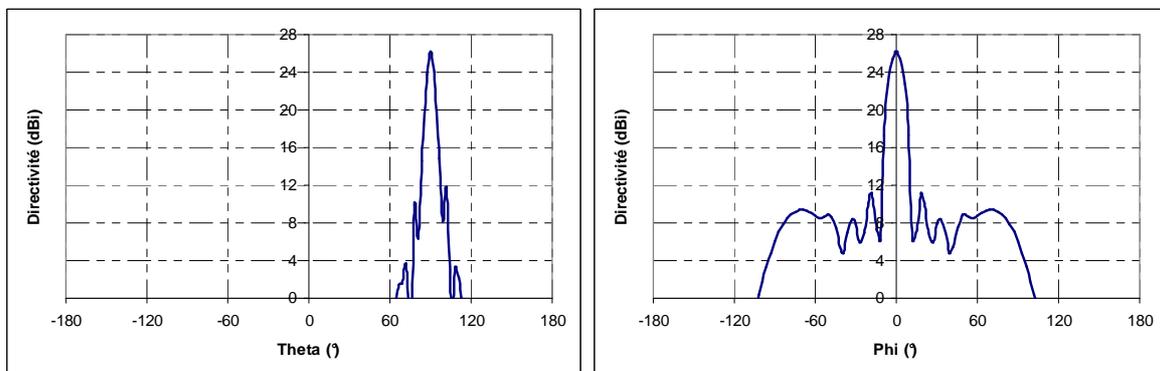


Figure III-63: Diagrammes de rayonnement dans le plan vertical et horizontal respectivement à 5.6 GHz

La Figure III-64 montre les courbes de 5 faisceaux consécutifs dans le plan horizontal parmi les 30 faisceaux totaux de l'antenne BIE multisectorielle.

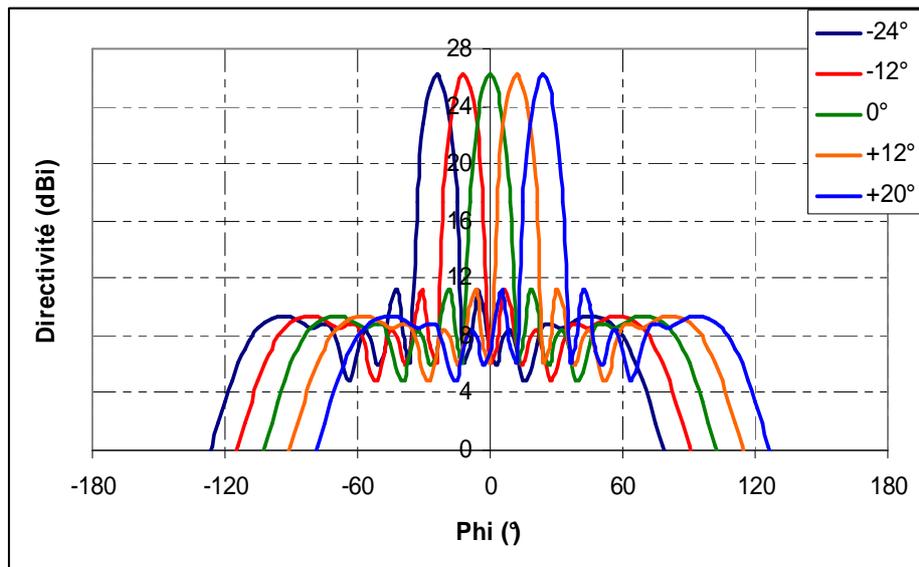


Figure III-64: Exemple de 5 faisceaux consécutifs parmi les 36 faisceaux balayant le plan horizontal

Avec cette antenne, le plan horizontal est balayé par 30 faisceaux tous les 12° avec une directivité de 26.2 dB. Le recouvrement entre les lobes se trouve à -3.6 dB du maximum. Cette antenne BIE multisectorielle est alors adéquate pour des systèmes RADAR.

III.7. Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à **la conception de l'antenne BIE multisectorielle dans le plan horizontal.**

Dans la première partie, une méthode de **réduction du couplage** entre les sources de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux dans le cas où leur nombre dans le plan horizontal est important, a été présenté. La nature évanescence du champ en « ϕ » nous a permis d'insérer des murs métalliques entre les sources d'excitation sans affecter la phase du champ à cette endroit. En conséquence, le mode BIE coaxiale n'existe plus et l'antenne a été considérée comme un réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles.

La deuxième partie a été consacrée à la conception d'une antenne BIE multisectorielle pour une **application de reconfiguration de diagramme** dans le plan horizontal. le cahier de charge amendée a été présenté.

Ensuite une première simulation de l'antenne a été effectuée. Les résultats obtenus n'étaient pas assez suffisants. Une procédure d'amélioration de performance a donc été accomplie.

Enfin, nous avons voulu fabriquer un prototype pour valider notre concept. Cependant, le prix de fabrication de la structure comme elle est nous a paru élevé. C'est pourquoi des changements ont été appliqués sur la structure et les contraintes sur la précision et le nombre de secteurs ont été relâchées. En conclusion, nous avons pu réduire le prix de fabrication d'un facteur de 50% pour un prototype de 9 secteurs. Ce dernier a été fabriqué et caractérisé, et les résultats de mesures ont montré une très bonne corrélation avec ceux simulés.

Dans une troisième partie, l'antenne BIE multisectorielle présentée dans la partie précédente, a été étudié pour des **applications de diversité et de caractérisation de canal de propagation.** Ces deux applications nécessitent **détection des directions d'arrivée** des signaux. Pour avoir une bonne résolution angulaire, le faisceau balayant le plan horizontal doit de préférence être étroit, cependant, le faisceau obtenu en alimentant un seul secteur est large ($\approx 50^\circ$). L'antenne BIE multisectorielle étant considérée comme un réseau cylindrique d'antenne BIE sectorielle, nous avons réussi à pincer le lobe dans le plan horizontal en alimentant simultanément plusieurs secteurs avec les phases correspondantes.

L'étude des performances en fonction du nombre de secteurs alimentés dans le plan horizontal a ensuite été effectuée pour connaître le nombre optimal de secteurs à alimenter pour avoir les meilleures performances

Enfin, la directivité fréquentielle de l'antenne et les diagrammes de rayonnement ont été présentées, et l'analyse de recouvrement des faisceaux dans le plan horizontal a été effectuée.

La dernière partie a été consacrée à l'étude de l'antenne BIE multisectorielle pour des **applications RADAR**. Pour ce type d'applications le gain de l'antenne doit être élevé (≥ 25 dB) dans le but d'augmenter la portée d'un système RADAR. Plusieurs secteurs ont été simultanément alimentés dans le plan horizontal et la technique multisource a été utilisée dans le plan vertical pour avoir le maximum de directivité.

Plusieurs simulations réalisées nous ont montré qu'en élargissant le diamètre de la structure nous avons pu alimenter un nombre plus grand de secteurs dans le plan horizontal et ainsi augmenter encore plus la directivité de l'antenne.

Les résultats des simulations ont été présentés pour chaque cas en termes de directivité fréquentielle et diagrammes de rayonnement. Le recouvrement des faisceaux a également été analysé pour chaque cas.

Conclusion générale

Le travail de recherche effectué pendant ces trois dernières années et résumé dans ce mémoire, a porté sur **l'étude et la caractérisation d'antennes à bande interdite électromagnétique (BIE) multifaisceaux** dans le but **d'améliorer la couverture du plan horizontal**.

Pour commencer, le contexte du travail a été présenté lors du premier chapitre. **Un historique des antennes BIE cylindriques** a montré leur évolution avec le temps. Le contexte de travail a également été évoqué.

Le second chapitre a d'abord présenté une méthode pour la **conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux**. Le **fonctionnement général** de cette antenne, inspirée de la structure BIE coaxiale omnidirectionnelle, a été décrit. Premièrement **une étude fréquentielle** a permis de mieux comprendre comment agir sur l'antenne pour atteindre les caractéristiques souhaitées. Ensuite, **une variation des différents paramètres physiques** de la structure a été effectuée pour observer leur influence sur le fonctionnement de l'antenne (fréquence, directivité, angle d'ouverture, etc..).

