

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE.
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : TELECOMMUNICATIONS
OPTION : SYSTEMES DES
TELECOMMUNICATIONS

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Présenté par

- Mohammed Chikouche Ikram
- Guagui Imane

Intitulé :

***Etude et conception d'une lentille plane de
Rotman pour les réseaux mobiles***

Soutenu devant le jury composé de :

| | | |
|-----|-------------------------------------|------------|
| Dr. | Université Mohamed Boudiaf -M'SILA | Président |
| Dr. | Université Mohamed Boudiaf -M'SILA | Rapporteur |
| Dr. | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Examineur |

Année universitaire : 2019 / 2020.

Remerciements

*Au terme de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur **Mr. Kenane EL Hadi**, pour nous avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans la matière, pour sa disponibilité, sa pédagogie, ses compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet même pendant les moments les plus difficiles. vraiment merci pour une qualité d'encadrement si sérieuse et si consistante ...*

Nous remercions tous les enseignants de département d'Electronique et les personnels administratifs et techniques, qui ont contribué de près ou de loin à notre formation durant ces cinq années.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont soutenus, d'une façon ou d'une autre, nous éprouvons incessamment leur estime et amabilité.

Nous terminons ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de lire et juger ce travail.

Que la paix d'allah soit toujours avec vous !

Dédicace

Nous dédions ce travail à nos chers parents pour leurs sacrifices

Et leurs encouragements durant toutes nos études

A nos frères et nos sœurs

A toute notre grande famille a tout ce qui nous connait

A toutes nos amies

De la promotion du Master

« TELECOMUNICATION » 2019/2020

On ne peut trouver les mots justes et sincères pour vous

Exprimer notre affection et nos pensées, vous êtes pour nous des

Frères, sœurs et des amis sur qu'ont peut compter.

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de

Tous les moments que nous avons passée ensemble,

ont vous dédie

Ce travail et ont vous souhaite une vie pleine de santé et de

Bonheur.

IMANE & IKRAM

RESUME :

Large zone de couverture est l'une des exigences les plus importantes des applications d'antenne, telles que les systèmes radar ou les communications par satellite. La lentille Rotman est un système de formation de faisceau à faible coût qui fournit un grand angle de balayage et il est simple à mettre en œuvre dans la technologie microruban. L'objectif de ce mémoire, est l'étude et la conception d'une lentille plane de Rotman pour les réseaux mobiles, cette lentille a 8 entrées et 8 sorties sur la gamme de fréquence 8-11.2 GHz. Dans ce travail, nous avons présenté en premier temps des différentes techniques d'alimentation des réseaux d'antennes, qui sont connues par la formation de faisceaux. Puis nous avons présenté un état de l'art de la lentille de Rotman, quelques notions de base et quelques approches. Après nous avons présenté une étude analytique et autre paramétrique sur la lentille de Rotman. et finalement, nous avons fait une conception d'une lentille de Rotman avec le simulateur EM (Ansoft HFSS), et nous avons validé le résultat par le simulateur (Remcom, RLD).

Mots-clés : Lentille de Rotman, Formation des faisceaux, Angle de balayage, Technique d'alimentation, Réseaux d'antennes.

Table de matières

Remerciements

Dédicace

Page

Introduction générale

Introduction générale.....02

Chapitre I : Les différentes techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes antennas reconfigurables

| | |
|---|----|
| I.1 Introduction | 05 |
| I.2. Réseaux de formation ... faisceaux(BFN)..... | 05 |
| I.2.1 Réseaux de formation de faisceaux numériques..... | 06 |
| ➤ Les avantages..... | 07 |
| ➤ Les inconvénients..... | 07 |
| I.2.2 Réseaux de formation de faisceaux à commutation..... | 07 |
| ➤ Les avantages..... | 08 |
| ➤ Les inconvénients..... | 08 |
| I.2.2 Réseaux de formation de faisceaux avec des lentilles micro-ondes..... | 08 |
| ➤ Les avantages..... | 08 |
| ➤ Les inconvénients..... | 09 |
| I.3 Quelques répartiteurs à commutation..... | 09 |
| I.3.1 La matrice de Blass..... | 09 |
| I.3.1.1 Définition | 09 |
| I.3.1.2 Principe | 09 |
| ➤ Les avantages..... | 11 |
| ➤ Les inconvénients..... | 11 |
| I.3.1.3 Applications | 11 |
| I.3.2 matrice de Butler | 12 |
| I.3.2.1 Principe | 12 |
| I.3.2.2 les versions de la matrice de Butler | 13 |
| ➤ Les avantages | 14 |
| ➤ Les inconvénients..... | 14 |
| I.3.2.3 Applications..... | 15 |
| I.3.3 Matrice de Nolen..... | 15 |
| I.3.3.1 principe | 15 |
| I.3.4 Lentille de Rotman..... | 16 |
| I.4 conclusion..... | 18 |

Chapitre II: Etat de l'art sur la lentille de Rotman

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction..... | 20 |
| II. 2 Historique de la lentille de Rotman..... | 20 |
| II.3 Quelques modèles de conception d'une lentille de Rotman..... | 27 |

| | |
|---|----|
| II.3.1. modèle conventionnelle de Rotman..... | 27 |
| II.3.2. modèle symétrique de Shelton..... | 28 |
| II.3.3.modèle de Katagi..... | 28 |
| II.3.4. le modèle de Hansen..... | 29 |
| II.3.5. modèle de Gagnon, modifiée par Singhal..... | 29 |
| II.4.Applications de lentilles de Rotman..... | 30 |
| II.5. Conclusion..... | 33 |

Chapitre III : Etude paramétrique de la lentille de Rotman

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction..... | 35 |
| III.2 étude analytique de la lentille de Rotman..... | 35 |
| III.2.1 Le principe de la lentille de Rotman..... | 35 |
| III.2.1.1 Le modèle de la lentille Rotman | 35 |
| III.2.1.1.1 Comparaison entre une lentille non focale par rapport à celle focal..... | 35 |
| III.2.1.2.les caractéristiques de la lentille de Rotman..... | 38 |
| III.2.1.3 L'extraction des paramètres géométriques de la lentille..... | 40 |
| III.3.Etude paramétrique d'une lentille de Rotman..... | 43 |
| III.3.1 Effet de l'angle α sur la géométrie de la lentille de Rotman..... | 44 |
| III.3.2 Effet de paramètre θ sur la géométrie de la lentille de Rotman..... | 44 |
| III.3.3 Effet de paramètre g sur la géométrie de la lentille de Rotman..... | 45 |
| III.4.Conception de la lentille..... | 46 |
| III.4.1Variation de la distance focale (f_1) | 46 |
| III.4.2Variation du nombre de faisceaux ($N_b=3$ et $N_b=6$)..... | 49 |
| III.5 Conclusion..... | 52 |

Chapitre IV : Conception d'une lentille de Rotman imprimée.

| | |
|--|----|
| IV.1 Introduction..... | 54 |
| IV.2 Choix de l'outil de simulation..... | 54 |
| IV.3 Le simulateur Remcom..... | 54 |
| IV.3.1 Introduction..... | 54 |
| IV.3.2 Les produits du logiciel Remcom..... | 55 |
| IV.3.2.1 Solveur XFDTD full-wave..... | 55 |
| IV.3.2.2 Insite sans fil..... | 56 |
| IV.3.2.3 Solveur haute fréquence XGtd..... | 56 |
| IV.3.2.4 Logiciel de simulation de Radar Automobile WaveFarer..... | 57 |
| IV.4 La conception d'une lentille de Rotman avec Remcom..... | 58 |
| IV.5 Simulateur avec HFSS..... | 63 |
| IV.6 Conclusion..... | 67 |

Conclusion générale

| | |
|--------------------------|----|
| Conclusion générale..... | 69 |
|--------------------------|----|

Références

| | |
|-----------------|----|
| Références..... | 72 |
|-----------------|----|

Introduction générale

Introduction générale

Durant ces dernières années, le monde a connu un développement rapide dans le domaine des systèmes de communication. Ce développement nous oblige d'accroître la nécessité d'utiliser des antennes à large zone de couverture, ce qui augmente le coût de l'antenne. Ces antennes à large zone de couverture sont accompagnées par une pollution électromagnétique importante. Par conséquent, le besoin de contrôler la direction du faisceau de ces antennes est devenu beaucoup plus important [1]. Pour répondre à ce besoin, plusieurs techniques d'alimentation ont été développées pour contrôler la direction des faisceaux. Parmi ces techniques, on peut citer : la matrice de Butler, matrice de Blass, matrice de Nolen... [2] [3], mais ces systèmes étaient coûteux et complexes et avaient dans certains cas des performances faibles.