Ces études nous ont aidés à concevoir dans une première **antenne BIE coaxiale multifaisceaux 4*90°** permettant de couvrir la totalité de l'espace azimutal (360°). Les performances de cette antenne ont été comparées à celle de l'antenne omnidirectionnelle de référence pour constater un gain additionnel de **6 dB** sur la directivité.

Enfin, l'influence de **l'augmentation du nombre de sources dans le plan horizontal** sur les performances de l'antenne BIE multifaisceaux a été analysée. Les différentes simulations effectuées nous ont montré que **le couplage entre les sources** devient plus fort quand le nombre de sources dans la structure augmente. Il en découle des performances de l'antenne de plus en plus dégradées.

Dans la première partie du **troisième et dernier chapitre**, une **méthode réduction de ce couplage** entre les sources du plan horizontal quand leur nombre est important a été proposé. La nature évanescente du champ nous a permis d'insérer des **murs métalliques** entre les différentes sources sans affecter la phase du champ. Ainsi, le mode coaxiale évanescent en « ϕ » n'existe plus. L'antenne a donc été considérée comme un **réseau cylindrique d'antennes BIE sectorielles** et nommée l'**antenne BIE multisectorielle**.

La deuxième partie a été consacrée à la conception et la réalisation d'une antenne BIE multisectorielle pour des applications de **reconfiguration de diagramme dans le plan horizontal**. L'objectif et le cahier des charges amendé ont été présentés. Plusieurs simulations **d'optimisation et d'amélioration des performances** de l'antenne ont été effectuées pour satisfaire ce cahier des charges.

Dans l'intention de valider notre concept, un devis pour une fabrication d'un prototype a été demandé. Dans le but de **réduire le prix de fabrication**, des modifications ont été appliquées sur quelques composants de l'antenne, et les contraintes sur la précision ont été relâchées (facteur de 10). En résultat, le prix de fabrication a été réduit de 50% pour un prototype de 9 secteurs. Les mesures du prototype ont été effectuées et les résultats ont montré une bonne corrélation avec ceux simulés. Un système de commutation à base de 3 commutateurs SP6T a été finalement présenté.

Dans une troisième partie, l'antenne BIE multisectorielle conçue pour la reconfiguration de diagramme a été étudiée pour d'autres applications : **la diversité et la caractérisation du canal de propagation**. Ces deux applications se basent sur une même technique : **la détection de directions d'arrivée**. Pour ce type d'applications, le faisceau balayant le plan horizontal doit de préférence être étroit. Le faisceau de l'antenne résultant de l'alimentation d'un seul secteur étant large (50°), l'alimentation de plusieurs secteurs dans le plan horizontal avec les phases correspondantes pour pouvoir pincer le lobe dans ce plan. Les simulations de l'antenne et les résultats correspondants ont montré cette faisabilité (obtention d'un faisceau de 20° d'ouvertures par l'excitation simultanée de 4 secteurs).

L'étude de l'antenne BIE multisectorielle pour des **applications RADAR** a fait l'objet de la dernière partie de ce chapitre. Ces applications nécessitent le balayage du plan horizontal avec un **grand gain** ($\geq 25dB$) pour pouvoir augmenter la portée de la liaison. C'est pourquoi plusieurs secteurs dans le plan horizontal ont été simultanément alimentés et que la technique multisources a été employée dans le plan vertical pour avoir le maximum de directivité. Une seconde méthode pour gagner encore plus de directivité, consistait à **élargir le diamètre du cylindre métallique de la structure en augmentant le nombre de secteur dans le plan horizontal**. Plusieurs simulations ont été réalisées dans ce sens et leurs résultats ont montré la possibilité d'obtention d'une directivité de 26 dBi.

Le Tableau C. 1 contient un récapitulatif des antennes étudiées dans ce manuscrit. leurs domaines possibles d'applications ainsi que leurs caractéristiques (nombre de faisceaux dans le plan horizontal, forme et angle d'ouverture du faisceau dans ce plan et le gain) sont données dans ce tableau.

Type d'antenne	Application possible	Nombre de faisceaux	Forme du faisceau	Ouverture du faisceau	Gain simulé
Antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle	Station de base	1	omnidirectionnel	360°	7dB
Antenne BIE coaxiale multifaisceaux	Diversité	4	sectoriel	91°	13 dB
	Reconfiguration du diagramme	4	sectoriel	91°	13 dB
Antenne BIE multisectorielle	Diversité	18	sectoriel	50°	15 dB
	Reconfiguration du diagramme	18	Directif	20°	20 dB
	Caractérisation d'un canal de propagation	18	Directif	20°	20 dB
	Radar	30	Directif	11°	26 dB

Tableau C. 1: Comparaison entre les différents types d'antennes étudiées

En conclusion, les différents travaux présentés dans cette thèse ont montré la possibilité **d'amélioration de la couverture omnidirectionnelle dans le plan horizontal** par l'utilisation **d'antenne BIE multifaisceaux agiles** dans ce plan. Les différentes applications envisageables ainsi que les performances que l'on peut attendre pour chaque application sont maintenant connues.

Désormais, plusieurs axes de recherche à explorer sont possibles. Parmi ces travaux nous citons les plus intéressants :

- les systèmes de télécommunications fonctionnent très souvent sur deux bandes, l'une dite montante et l'autre descendante. Cela implique d'utiliser des **antennes multibandes**. Ce principe a déjà été étudié sur les antennes BIE planaires et pourrait être reproduit sur les antennes BIE multifaisceaux agiles.
- Plusieurs types de reconfigurations de diagrammes dans le plan horizontal de l'antenne BIE multisectorielle sont possibles. Les secteurs dans le plan horizontal sont indépendants les uns des autres. Ainsi, en excitant simultanément plusieurs secteurs adjacents dans le plan horizontal sans y appliquer des phases, nous pouvons avoir un **rayonnement sectoriel à ouverture variable** qui dépend du nombre de secteurs alimentés (Figure C. 1).

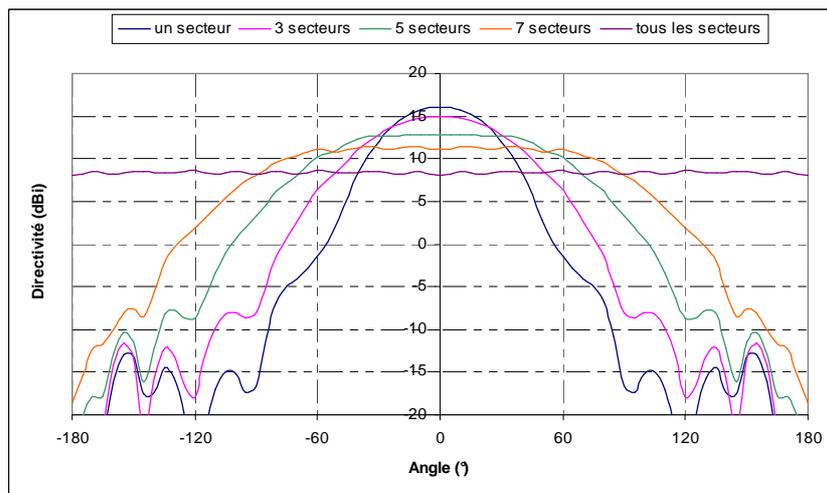


Figure C. 1: Evolution du rayonnement dans le plan horizontal avec le nombre de secteurs alimentés

- De plus, il est possible d'exciter deux ou plusieurs secteurs suffisamment séparés, pour avoir simultanément plusieurs faisceaux distincts dans le plan horizontal. Ceci permettra de **couvrir au même temps plusieurs zones** dans le plan horizontal (Figure C. 2).