Cependant, la lentille de Rotman était développée pour obtenir un circuit d'alimentation d'un réseau d'antennes à faible coût, conception simple et une bonne performance, ce qui peut offrir une solution efficace. Ce dispositif de formation de faisceau est utilisé pour former les faisceaux d'un réseau d'antennes par le déphasage électronique dans différentes directions (avec un saut de phase). La géométrie de la lentille est constituée d'un arc interne qui guide l'énergie vers les éléments rayonnants (réseau d'antennes) à travers l'arc récepteur et les lignes de transmission [3-4].

Les avantages de la lentille de Rotman incluent construction monolithique, facilité de fabrication, faible coût, légèreté et disponibilité simultanée de nombreux faisceaux. Ces avantages et des autres rendent la lentille de Rotman très utilisée dans les systèmes radar pour détecter les cibles dans plusieurs directions en raison de sa capacité multifaisceaux sans faire un balayage mécanique du réseau d'antennes [5]. De nombreuses applications dépendent de la lentille de Rotman comme les systèmes d'imagerie, les systèmes d'alarme pour éviter les collisions entre les voitures (5G-connected vehicles). De même, la lentille de Rotman fournit une liaison de communication de haute performance pour le système de communication peer to peer (P2P) [6].

Dans notre mémoire, on va étudier analytiquement la lentille de Rotman afin de comprendre le principe de fonctionnement et le comportement de cette lentille. Cette étude analytique sera suivie par une étude paramétrique approfondie en utilisant le Matlab, ce qui nous permet de bien comprendre l'effet de chaque paramètre de la lentille de Rotman sur ses

caractéristiques.

L'objectif principal de ce travail, est l'étude analytique et paramétrique d'une lentille de Rotman avec Matlab, et puis voir une conception avec HFSS et validation avec Remcom pour une lentille de configuration 8X8, avec six (06) ports factices, sur la gamme 8-11.2 GHz, où la fréquence opérationnelle est de 9.6 GHz.

Le présent mémoire est organisé comme suit:

Dans le premier chapitre, on va discuter les différentes techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes avec ses principes de fonctionnement et ses applications.

Dans le deuxième chapitre, on va voir un état de l'art sur la lentille de Rotman, quelques notions de base, et quelques approches. Après, on va voir quelques modèles réels de la lentille avec leurs spécifications et caractéristiques. On termine ce chapitre par quelques applications de la lentille de Rotman.

Le troisième chapitre, est consacré particulièrement à une étude analytique et paramétrique de la lentille de Rotman avec en utilisant Matlab.

Dans le quatrième chapitre, on va utiliser le simulateur EM (Ansoft HFSS) pour faire la conception d'une lentille de Rotman et on va valider le résultat trouvé avec le simulateur (Remcom) pour une lentille de configuration 8X8 sur la gamme 8-11.2 GHz (fréquence opérationnelle 9.6 GHz), Ce que nous permet d'obtenir la conception finale de la lentille de Rotman.

A la fin, on termine par une conclusion générale et quelques perspectives aux futurs travaux.

Chapitre 1 : Les différentes techniques d'alimentation des antennes

I.1 Introduction

Avec le développement rapide dans le domaine des systèmes de communication, le besoin de contrôler la direction du faisceau des antennes à grande zone de couverture est devenu beaucoup plus important. Pour répondre à ce besoin, plusieurs techniques d'alimentation essaient d'améliorer pour obtenir une répartition spatiale des faisceaux parfaite, en cherchant un circuit d'alimentation à une large capacité de balayage, faible coût et simple conception.

Parmi les circuits d'alimentation les plus répandus, on peut citer la matrice de Butler, la matrice de Blass, la matrice de Nolen et la lentille de Rotman. Dans notre travail, on s'intéresse par la lentille de Rotman à cause de plusieurs caractéristiques favorables. Avant d'aborder dans le contexte de la lentille de Rotman, on va voir, dans ce premier chapitre, une présentation des différentes techniques d'alimentation des réseaux d'antennes. Ces techniques sont connues par la formation de faisceaux.

I.2. Réseaux de formation de faisceaux (BFN)

Les systèmes des réseaux d'antennes, capables de produire plusieurs faisceaux, ont de nombreuses applications dans les systèmes de communication par satellite, militaire et de radar. Dans ces systèmes, la phase et l'amplitude de chaque élément du réseau peut être contrôlée en utilisant soit des circuits contrôlables collectivement appelés réseau de formation de faisceaux (BFN) soit en utilisant un processeur DSP.

Généralement, les circuits de beamforming (les répartiteurs de faisceaux) BFN peuvent être classés en deux groupes: Réseaux de formation de faisceaux de circuits (CBFN) et les réseaux de formation de faisceaux quasi-optique (QBFN). Dans les CBFN, l'angle du faisceau et la largeur du faisceau dépendent de la fréquence alors que dans les QBFN les faisceaux sont indépendants de la fréquence, ce qui permet d'atteindre une couverture à large bande. Ces deux classes de formateurs de faisceaux sont illustrées dans la figure suivante.

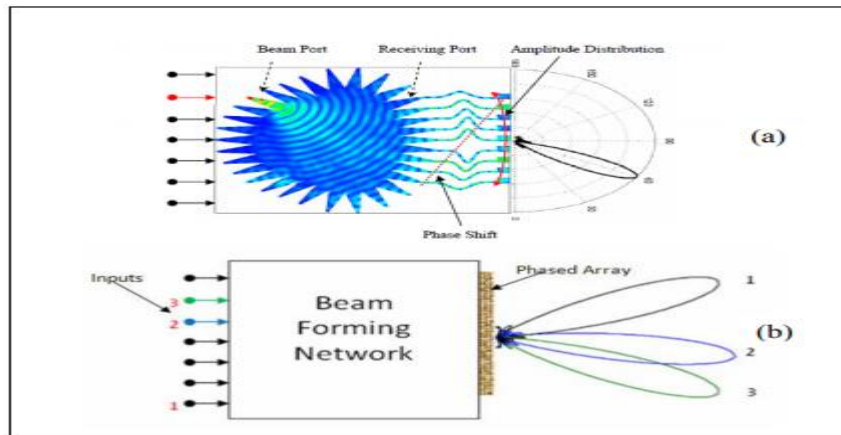


Figure I.1 : Réseau de formation de faisceaux quasi-optique en (a) et de circuits en(b) [7].

Les répartiteurs BFN peuvent être classés selon le nombre des faisceaux formés sur un seul port ou plusieurs ports. Il existe plusieurs façons de concevoir un réseau de formation de faisceau tels que: BFN numériques, BFN réseau et BFN de lentilles micro-ondes. Méthodes numériques et réseau sont un réseau de formation de faisceaux de circuits (CBFN)et une méthode de lentille micro-ondes est un réseau de formation de faisceaux quasi-optique (QBFN)[7].

I.2.1 Réseaux de formation de faisceaux numériques

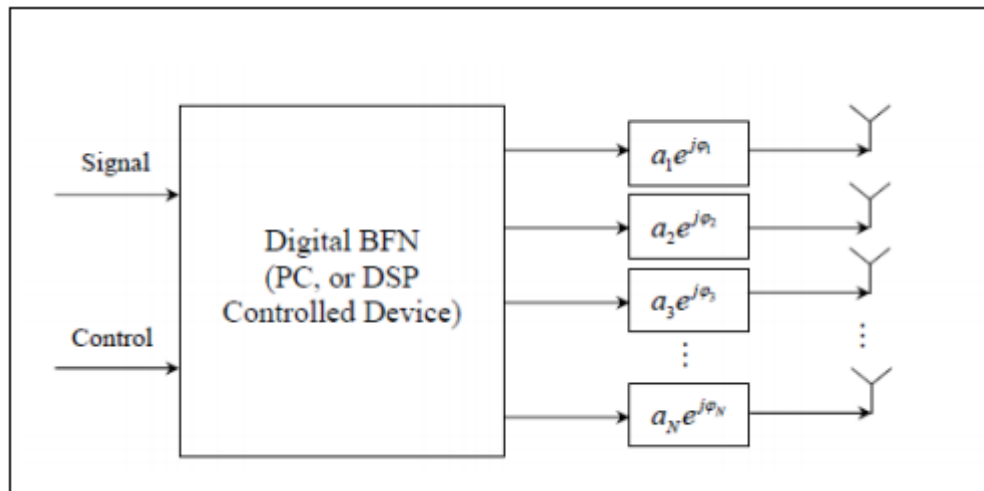


Figure I.2 : Réseau de formation de faisceaux numériques [7].

Les réseaux de formation de faisceaux numériques, comme celui illustré dans la Figure I.2, ils utilisent un ordinateur ou un DSP pour contrôler les poids d'alimentation (amplitude et/ou la phase) des différents éléments dans le réseau d'antennes. Cette opération permet d'orienter le lobe principal vers la direction privilégié et les zéros vers les directions inutiles.

- **Les avantages**

L'avantage primordial de cette technique est l'adaptabilité aux besoins de l'environnement. Elle a une grande précision dans l'orientation du lobe principal (balayage électronique avec une erreur de phase très réduite). De même, elle présente une grande flexibilité dans la variation d'amplitude ce qui permet d'obtenir un nombre infini des phases de balayage.