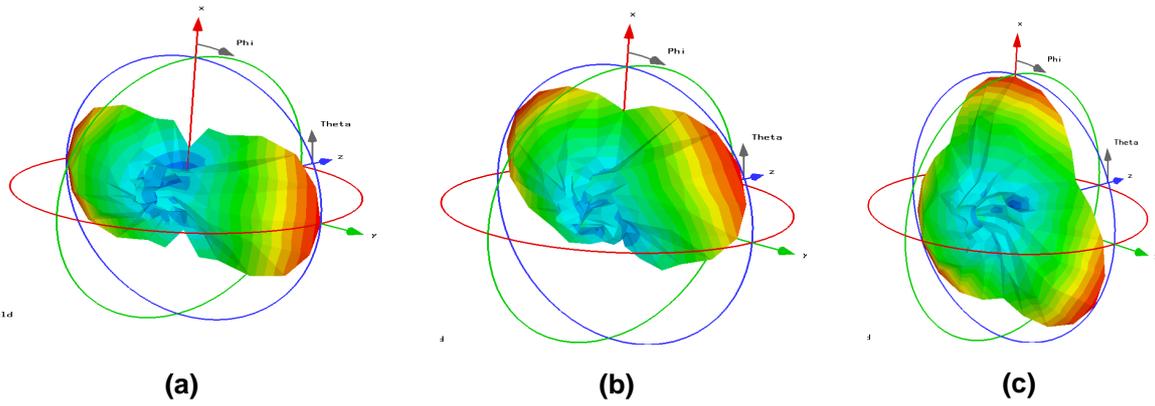


Figure C. 2: Exemples de couvertures. (a) 2 zones éloignées de 180° , (b) 2 zones éloignées de 120° et (c) 3 zones éloignées de 120°

- Enfin, si nous excitons simultanément plusieurs secteurs à des fréquences différentes mais voisines, nous pouvons obtenir un **rayonnement multispots** pour couverture cellulaire (Figure C. 3).

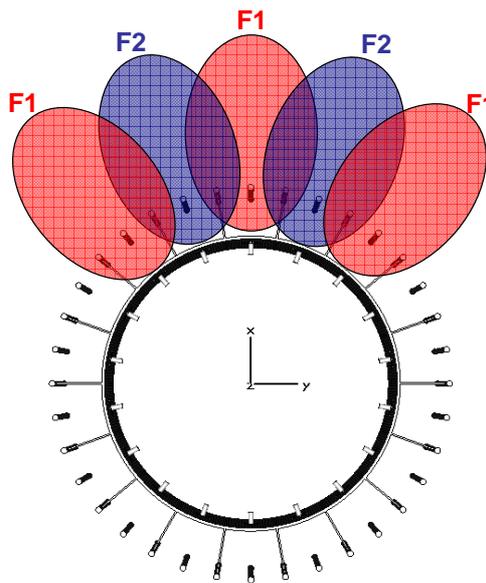


Figure C. 3: Couverture cellulaire (multispots)

Bibliographie

- [1] **Y. T. Lo and S. W. Lee.** *Antenna Handbook : chap 5.* Van Nostrand Reinhold.
- [2] **A.W. Love.** *Electromagnetic Horn Antennas.* New York, 1976.
- [3] **Y. T. Lo and S. W. Lee.** *Antenna Handbook : chap 8.* Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [4] **A.W. Love.** *Reflector antennas.* New York, 1978
- [5] **Y. T. Lo and S. W. Lee.** *Antenna Handbook : chap 11.* Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [6] **W. H. Kummer.** *Basic array theory.* In Proceedings of the IEEE, Vol. 80, N. 1., 1992
- [7] **F.R. Terman.** MacGraw-Hill. Electronic Radio and Engineering.
- [8] http://www.hyperlinktech.com/web/pdf/tri-antenna_array.pdf
- [9] **E. Rodes.** *Nouveaux concepts d'antenne à base de matériaux BIE métalliques. Application aux réseaux de télécommunications.* Thèse de doctorat, Université de Limoges N° 67-2006.
- [10] **M. Hajj, D. Serhal, E. Rodes, R. Chantalat, M. Thevenot, T. Monédière, B. Jecko.** *Metallic EBG sectoral antenna for base station.* ICECom 2007, 19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. Dubrovnik, Republic of Croatia.
- [11] **N. Herscovici, Z. Sipus, P.S. Kildal.** *The Cylindrical Omnidirectional Patch Antenna.* IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 49, no. 12, december 2001
- [12] **K. Chang, H. Kim, K.S. Hwang, S.H. Sim, S.J. Yoon and Y.J. Yoon.** *A Wideband Dual Frequency Printed Dipole Antenna Using a Parasitic Element.* 2003 IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology
- [13] **Y.H. Suh and K.Chang.** *Low cost microstrip-fed dual frequency printed dipole antenna for wireless communications.* Electronics Letters, 6th July 2000, Vol. 36, N°14.

[14] **K.L. Wong, J.W. Lai, F.R. Hsiao.** *Omnidirectional Planar Dipole Array Antenna for 2,4/5,2 GHz WLAN Access Point*, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 39, n° 1, October 2003

[15] **Ch. Delaveaud, Ph. Leveque, B. Jecko.** *New kind of microstrip antenna : the monopolar wire-patch antenna*, Electronics Letters, January 1994, Vol.30,N°1

[16] **R. Bancroft, B. Bateman.** *An omnidirectional planar microstrip antenna*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, Vol.52 N°11, pp.3151-3153.

[17] **K. George Thomas and N. Lenin.** *Collinear printed array antenna*. Microwave and optical technology letters, Vol.50, N°6, June 2008

[18] **N. Herscovici, Z. Sipus, P.S. Kildal.** *The Cylindrical Omnidirectional Patch Antenna*, IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 49, no. 12, December 2001

[19] **L. Freytag.** *Conception, réalisation et caractérisation d'antennes pour station de base des réseaux de télécommunications sans fils*, Thèse de doctorat, Université de Limoges N° 29-2004.

[20] **E. Pointereau.** *Etude d'antennes à bande interdite électromagnétique omnidirectionnelles en azimut*, Thèse de doctorat, Université de Limoges N° 27-2007.

[21] **J. Cha and Y. Kuga.** *A steerable array antenna using controllable 4-bit dielectric slab phase shifters on a coplanar waveguide at 24 Ghz*, Microwave and optical technology letters, Vol.49, N°12, December 2007

[22] **M. Koubeissi.** *Etude d'antennes multifaisceaux à base d'une nouvelle topologie de matrice de Butler. Conception du dispositif de commande associé.* Thèse doctorat, Université de Limoges, N° 40-2007.

[23] **O.Roncière, R.Sauleau, and K.Mahdjoubi.** *Antenne résonateur BIE à faisceau contrôlable*, JNM2005, Nantes, 2005.

[24] **H. Boutayeb.** *Etude des structures périodiques planaires et conformées associées aux antennes. Applications aux communications mobiles*, Thèse de doctorat, Université de Rennes, Décembre 2003.

[25] **E. Yablonovitch.** *Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics*, Physical review letters, May 18th 1987, Vol.58, pp2059-2062.

[26] **B. Jecko, A. Reinex, M. Thevenot.** *Antenne pourvue d'un assemblage de matériaux filtrant*, Brevet français N° FR9914521, déposé le 18 Novembre 1999.

[27] **L. Freytag, E. Pointereau, B. Jecko.** *Novel dielectric EBG antenna with omnidirectional pattern in the azimuth.* URSI 2004, International symposium on electromagnetic theory, May 23rd-27th 2004, Pisa, Italy, Vol.1, pp600-602, Session 2.15.

[28] **L. Freytag, E. Pointereau, B. Jecko.** *Omnidirectional dielectric electromagnetic band gap antenna for base station of wireless network*, IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, June 20th-26th 2004, Monterey, California, USA, Vol.1, pp815-818, Session 31.

[29] **L. Freytag, E. Pointereau, B. Jecko.** *Antenne à matériau BIP (Bande Interdite Photonique) à paroi latérale entourant un axe*, N° 0405485, 19 mai 2004.

[30] **L. Freytag.** *Conception, réalisation et caractérisation d'antennes pour station de base des réseaux de télécommunications sans fils*, Thèse de doctorat, Université de Limoges N° 29-2004.

[31] **E. Pointereau, L. Freytag, B. Jecko.** *Cylindrical dielectric electromagnetic band gap antenna with omnidirectional radiation in the azimuth*, JINA 2004, Nice, France, 8-10 Novembre 2004, pp130-131, Session 2.10.

[32] **E. Pointereau, L. Freytag, B. Jecko.** *Antenne cylindrique à matériau BIE métallique*, 14^{ème} journée nationale de micro-ondes, JNM 2005, Nantes, France, 11-13 Mai 2005, p160.

[33] **L. Freytag, E. Pointereau, B. Jecko.** *Dielectric and metallic electromagnetic band gap antennas for omnidirectional coverage of telecommunication network*, 11th international symposium on antenna technology and applied electromagnetics, ANTEM 2005, ST MALO, France, June 15th – 17th 2005, pp64-65.

[34] **E. Pointereau.** *Etude d'antennes à bande interdite électromagnétique omnidirectionnelles en azimut*, Thèse de doctorat, Université de Limoges N° 27-2007.

[35] **H. Chreim, E. Pointereau, B. Jecko, P. Dufrane.** *Omnidirectional electromagnetic band gap antenna for base station application*, IEEE Antenna and wireless propagation letters, Vol.6, 2007

[36] **G.K. Palikaras, A.P. Fresedis, J.C. Vardaxoglou.** *Analysis of an omnidirectional antenna with enhanced E-plane Directivity using cylindrical EBG surfaces*, EuCAP 2006, Nice, France, 6-10 Novembre 2006.

[37] **E. Pointereau, H. Chreim, B. Jecko, P. Dufrane.** *Omnidirectional cylindrical electromagnetic gap antenna with dual polarization*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 6, 2007.

[38] **P. Ratajczak, P.Y. Garel, E. Akmansoy, F. Gadot, A. De Lustrac, H. Boutayeb, K. Mahdjoubi, A.C. Tarrot, J.P. Daniel, K. Sayegrih.** *An adaptative beam steering antenna using a controllable EBG material for a GSM, DCS and UMTS base station*, JINA 2004, Nice, France, 8-10 Novembre 2004, pp126-137, Session 2.8.

[39] **M.A Habib, T.A. Denidni.** *Directive cylindrical electromagnetic band gap antenna with microstrip technology*, IEEE 2007.

[40] **www.cst.com**

[41] **R. Marklein.** *The Finite Integration Technique as a general tool to compute acoustic, electromagnetic, elastodynamic and coupled wave fields.*

[42] **G.V. Trentini.** *Partially reflecting sheet arrays*, Transactions on Antennas and Propagation, October 1956, pp 666_671

[43] **E. Pointereau, H. Chreim, B. Jecko, P. Dufrane.** *Omnidirectional cylindrical electromagnetic gap antenna with dual polarization*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 6, 2007.

[44] **L. Freytag.** *Conception, réalisation et caractérisation d'antennes pour station de base des réseaux de télécommunications sans fils*, Thèse de doctorat, Université de Limoges N° 29-2004.

[45] **B. Jecko, R. Chantalat, L. Leger, M. Thevenot, T. Monediere, P. Dumon.** *Antenne à matériau BIP multifaisceaux et/ou multifréquences et système mettant en œuvre ces antenne*, Brevet français N° FR0213326, déposé le 24 Octobre 2002

[46] **L. Leger, T. Monédière, B. Jecko.** *Enhancement of gain and radiation bandwidth for a planar 1-D EBG antenna*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 15, N° 9, September 2005.

[47] www.prototig.com

Annexes

ANNEXE I

ERREUR DE REALISATION DES PATCHS D'EXCITATION

Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, il y avait un décalage fréquentiel entre les coefficients de réflexion mesurés des 9 secteurs du prototype fabriqué et celui de la structure simulée.

Le circuit des patchs d'excitation de chaque secteur est collé sur une semelle métallique avec du CYANOACRYLATE (Figure A.1. 1). Cependant, il y avait un gap d'air entre la semelle métallique et les circuits, ce qui a créé ce décalage fréquentielle.

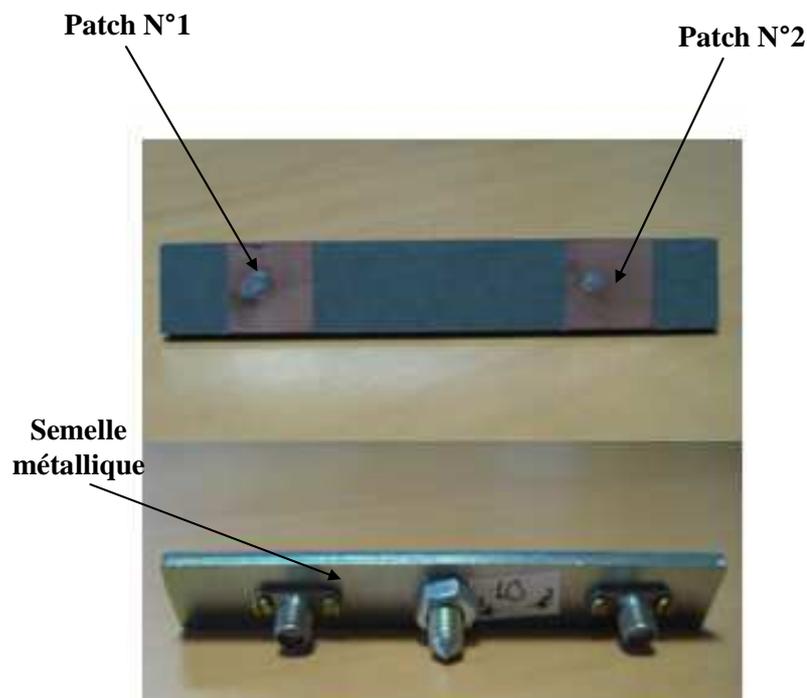
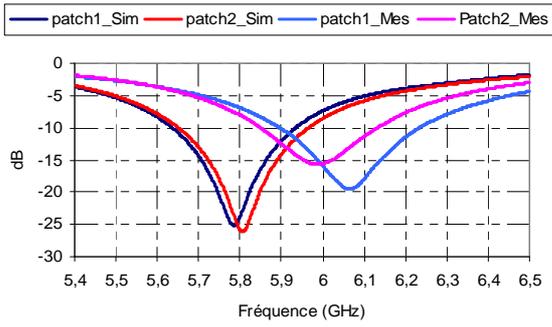


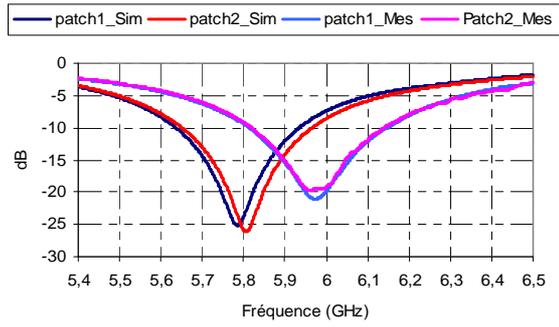
Figure A.1. 1 : Circuit de deux patchs réalisés pour l'excitation d'un seul secteur

Les coefficients de réflexion sur sur les deux patchs des 9 circuits d'excitation ont été mesurés sans la structure BIE et comparés à ceux simulés pour observer cette erreur. Les courbes sont montrées sur la Figure A.1. 2 .