- **Les inconvénients**

Comme tous les autres systèmes, les répartiteurs numériques sont limités aux basses fréquences en raison de la faible bande passante des appareils A/N [5]. Ils nécessitent des processeurs rapides pour répondre aux besoins de l'environnement [8].

I.2.2 Réseaux de formation de faisceaux à commutation

Il existe deux types de beamforming: beamforming à poids fixe et beamforming adaptatif. Pour les systèmes à commutation de faisceaux (switched beam : matrice de Butler [15], matrice de Blass, lentille de Rotman,...), un certain nombre de faisceaux fixes est utilisé sur le site d'antenne, où le récepteur va sélectionner le faisceau qui contient le maximum d'intensité du signal utile et réduit les interférences. Bien que les systèmes adaptatifs soient plus performants, les systèmes à commutation de faisceaux soient très simples et faciles à moderniser.

Ces répartiteurs à commutation utilisent des composants micro-ondes passifs tels que les diviseurs, les coupleurs, les jonctions hybrides et les déphaseurs, comme le cas la matrice de Butler. Cette matrice est utilisée pour assurer l'alimentation d'un réseau d'antennes (Figure I.3) [8,9].

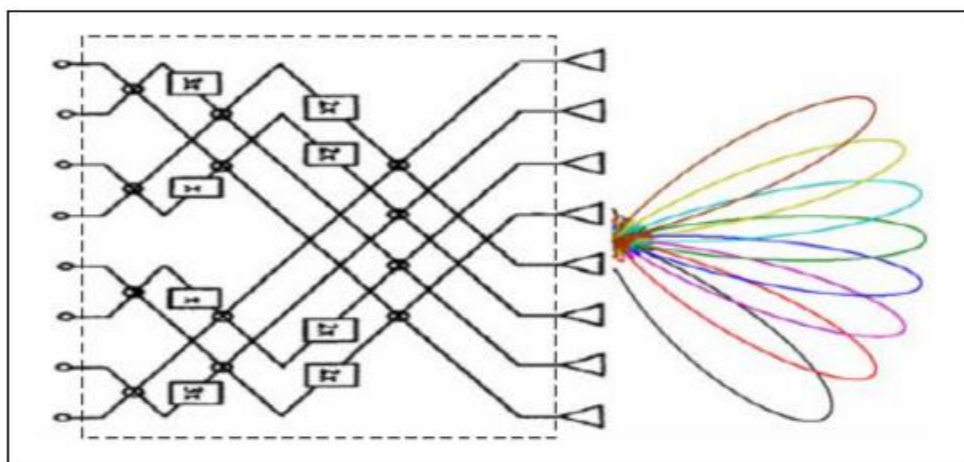


Figure I.3 : Répartiteur à commutation avec la matrice de Butler.

- **Les avantages**

Ils sont qu'elle est facile à construire et peuvent être mis en œuvre à l'aide des circuits imprimés PCB [5]. De même, elle est facile à intégrer dans les différents systèmes de communications.

- **Les inconvénients**

Ce répartiteur à commutation nécessite des croisements sur les lignes. Le décalage du faisceau se produit lorsque la fréquence varie, ce qui n'est pas souhaitable dans la plupart des systèmes de communication, car certaines informations devraient être envoyées au même endroit [5].

I.2.3 Réseaux de formation de faisceaux avec des lentilles micro-ondes

Le répartiteur à une lentille micro-onde est un autre type de réseaux de formation de faisceau qui utilise un mécanisme de retard de trajet pour former le déphasage souhaité au réseau d'antennes. Un schéma général de ce répartiteur est montré dans la Figure I.4. C'est un dispositif à temps de retard réel TTD (True Time Delay), ce qui rend possible le balayage des lobes d'une manière indépendante de la fréquence [5].

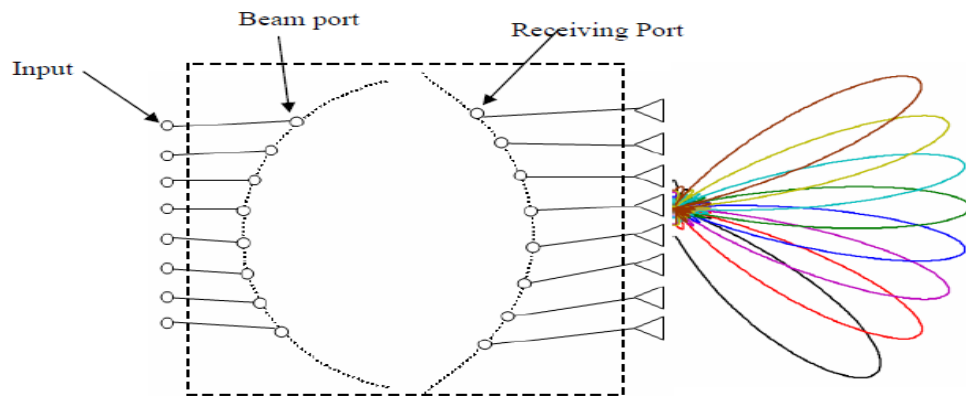


Figure I.4 : Lentille micro-onde BFN [7].

- **Les avantages**

Le mécanisme de conception de la longueur du trajet dans la lentille micro-onde est indépendant de la fréquence [10], ce répartiteur permet un balayage angulaire important sur une large bande de fréquences avec une faible erreur de phase. De même, il est considéré comme un dispositif à une mise en forme de faisceaux par un vrai délai temporel [11]. On peut concevoir ce répartiteur pour aboutir le faisceau désiré correctement, en optimisant les positions des ports de réception, la longueur de la ligne de transmission, le déphasage et les distributions d'amplitude au niveau d'entrée du réseau d'antennes [5].

- **Les inconvénients**

Des pertes d'insertion finies et des pertes inhérentes se produisent en raison des coupleurs hybrides, des déphaseurs fixes et des lignes de transmission qui composent la lentille.

I.3 Quelques répartiteurs à commutation

I.3.1 La matrice de Blass

I.3.1.1 Définition

La matrice de Blass est une matrice à multiples faisceaux, elle utilise N ligne de transmission prolongées d'un réseau d'antennes (lignes verticales dans la Figure I.5) croisant M lignes prolongées des ports d'entrée (lignes horizontales dans la Figure I.5). Le croisement entre les lignes se fait à l'aide des coupleurs [12].

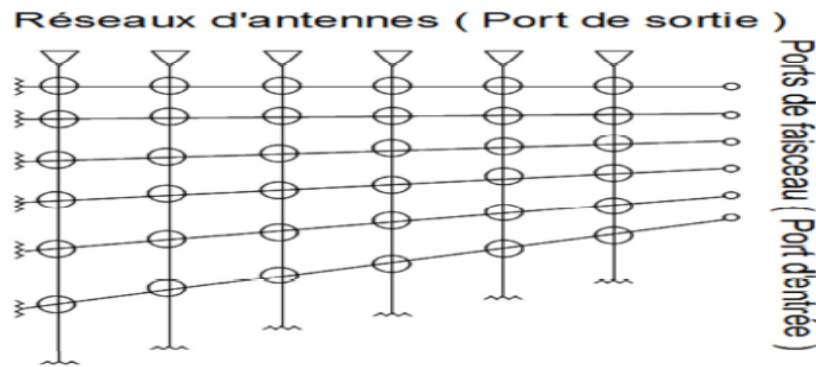


Figure I.5 : Matrice de Blass[12].

I.3.1.2 Principe

Avant de décrire la matrice de Blass, on commence par la description de ses composants de base fondamentale. Il s'agit de composants passifs et sans pertes possédant 4 ports: deux entrées et deux sorties. Ces composants sont généralement appelés **coupleurs directionnels** et peuvent être représentés par le schéma fonctionnel de la Figure I.6. Sur cette figure, les ports 1 et 4 sont les entrées, tandis que les ports 2 et 3 sont les sorties [13].

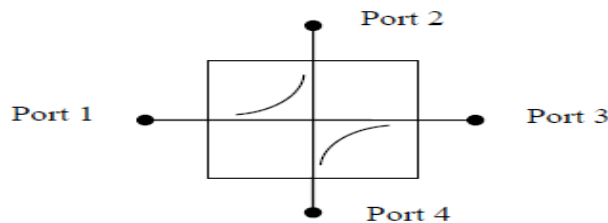


Figure I.6 : Schéma fonctionnel d'un coupleur directionnel [13].

La matrice de Blass est un dispositif microonde de configuration $M \times N$. Elle alimente N éléments rayonnants afin de générer, simultanément, M faisceaux presque orthogonaux, placés dans des directions arbitraires. Cette matrice utilise des lignes de transmission croisées et reliées, à chaque intersection, par des coupleurs directionnels (Figure I.7). Les signaux appliqués aux M ports d'entrée se propagent le long des lignes d'alimentation correspondantes qui se terminent sur des charges adaptées afin d'éviter les réflexions des signaux. À chaque croisement, une partie du signal de la ligne est transmise à la colonne correspondante pour exciter l'élément rayonnant. Les directions des faisceaux sont déterminées par la longueur entre l'entrée et l'élément rayonnant, tandis que la puissance rayonnée est commandée par les coefficients de réflexion S .