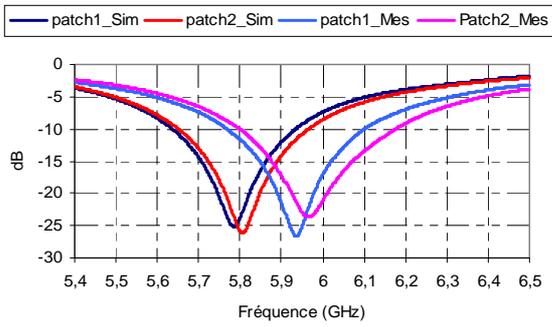
Circuit_Secteur 1



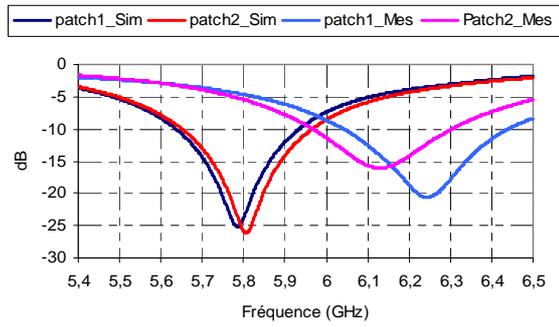
Circuit_Secteur 2



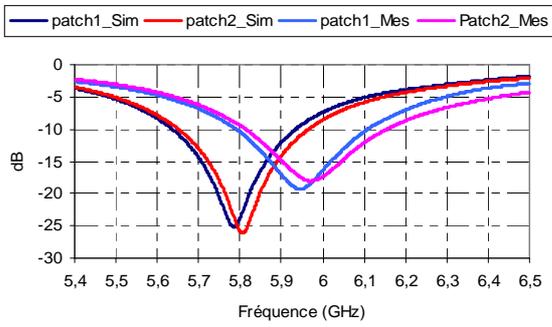
Circuit_Secteur 3



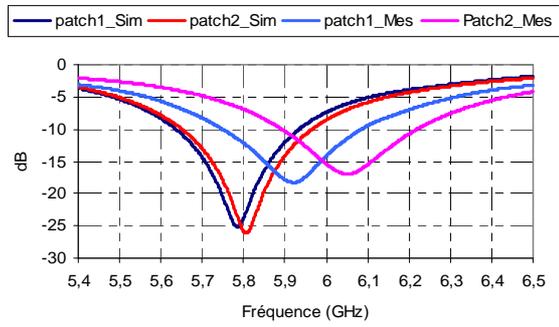
Circuit_Secteur 4



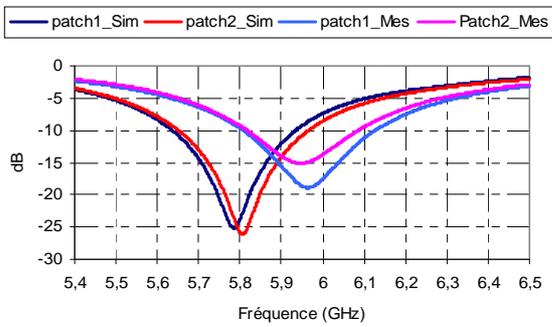
Circuit_Secteur 5



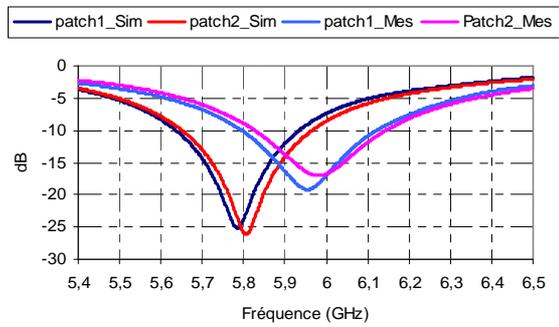
Circuit_Secteur 6



Circuit_Secteur 7



Circuit_Secteur 8



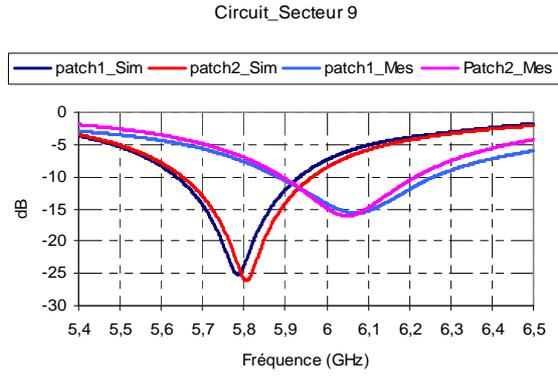


Figure A.1. 2: Coefficients de réflexion mesurés et simulés sur les deux patches des 9 circuits d'excitation

ANNEXE II

Diagrammes de rayonnement mesurés des 9 secteurs

La Figure A.2. 1 montre les gains réalisés mesurés des 9 secteurs en fonction de la fréquence.

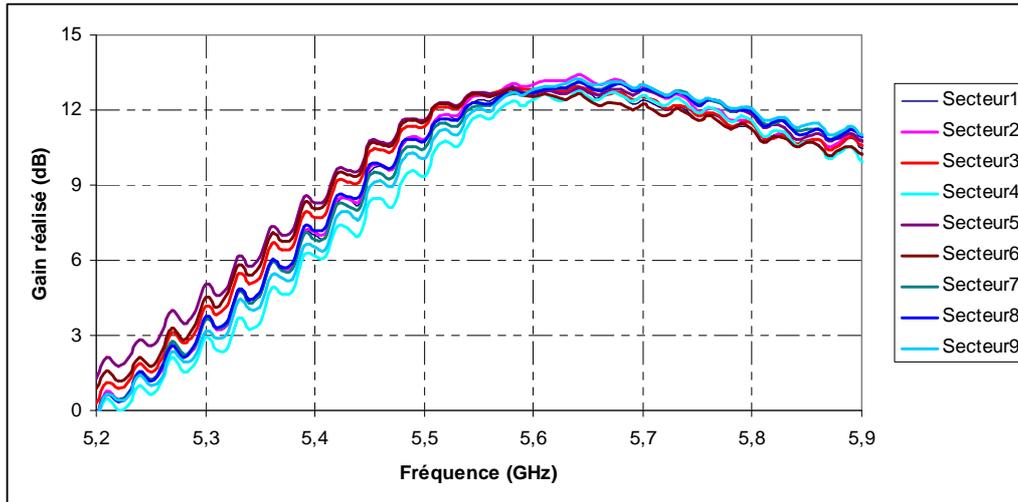
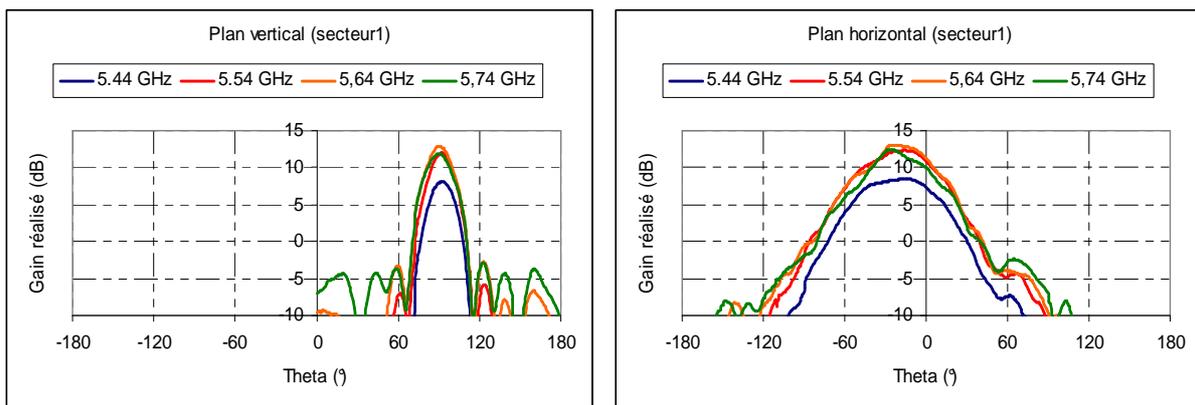
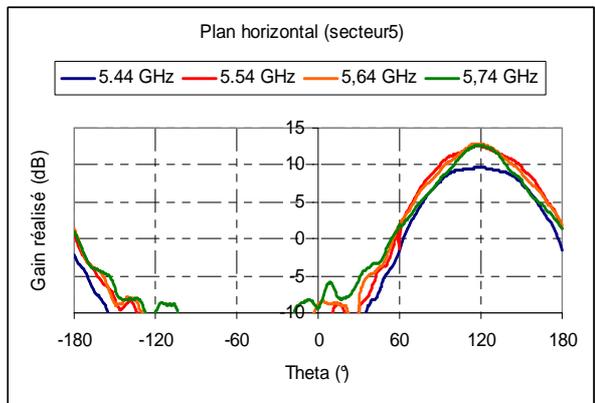
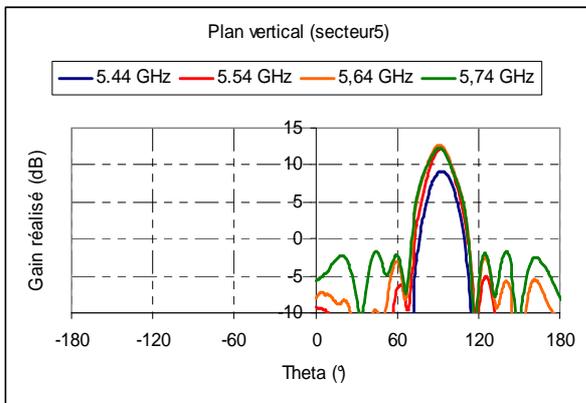
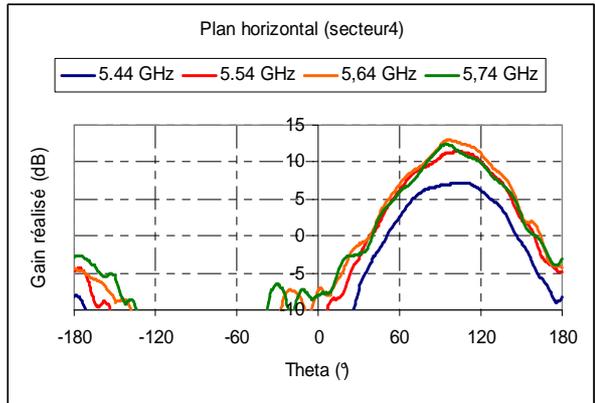
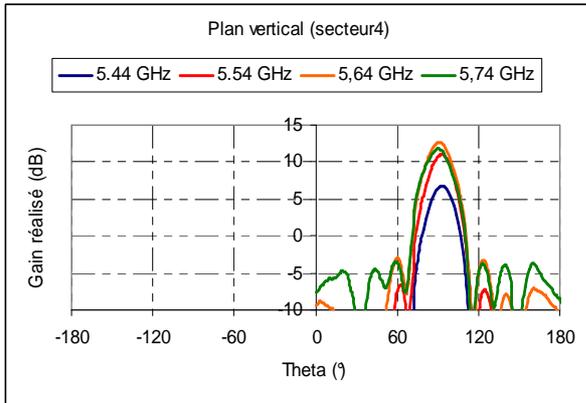
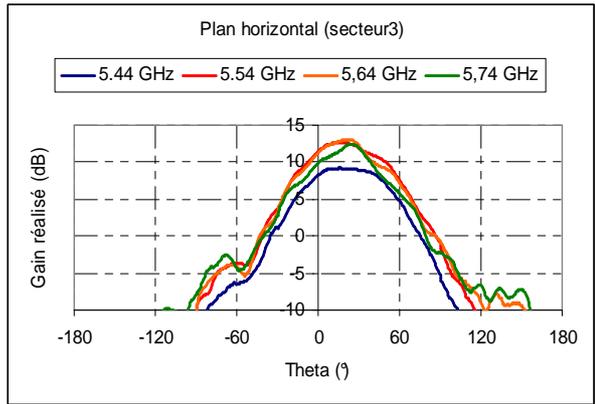
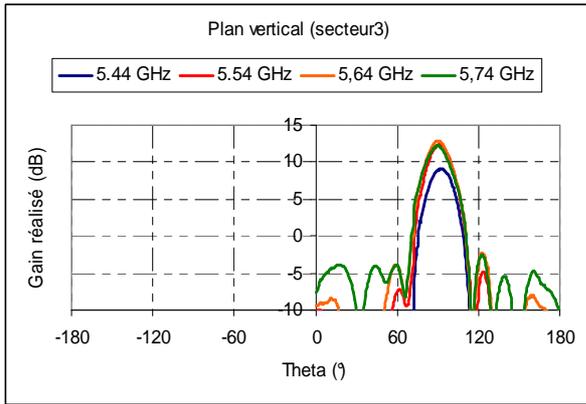
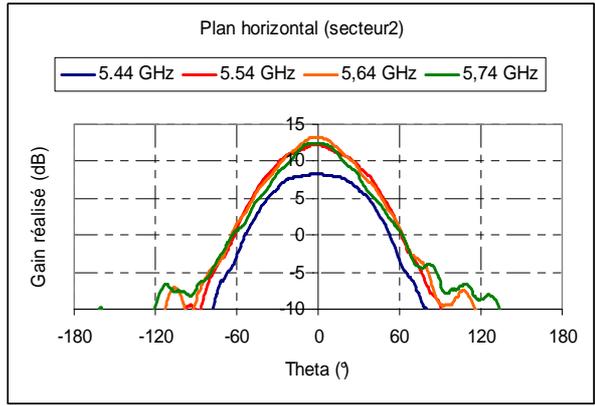
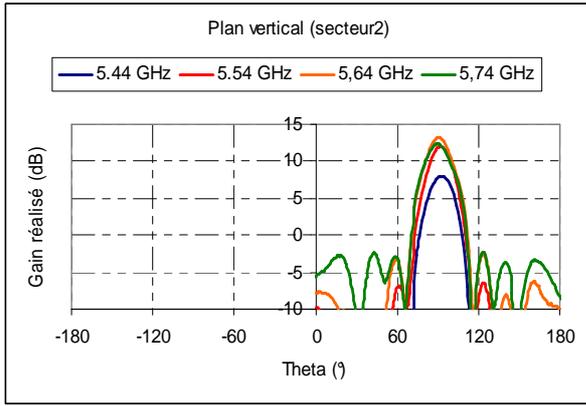


Figure A.2. 1 : Gains réalisés mesurés en fonction de la fréquence des 9 secteurs

L'évolution des diagrammes de rayonnement mesurés dans le plan vertical et horizontal des 9 secteurs en fonction de la fréquence est illustrée sur la Figure A.2. 2.