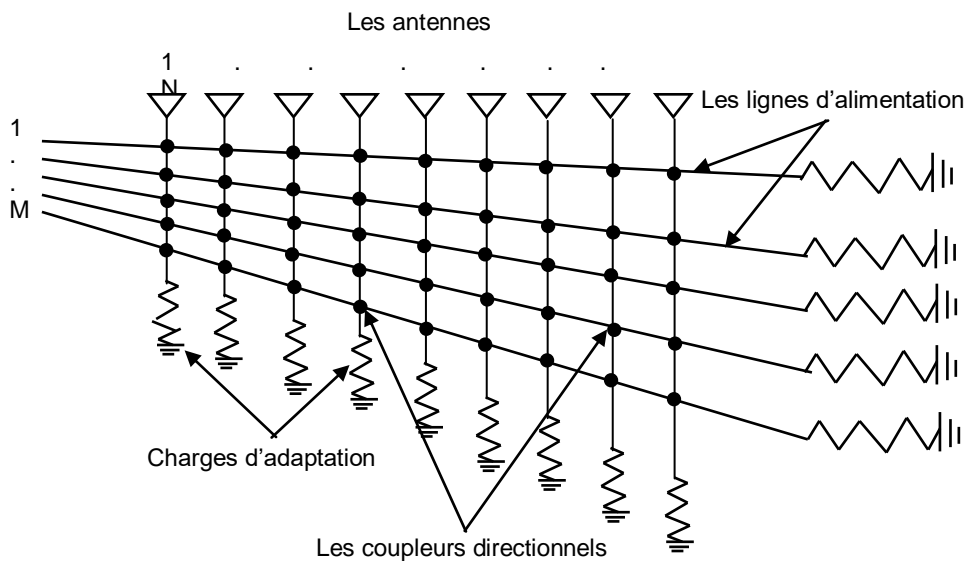


Figure I.7 : Matrice de Blass.

Les coupleurs déterminent la distribution en amplitude du réseau d'antennes et par conséquent le niveau des lobes secondaires des diagrammes de rayonnement. Dans la ligne transverse, entre deux coupleurs directionnels, se situe un déphaseur ou un ajusteur de longueur de ligne communiquant le changement de phase nécessaire à la création du gradient de phase entre chaque port de sortie. Ces coupleurs et longueurs de ligne permettent de fournir les excitations aux ports de sorties spécifiés [16]. Même si la matrice possède une grande souplesse pour la pondération de ses éléments rayonnants, le nombre de composants mis à sa disposition est conséquent. Sa topologie a donc évolué pour arriver à une architecture avec moins de composants, mais disposant de moins de degrés de liberté au niveau des pondérations (Figure I.7) [14].

Quelques conditions concernant la topologie de la matrice de Blass :

➤ **Matrice de base**

- Coupleurs directionnels : $M * N$
- Déphaseurs : $M * (N - 1)$

➤ **Matrice à alimentation centrée**

- Coupleurs : $\frac{N^2}{4} \text{ si } M \geq \frac{N}{2}$

$$M * (N - 1) \text{ si } M < \frac{N}{2}$$

- Déphaseurs : $\frac{N^2}{4} \text{ si } M \geq \frac{N}{2}$

$$M * (N - 1) \text{ si } M < \frac{N}{2}$$

➤ **Les avantages**

La matrice de Blass présente plusieurs avantages telles que

- Pour un réseau très grand, la disposition d'intercommunication du circuit est simple car il n'y a pas décroisements.
- Les faisceaux formés peuvent être produits en commandant les rapports de couplage des coupleurs directionnels (la pondération en amplitude est possible pour chaque faisceau).
- Le temps de retard assure une certaine constance des faisceaux avec la fréquence [14].

• **Les inconvénients**

Bien que la matrice de Blass présente plusieurs avantages, son inconvénient majeur réside dans :

- Sa complexité de conception, où cette conception devient complexe avec un nombre d'éléments de réseau et/ou d'entrée important car, pour chaque port d'entrée de la matrice, les coupleurs directionnels diffèrent, leurs coefficients de couplage varient.
- Le nombre de coupleurs devient important, ce qui implique un plus de coût en matériel et en poids.
- Plus le nombre de faisceaux augmente, plus l'interaction entre les différentes lignes transverses est grande, ce qui rend les réseaux beaucoup plus difficiles à concevoir [14].

I.3.1.3 Applications

Malgré que le guide d'ondes est plus coûteuse et le poids du circuit représente souvent une contrainte, la technologie guide d'ondes est préféré à la technologie micro-ruban parce qu'elle

introduit de faibles pertes. Par exemple nous pouvons trouver cette technologie (une matrice de Blass qui a été développée en utilisant la technologie des guides d'ondes) dans les applications Radar à 16 GHz. Comme nous le montrons dans la Figure I.8[12].

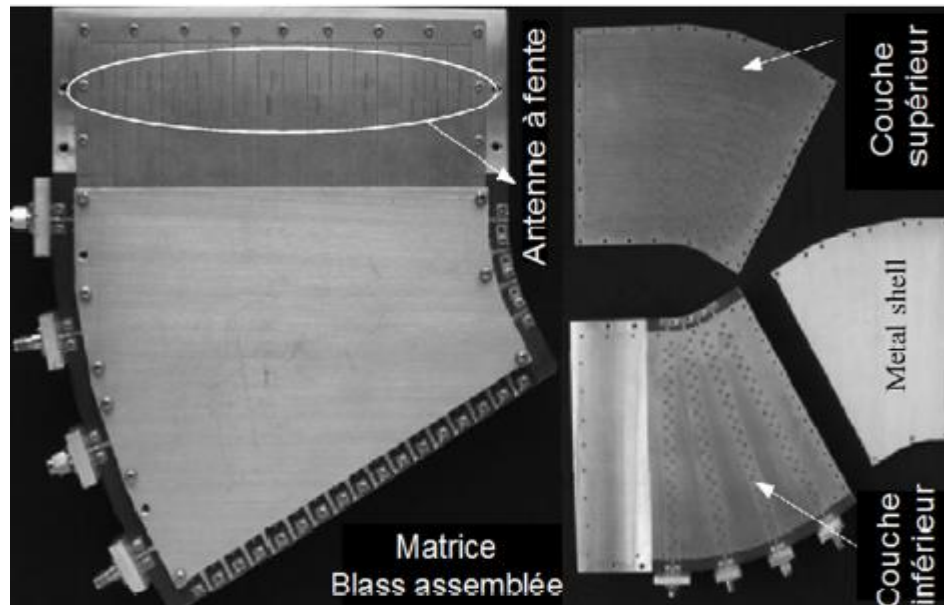


Figure I.8 : Matrice de Blass en guide d'onde pour les applications Radar[16].

I.3.2 matrice de Butler

La matrice de Butler qui est très utilisée à cause de sa facilité de fabrication et son faible coût, est un procédé d'alimentation d'un réseau d'antennes. Elle nécessite N ports d'entrée (faisceaux), N ports de sortie (antennes), $(N/2) \log_2 N$ coupleurs hybrides, et $(N/2) \log_2 (N-1)$ déphaseurs fixes pour former le réseau $N \times N$ [12].

I.3.2.1 Principe

La matrice de Butler à N ports produit N faisceaux, ou reçoit des signaux à partir des lobes orientés vers des directions θ_i , pour un réseau unidimensionnel avec un espacement inter-élément d . Elle est considérée comme une technique de répartition de faisceaux analogiques qui permet de créer des faisceaux fixes, en utilisant des circuits micro-ondes passifs tels que des déphaseurs, coupleurs et des croisements. Généralement, elle est symétrique et composée de N entrées et N sorties afin d'assurer l'alimentation d'un réseau de N antennes, pour produire N faisceaux orthogonaux. Les pondérations en sortie sont données par :

$$B_{mn} = \frac{e^{j \left\{ \frac{[n - \frac{(N+1)}{2}] [m - \frac{(N+1)}{2}] 2\pi}{N} \right\}}}{\sqrt{N}}$$

Où B_{mn} représente l'amplitude du champ du $n^{\text{ième}}$ élément rayonnant, lorsque le port m (dans

le sens des faisceaux de droite à gauche) est activé par un signal d'amplitude unitaire et de phase nulle. N est le nombre d'éléments rayonnants.

De même, la matrice de Butler peut être utilisée pour l'estimation de la direction d'arrivée (DDA). La Figure I.9 résume le principe de fonctionnement de la matrice comme un système de beamforming.