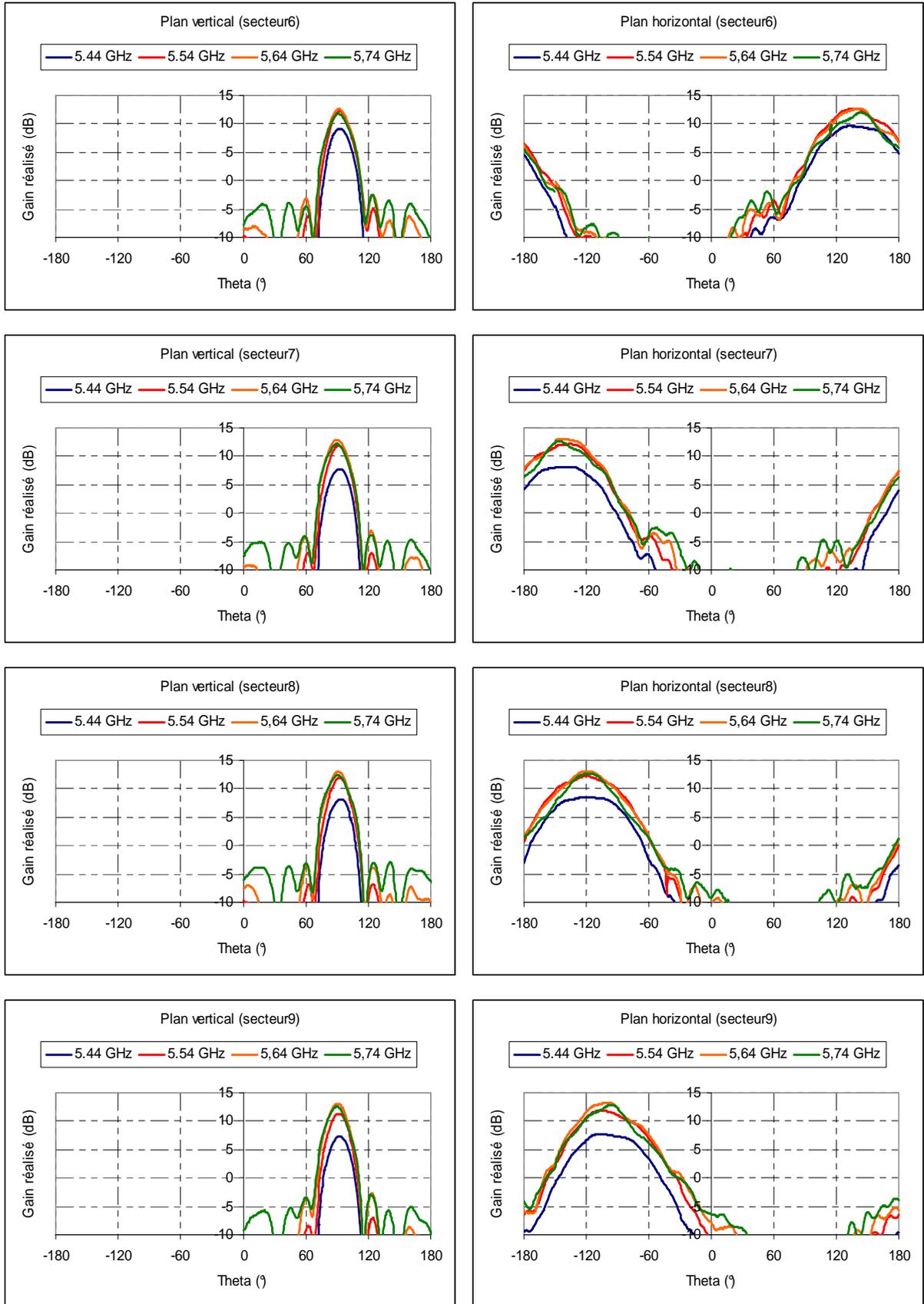


Figure A.2: Evolution des diagrammes de rayonnement mesurés en fonction de la fréquence

ANNEXE III

Etudes des réseaux cylindriques d'antennes

Considérons un réseau cylindrique d'antennes composé de N éléments rayonnants régulièrement espacés tout au long de la périphérie d'un cercle de rayon R (Figure A.3. 1). L'espacement angulaire entre les éléments est $\Delta\phi$. Les éléments sont tous identiques mais ils pointent dans différentes directions. Chacun des éléments possède un diagramme de rayonnement $f(\phi)$ et est alimenté en amplitude et en phase suivant une loi d'illumination défini par un ensemble de nombres complexes : a_0, a_1, \dots, a_{N-1}

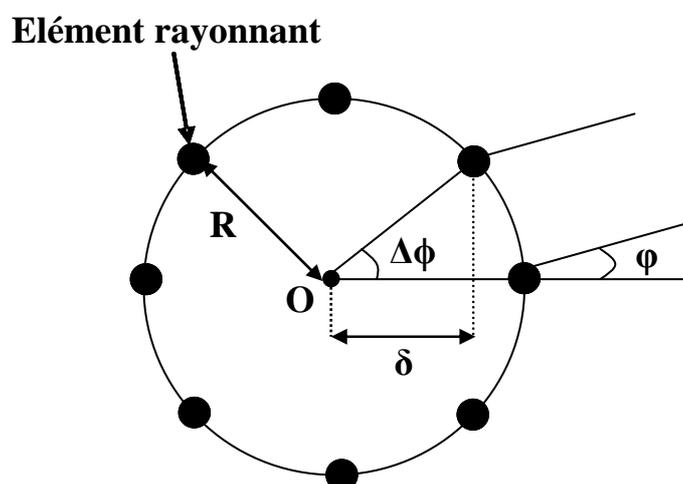


Figure A.3. 1: Exemple d'un réseau cylindrique d'antennes

L'expression du rayonnement dans une direction ϕ est donnée par l'équation suivante [1] :

$$F(\phi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n f(\phi - n\Delta\phi) e^{jkR \cos(\phi - n\Delta\phi)} \quad \text{Equation A.3.1}$$

Où le déphasage « δ » a été référé au centre O du cercle, \mathbf{k} est le vecteur d'onde ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$).

[1] L. JOSEFSSON and P. PERSSON. *Conformal array antenna theory and design*, P.

Dans le cas où le réseau cylindrique n'est pas pondéré en amplitude ni en phase, les nombres qui définissent la loi de l'illumination sont des réels purs ($a_n = 1$). Le diagramme du rayonnement dans le plan horizontal est alors omnidirectionnel. La Figure A.3. 2 montre un exemple d'un réseau cylindrique de 8 dipôles non pondéré avec son diagramme de rayonnement.

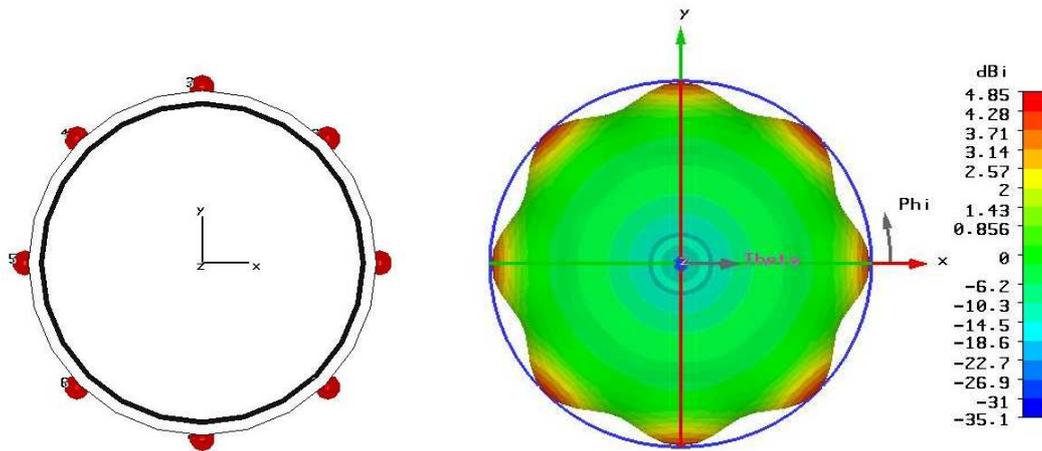


Figure A.3. 2: Réseau cylindrique de 8 dipôles avec le diagramme de rayonnement

Pour un réseau cylindrique d'antennes pondéré en phase, les nombres qui définissent la loi de l'illumination sont des imaginaires purs ($a_n = e^{j\psi_n}$). Ainsi, l'équation A.3.1 devient:

$$F(\varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} f(\varphi - n\Delta\phi) e^{j[kR \cos(\varphi - n\Delta\phi) - \psi_n]} \quad \text{Equation A.3.2}$$

L'équation A.3.3 donne la valeur de ψ_n nécessaire pour focaliser le rayonnement dans une direction φ_0 .

$$\psi_n = kR \cos(\varphi_0 - n\Delta\phi) \quad \text{Equation A.3.3}$$

Nous allons prendre l'exemple précédent et appliquer les phases nécessaires sur les dipôles en se basant sur l'équation A.3.3, dans le but de former le faisceau dans la direction $\varphi_0 = 45^\circ$. La Figure A.3. 3 montre le diagramme de rayonnement quand tous les dipôles sont alimentés avec les phases correspondantes, où nous remarquons un rayonnement arrière

important qui est dû à l'énergie apportée par les dipôles de l'autre côté du cylindre. Si nous n'alimentons que 3 dipôles (Figure A.3. 4), le rayonnement arrière disparaît.