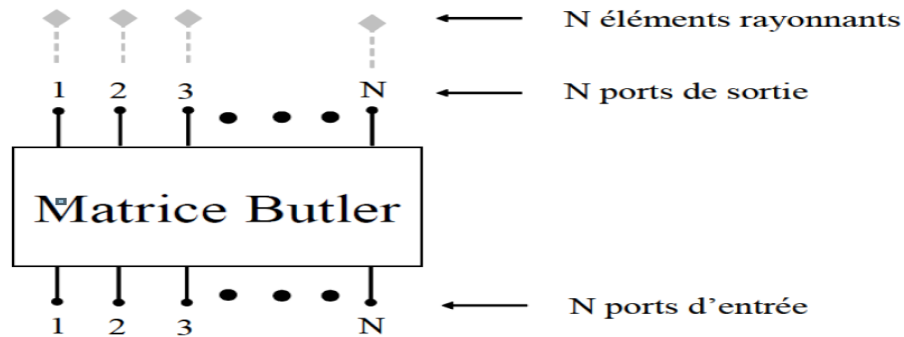


Figure I.9 : Schéma système d'une matrice de Butler[14]

Une matrice est constituée de plusieurs étages de coupleurs hybrides. Chaque coupleur qui la compose, s'il est équilibré, divisera le signal d'entrée en deux, si on considère que nous avons un nombre "n" d'étage de coupleurs et que nous voulons obtenir une distribution de signal uniforme en amplitude, nous aurons 2^n sorties par entrée. Le nombre de sorties sera égale au nombre d'entrées, c'est à dire 2^n et ceci à cause de la symétrie des coupleurs directionnels [12].

En structure planaire, une matrice Butler est constituée des éléments suivants:

- Coupleur hybrides
- Déphaseurs
- Croisement.

I.3.2.2 les versions de la matrice de Butler

- La matrice symétrique : est une matrice dont le nombre de port d'entrée/sortie par une puissance de 2^n est appelée matrice binaire, les coupleurs hybrides utilisés sont de type 90° et les faisceaux générés sont alors de part et d'autre par rapport à la normale de l'axe du réseau Figure I.10(b).
- La matrice asymétrique : possède un nombre impair de ports d'entrée/sortie et peuvent être 3x3, 5x5, 7x7 etc. les coupleurs 180° sont utilisés, et un faisceau supplémentaire sur la normal de l'axe du réseau est créé en plus des mêmes faisceaux qui sont créé par la version symétrique. Les deux versions sont montrées dans la Figure I.10[12].

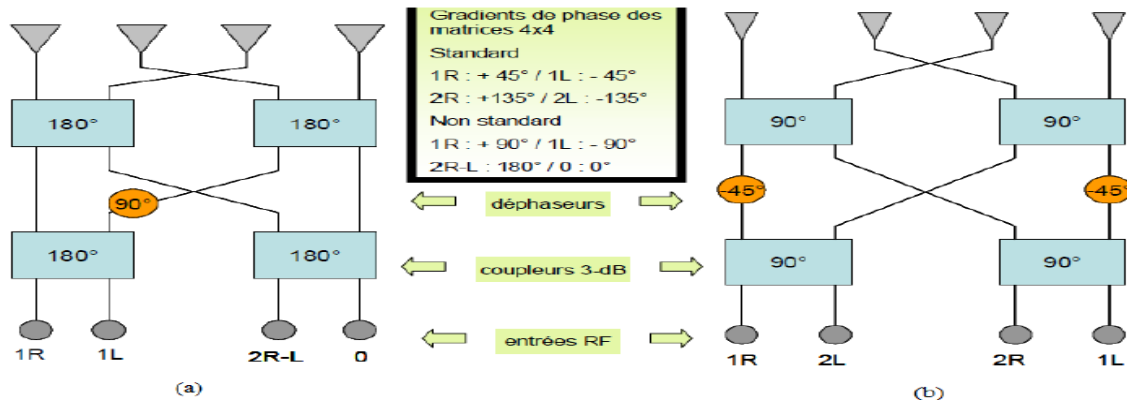


Figure I.10 : Schématisation des matrices de Butler 4x4 : (a) matrice asymétrique.
 (b) matrice symétrique. [14]

➤ Les avantages

La matrice de Butler possède de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- Un réseau simple employant peu de types de composants (des coupleurs et des déphaseurs fixes), qui est facilement mis en œuvre par l'utilisation des lignes micro-rubans.
- La conception de grandes matrices est assez facile puisque les déphaseurs sont placés symétriquement par rapport à la ligne de phase.
- Les faisceaux produits ont une largeur étroite et une bonne directivité.
- La matrice idéale de Butler est l'équivalent analogique de la transformée discrète de Fourier, elle a un nombre minimum de composants et une longueur de chemin minimale parmi tous les réseaux de formation de faisceaux à excitation uniforme.
- La matrice a un niveau presque constant de croisement de faisceaux qui ne change pas avec la fréquence.
- Elle réalise le balayage électronique dans l'espace sans faire un mouvement mécanique.
- Elle est théoriquement "sans perte" puisque les pertes d'insertions minimales dans les coupleurs, les déphaseurs et les lignes de transmissions utilisées ne rendent pas le système impraticable.

➤ Les inconvénients

Toutefois, la matrice de Butler n'est pas un circuit d'alimentation parfait, elle a les inconvénients suivants :

- La largeur de faisceau et la direction de balayage sera changée avec la fréquence.

- L'interconnexion est assez complexe pour une grande matrice (beaucoup de croisements, par exemple plus de 16 croisements sont nécessaires pour une matrice 8*8).
- Le nombre de composants est grand quand le nombre d'éléments du réseau d'antennes est grand [14].

I.3.2.3 Applications

La matrice de Butler est utilisée dans plusieurs domaines de la vie. Parmi ces domaines, on peut citer :

1. Dans les télécommunications satellitaires telles que la téléphonie satellitaire (INMARSAT).
2. Dans les communications sans fil de type LANs ou ATMs monté sur des PDA (Personal Digital Assistant) à une fréquence de 19 GHz.
3. Dans la téléphonie mobile où les matrices de Butler offrent un bon compromis au niveau des couvertures et du nombre de faisceaux.
4. Dans des environnements de propagation hostiles (les mines souterraines), l'utilisation de la matrice de Butler dans les systèmes d'antennes à faisceaux commutés permet de limiter les pertes de rayonnement inutiles et de focaliser la puissance rayonnée dans les directions d'intérêts et par la suite d'éviter le phénomène multi-trajets [17].

I.3.3 Matrice de Nolen

La matrice de Nolen est une matrice orthogonale, elles auraient été décrites pour la première fois dans le rapport de thèse de Nolen publié en 1965 [14] nous tenons à mentionner que peu de littérature traite de cette matrice du fait qu'elle a la réputation d'être difficile à dimensionner. [12]

I.3.3.1 principe

La matrice de Nolen peut être considérée comme un cas particulier de la matrice de Blass. Où, N antennes sont couplées avec M ports de faisceau. De même que la matrice de Blass, la matrice de Nolen peut alimenter un nombre d'antennes différent du nombre de faisceaux. Généralement, cette matrice est constituée de deux types de composants (coupleur et déphaseur) et ne montre pas des croisements. Chaque nœud, dans la matrice, est constitué d'un coupleur directionnel de paramètre θ_{ij} et d'un déphaseur de paramètre φ_{ij} .

Comme nous le montrons dans la Figure I.11, La matrice de Nolen est constituée d'un ensemble de voies RF reliées aux ports d'entrée croisant un ensemble de voies RF reliées aux ports de sorties. Ce schéma montre que le nombre de composants par voie RF est plus important.

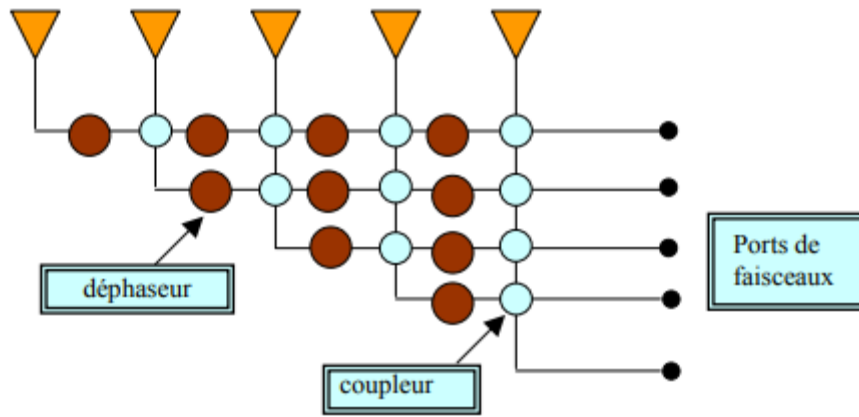


Figure I.11 : Schéma de la matrice de Nolen [18].

I.3.4 Lentille de Rotman

La Lentille de Rotman est appelée aussi lentille de Rotman-Turner. C'est un dispositif hyperfréquence passif qui permet d'alimenter un réseaux d'antennes afin de former de faisceaux. Ce circuit a été inventé en 1962 par Walter Rotman, dans les laboratoires de recherche américaine (*Air Force Cambridge Research Laboratories*), aux Etats-Unis. Ce circuit est très souvent utilisé dans les systèmes radar qui utilisent le balayage électronique [19].

La conception de la lentille de Rotman est basée sur l'optique géométrique, où la lentille possède une cavité dans laquelle l'onde sera guidée dans un chemin pour aller d'un port d'entrée vers des ports de sortie. Lorsqu'un des ports d'entrée est excité, une distribution d'amplitude est produite aux ports de sortie avec un déphasage constant. Ce déphasage est créé grâce au retard de temps (*time delay*) causé par la différence de distance parcourue entre le port d'entrée et les différents ports de sortie. Ainsi ce déphasage permet de générer plusieurs faisceaux. Pratiquement, la lentille de Rotman est un circuit permettant d'agir sur plusieurs paramètres avec une conception d'une grande liberté.

Parmi les caractéristiques importantes de la lentille de Rotman, on peut citer

- Sa stabilité en fréquence.
- Elle permet la création de plusieurs faisceaux simultanément ce qui augmente la couverture

De même que les autres circuits, la lentille de Rotman présente également quelques inconvénients tels que :

- Le couplage mutuel entre les ports. Pour le réduire, le concepteur doit prêter une attention particulière à sa géométrie. A ceci s'ajoute la limitation du choix de la direction des faisceaux et l'incapacité de créer des faisceaux orthogonaux.

- Un autre inconvénient majeur de cette lentille est l'incapacité de produire un balayage fin parce qu'elle ne produit que des faisceaux dans des directions bien distinctes à cause de la disposition des ports d'entrée.

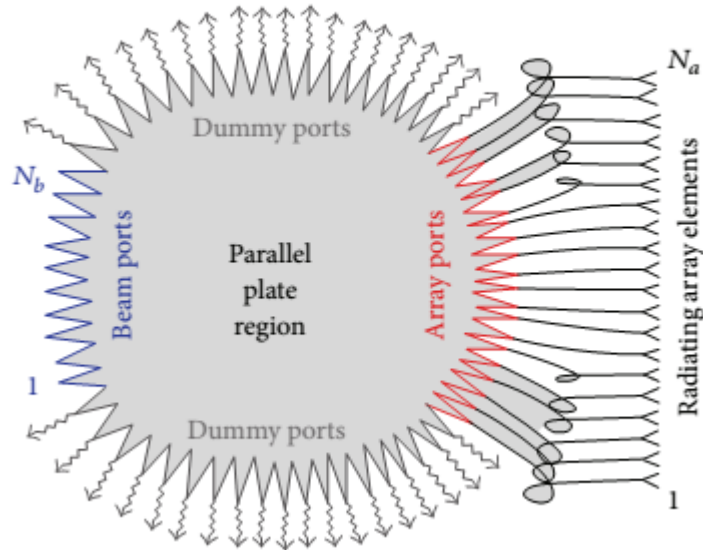


Figure I.12 : Schéma de base d'une lentille de Rotman [5].

La lentille de Rotman a été utilisée dans plusieurs applications militaire et civile [20,21]. La Figure I.13 montre une lentille fabriquée en utilisant la technologie de circuit imprimé pour produire huit faisceaux rayonnés par un réseau d'antennes linéaire. Dans certains cas, la lentille de Rotman est fabriquée en technologie guide d'onde.

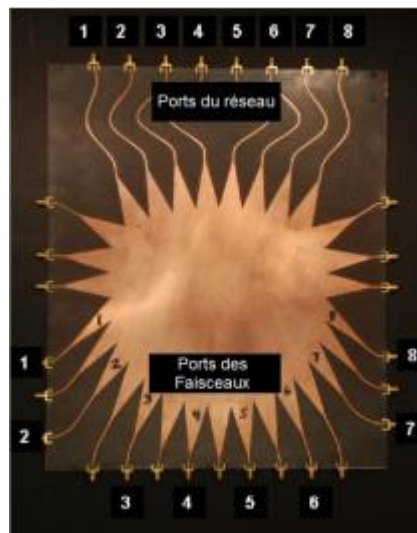


Figure I.13 : Lentille de Rotman réalisée en circuit imprimé [22].

I.4 conclusion

Ce premier chapitre a abordé les différentes techniques d'alimentation des réseaux d'antennes avec ses principes et ses applications. Nous pouvons dire que la matrice de Butler peut produire un nombre plus important de faisceaux de grande qualité avec un peu de composants en comparaison avec les autres matrices (Nolen et Blass). Malgré ces nombreux avantages, elle reste toujours coûteuse, complexe et peu performante. Pour cela, on peut dire que la lentille de Rotman est une technique d'alimentation alternative qui peut offrir une solution efficace et balayage électronique dans les systèmes à formation de lobes (BFN). Le chapitre suivant abordera en plus de détail sur les composants et les propriétés de la lentille de Rotman.

*Chapitre 02 :
Etat de l'art
sur la lentille
de Rotman*

II.1. Introduction

La lentille Rotman est le dispositif séduisant utilisé dans de nombreux circuits, notamment dans les réseaux d'antennes. Cette lentille est généralement utilisée dans les systèmes radar pour détecter les cibles dans plusieurs directions en raison de sa capacité multifaisceaux sans faire un balayage mécanique du réseau d'antennes [5]. Les avantages de la lentille Rotman incluent construction monolithique, facilité de fabrication, faible coût, légèreté et disponibilité simultanée de nombreuses faisceaux. Ce chapitre présente un état de l'art de la lentille de Rotman, quelques notions de base, et quelques approches. Après, on va voir quelques modèles réels de la lentille avec leurs spécifications et caractéristiques. On termine ce chapitre par quelques applications de la lentille de Rotman.

II.2. Historique de la lentille de Rotman

La première lentille Rotman a été introduite par Rotman et Turner dans les années 1960. La lentille a été conçue, principalement, avec trois points focaux. Des améliorations sont enregistrées pour réduire l'erreur de phase. Pour la générer le contour intérieur C_1 , sa géométrie est basée sur les équations générales de Gent [23]. Le modèle expérimental utilisait un guide d'onde à plaques parallèles avec les ports d'entrées et les ports du réseau d'antennes qui sont distribués à la périphérie des contours opposés.

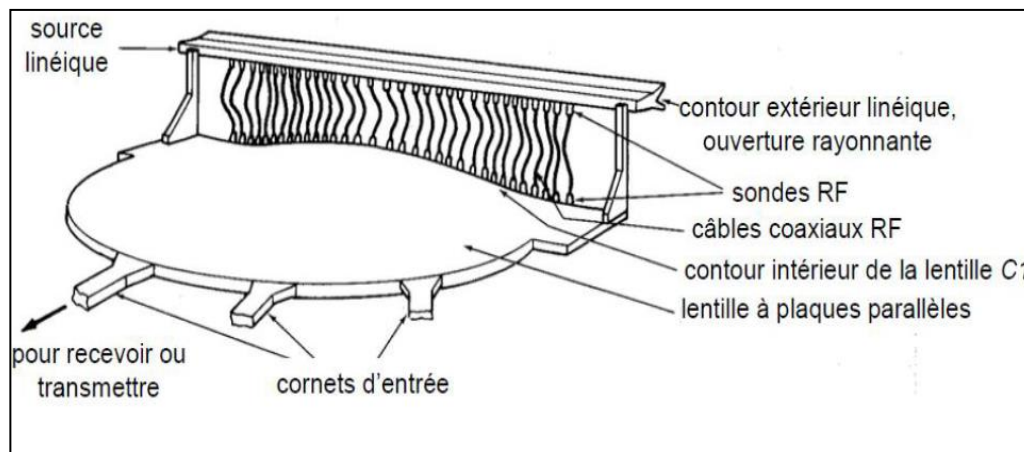


Figure II.1 : Première lentille de Rotman



Figure II.2 : Une photo de Walter Rotman.

Après les années 1950, avec les exigences croissantes dans les domaines des radars de poursuite, des applications multi-cibles, des communications par satellite et des contre-mesures électroniques, une technologie multifaisceaux à lentille basée sur des principes quasi-optiques a émergé. La plus célèbre d'entre elles est la lentille Rotman. La lentille est dérivée de la lentille de Ruze et de la lentille R-2R des années 1950. La lentille Lutz a évolué à partir de la lentille optique plate en métal traditionnelle qui possède plusieurs ports d'entrée et de sortie, mais il existe une certaine erreur de phase entre les ports de la lentille, ce qui limite son utilisation. L'image ci-dessous montre les quatre types des lentilles Lutz [24].