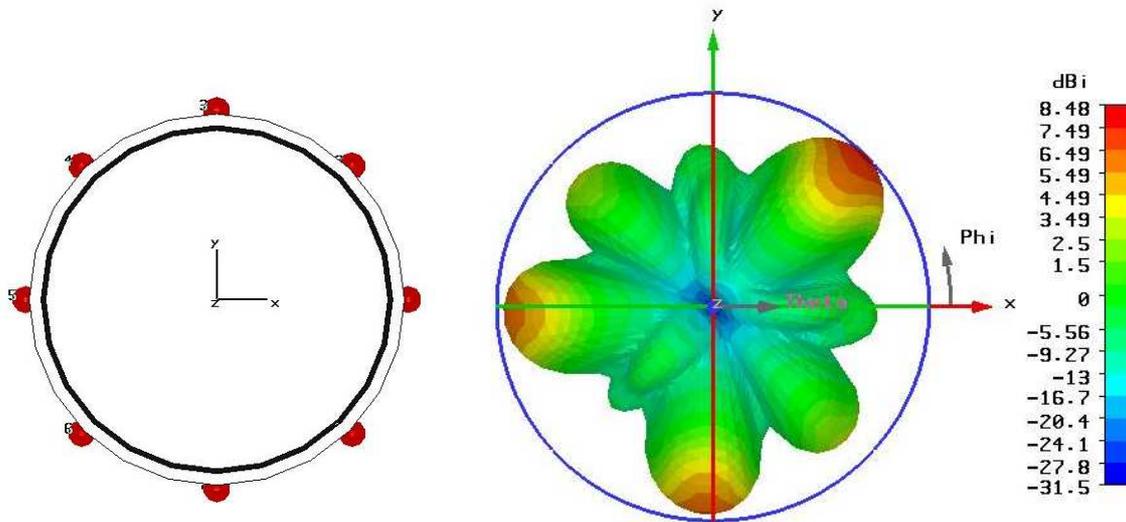


Figure A.3. 3: Diagramme de rayonnement dans le cas où tous les dipôles sont alimentés avec les phases correspondantes

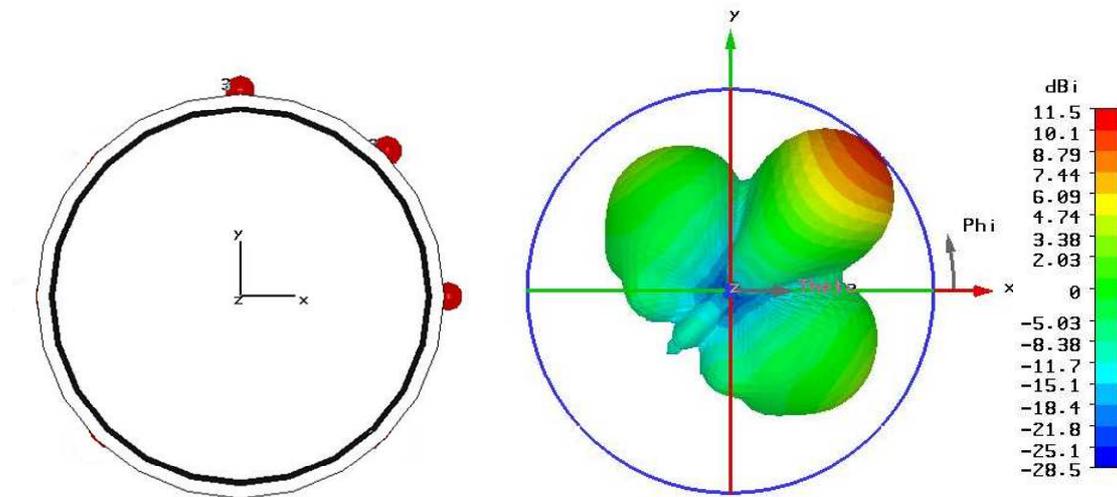


Figure A.3. 4: Diagramme de rayonnement dans le cas où 3 dipôles sont alimentés avec les phases correspondantes

Il faut donc noter que pour chaque rayon de cylindre, nous devons trouver le nombre optimal d'éléments à alimenter pour obtenir les meilleures performances.

Liste des travaux

**PUBLICATIONS DANS UNE REVUE SCIENTIFIQUE
INTERNATIONALE**

H.CHREIM, E.POINTEREAU, B.JECKO, P.DUFRANE

“Omnidirectional electromagnetic band gap antenna for base station applications”

IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.6, 2007.

E.POINTEREAU, H.CHREIM, B.JECKO, P.DUFRANE

“Omnidirectional cylindrical electromagnetic band gap antenna with dual polarization”

IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.6, 2007.

H.CHREIM, B.JECKO, C.DALL’OMO, P.DUFRANE

“Multibeam antenna for telecommunications networks using cylindrical EBG structure”

IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, papier accepté. En cours de publication.

COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

H.CHREIM, B.JECKO, C.DALL’OMO, P.DUFRANE

“Cylindrical EBG multibeam antenna for telecommunication networks”

The third European Conference on Antennas and Propagation (Eucap 2009), Berlin, Germany.

H.CHREIM, E.POINTEREAU, B.JECKO

“4x90° sectoral metallic EBG antenna for high gain omnidirectional coverage”

The second European Conference on Antennas and Propagation (Eucap 2007), Edinburgh, Scotland.

H.CHREIM, E.POINTEREAU, B.JECKO, P.DUFRANE

“Metallic EBG antenna with omnidirectional pattern in azimuth for base station applications”

The first European Conference on Antennas and Propagation (Eucap 2006), Nice, France.

Résumé :

Ce mémoire est consacré à l'étude de nouveaux concepts d'antennes multifaisceaux agiles dans le plan horizontal à base de résonateur BIE permettant d'améliorer la couverture omnidirectionnelle dans ce plan, effectuée par les antennes omnidirectionnelles préexistantes.

Tout d'abord, une méthode de conception de l'antenne BIE coaxiale multifaisceaux, inspiré de l'antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle, a été présentée. Une première antenne BIE coaxiale multifaisceaux agile $4 \times 90^\circ$ a été mise au point.

Le fort couplage entre les sources dans le plan horizontal apparaissant quand le nombre de ces dernières augmente, nous a poussés à étudier un nouveau type d'antenne BIE multifaisceaux : l'antenne BIE multisectorielle. Cette antenne a été étudiée pour plusieurs types d'applications nécessitant des antennes agiles.

Une réalisation d'une antenne BIE multisectorielle a validé notre concept. Un système de commutation à base de commutateur SP6T, assurant l'agilité du prototype fabriqué, a été également présenté.

**STUDY OF EBG MULTIBEAM ACTIVE ANTENNAS.
IMPROVEMENT OF THE OMNIDIRECTIONAL COVERAGE IN THE
AZIMUTH**

Abstract:

This manuscript is dedicated to the study of new concept of EBG multibeam active antennas; in order to ameliorate the omnidirectional coverage achieved by other types of antennas.

First, a design method of coaxial EBG multibeam antenna, based on the omnidirectional coaxial EBG antenna has been submitted. Then, the design of a $4 \times 90^\circ$ coaxial EBG multibeam active antenna has been presented.

The strong coupling between the sources in the horizontal plane appears when their number increases. That is why we began to study a new type of EBG multibeam antenna: the EBG multisectoral antenna. This structure has been studied for several types of applications requiring active antennas.

A prototype fabrication of the EBG multisectoral antenna validated our concept. An SP6T based switching system for the prototype is also presented.

Discipline : "Electronique des Hautes Fréquences, Optoélectronique"

Mots clés :

Bande interdite électromagnétique	Antenne BIE multisectorielle
Antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle	Commutation
Antenne BIE coaxiale sectorielle	Détection de directions d'arrivée
Antenne BIE coaxiale multifaisceaux	Radar

Adresse du laboratoire : XLIM, Département O.S.A., Faculté des Sciences et Techniques
– Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas – 87060 Limoges Cedex