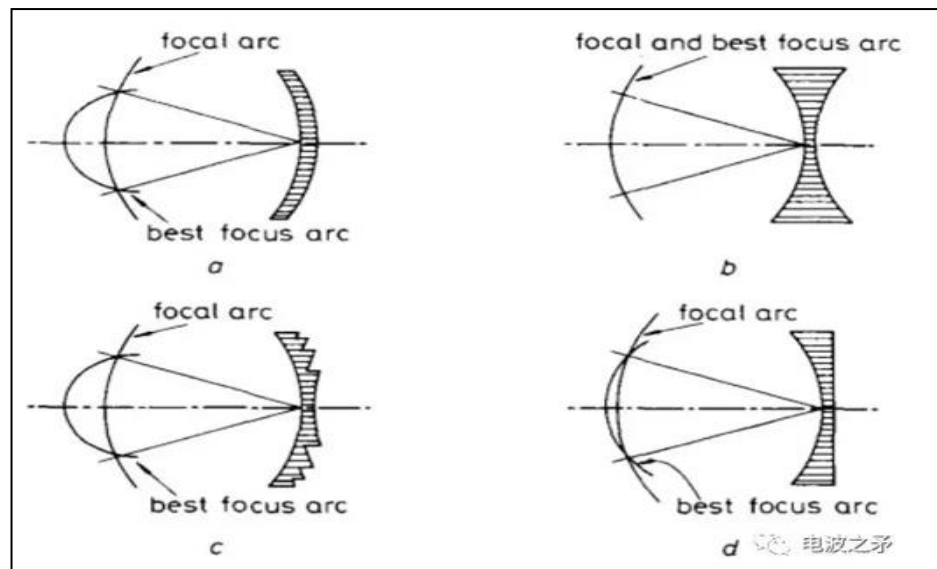


Figure II.3 : Quatre types des lentilles de Lutz.

La lentille R-2R est un dispositif micro-onde important qui fournit une mise au point perfectionnée, donnant plusieurs faisceaux simultanés à partir d'un réseau d'antennes circulaire ou

elliptique. Cependant, la mise au point parfaite de la lentille R-2R entraîne une limitation dans la couverture angulaire à cause du doublement angulaire qui intervient lorsque les éléments du réseau d'antennes sont connectés aux éléments de lancement sur le contour de la lentille (voir Figure II.4). Quelques améliorations sont faites pour modifier le concept R-2R afin qu'un cercle complet d'éléments de réseau puisse être mappé sur un cercle complet de ports de faisceau. Cette nouvelle conception utilise des jonctions hybrides et des lentilles. Ce qui résulte d'avoir de faisceaux en 360°, simultanés, dont chacun peut être utilisé pour la transmission et pour la réception.

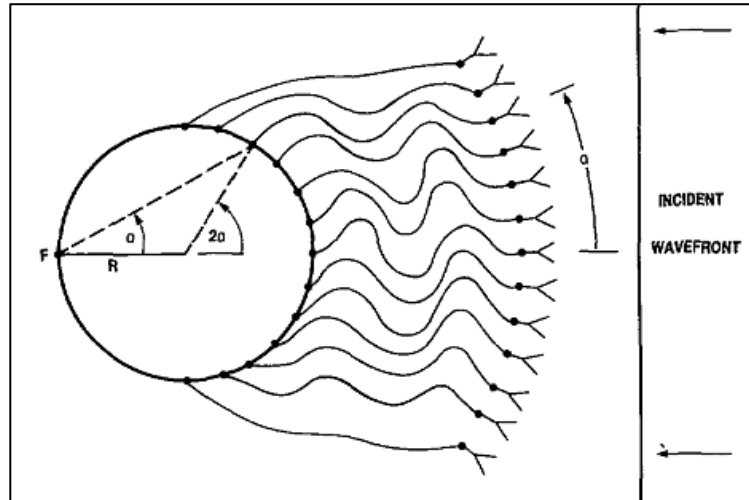


Figure II.4 : Principe de fonctionnement de la lentille R-2R [24]

En 1962, trois lentilles micro-ondes à point focal parfait ont été inventées. Ces lentilles avaient considérablement réduit l'erreur de phase et de même la liberté de conception de la lentille Ruze [25], comme elle est montrée dans la Figure II.5.

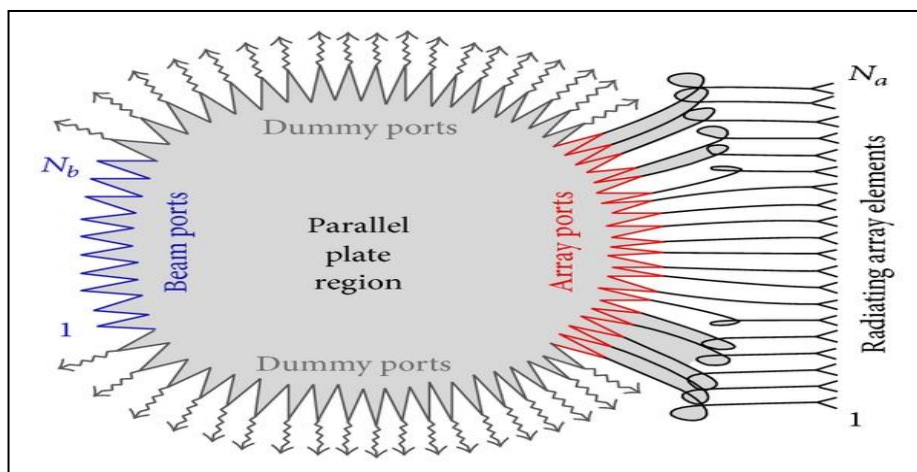


Figure II.5 : Construction de base de la lentille Rotman [5].

Depuis lors, le système basé sur la conception de la lentille Rotman a été appliqué à la technologie Raytheon en 1967 et testé sur l'avion F-4 Phantom en 1972. Plus tard, Archer et d'autres

chercheurs ont proposé le concept des lentilles Rotman à circuit imprimé basées sur des lignes micro-ruban, ce qui a rendu les lentilles de Rotman plus largement utilisées avec l'avènement de la conception assistée par ordinateur.

La compagnie Raytheon a activement promu l'industrialisation des lentilles de Rotman, en se basant sur la miniaturisation et la fiabilité de la lentille. En 1967, la première lentille micro-ruban ont été développées avec succès et la lentille d'extension de balayage de Raytheon [24].

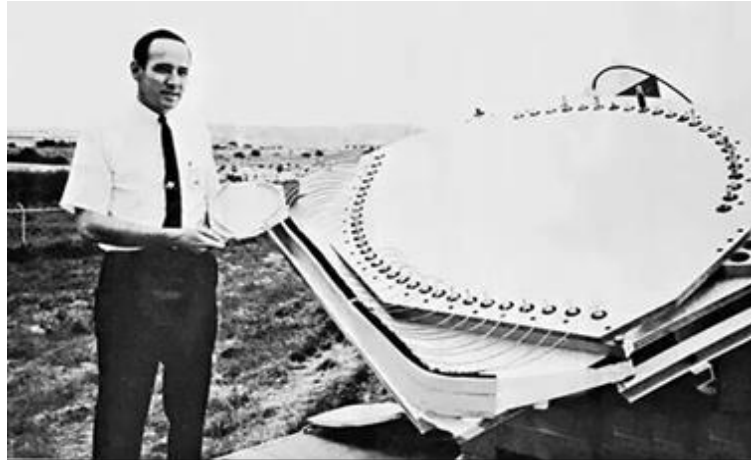


Figure II.6 : Réduction de la taille de la lentille par des charges diélectriques [26].

En 1970, le premier prototype d'une lentille Rotman bidimensionnelle a été développé. Une année après, cette technologie a été appliquée au système de télémétrie et de suivi "MISTRAC". Ce système se compose de 376 éléments (antennes), à bipolarisation, qui forment un réseau planaire et utilise des lentilles de Rotman imprimées et alimentées pour réaliser un balayage bidimensionnel [24].

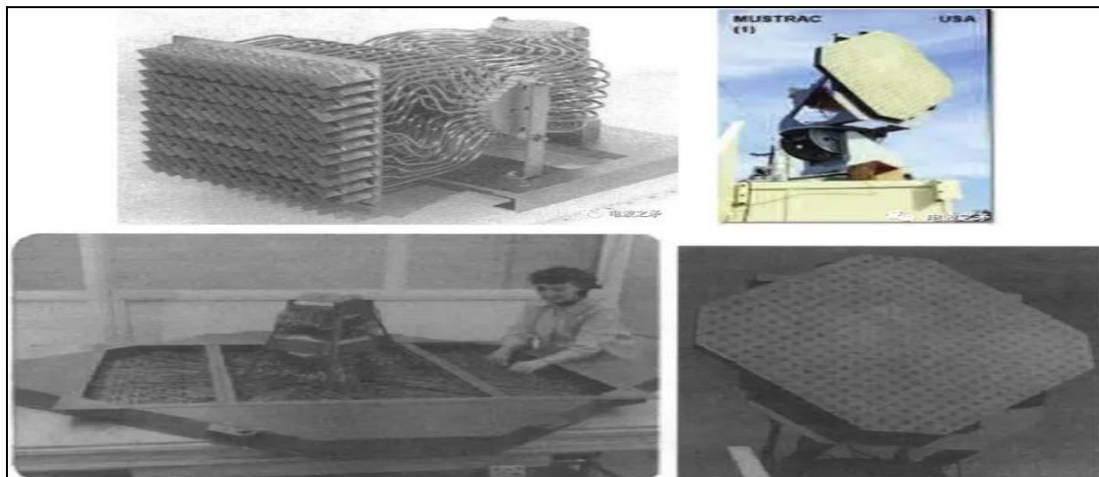


Figure II.7 : Réseau planaire alimenté par des piles de lentille de Rotman imprimée2D [26].

En 1972, Raytheon a appliqué 12 réseaux d'antennes à lentilles Rotman pour obtenir une couverture de faisceau omnidirectionnelle dans le cadre de l'offre du système de guerre électronique

AN / SLQ-32 de la marine américaine [26]. Il s'agit actuellement du principal système de guerre électronique utilisé par les navires de la marine américaine (à partir de 2017).

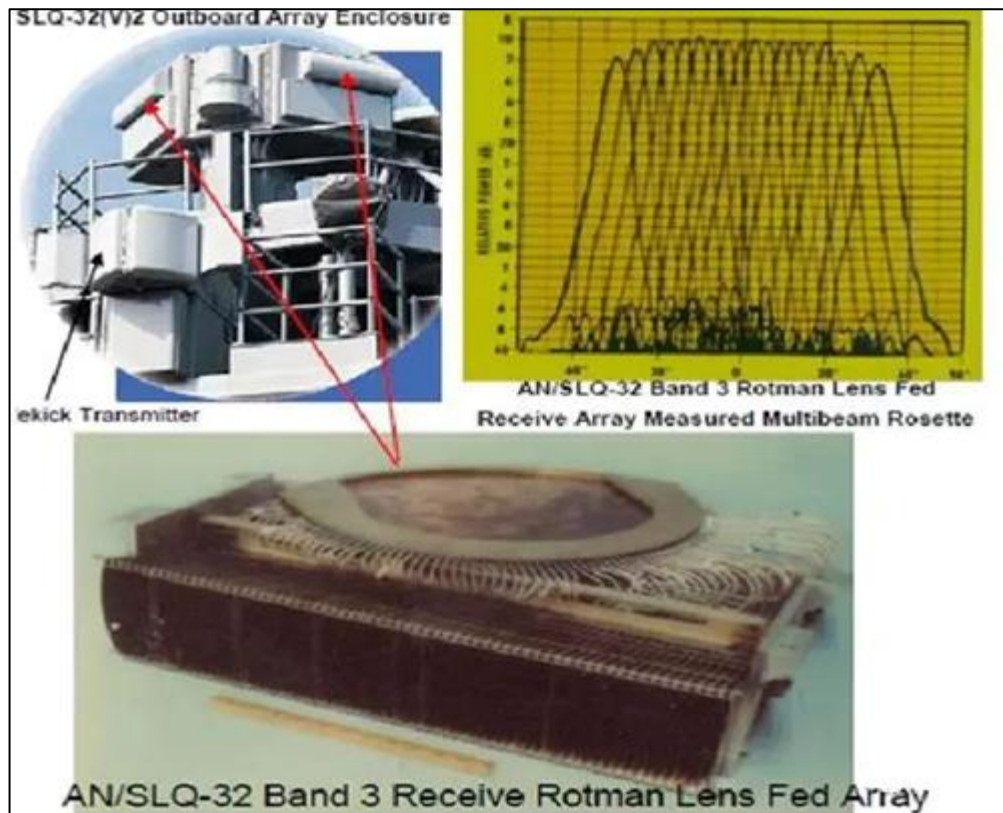


Figure II.8 : Le Système radar AN / SLQ-32[26].

En 1975, Raytheon a développé un réseau d'antennes de 140 éléments avec une couverture de faisceau de 180°.

En 1986, Raytheon a appliqué la lentille de Rotman à la mise à niveau de la nacelle ALQ-119. Le modèle final AN / ALQ-184 a ensuite été équipé de F-16, A-10, F-4, F-1, F-15, A-7 et C-130 et autres avions multi-types [24].

L'ALQ-184 est une nacelle de guerre électronique (EW) auto-protégée contre les mesures électroniques (ECM) utilisée sur les avions tactiques de l'US Air Force. Ses récepteurs multifaisceaux contrôlés par ordinateur et ses amplificateurs mini-TWT fonctionnent à la fois en mode de réception et de transmission pour diriger sélectivement le brouillage à haute puissance contre plusieurs émetteurs.

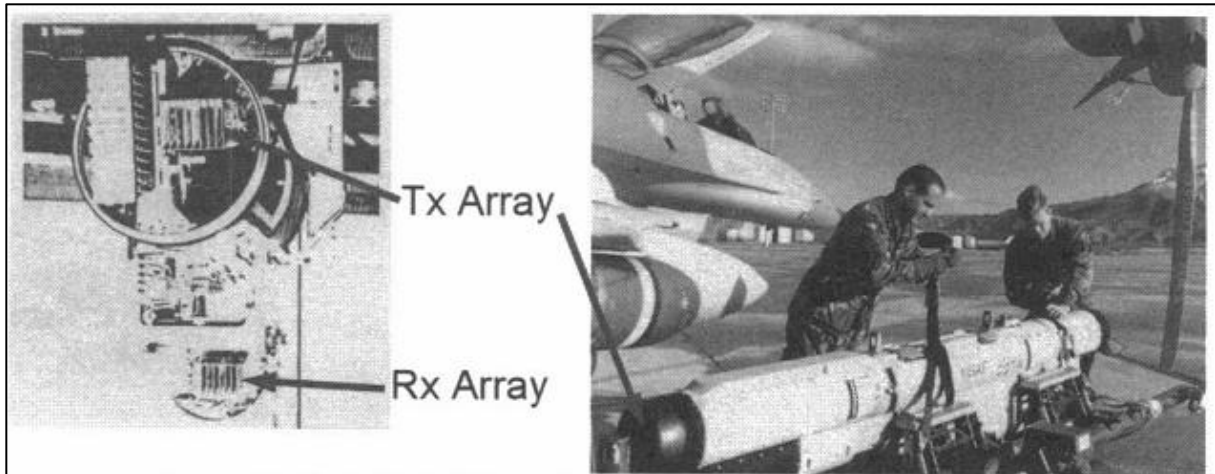


Figure II.9 : AN/ALQ-184 nacelle auto protecteur avec des réseaux d'antennes alimentés par la lentille de Rotman [26].

En 1987, une lentille compacte avec un niveau de lobe de -30 dB a été réalisée.

En 1994, Raytheon a réalisé une lentille Rotman avec une bande passante de trois octaves, une plage de balayage de $\pm 60^\circ$, une cohérence d'amplitude de 0,53 dB et une cohérence de phase de $4,1^\circ$ [26].

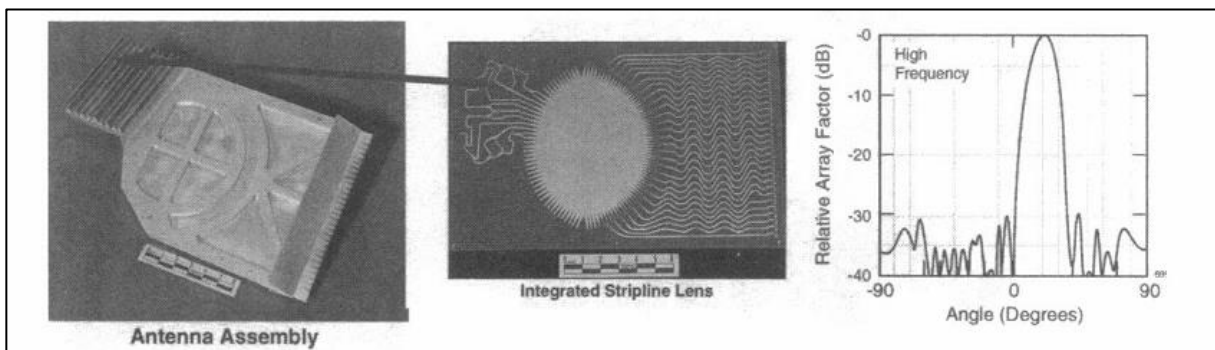


Figure II.10 : Lentille de Rotman intégrée à un réseau d'antennes à faible niveau de lobes secondaires [26].

Dans l'année 2000, les lentilles de Rotman se sont développées dans le sens de la haute fréquence, de la miniaturisation et de la flexibilité, et ont été largement utilisées dans des domaines émergents tels que les liaisons inter-satellites, les communications par satellite et les systèmes anticollision[7].

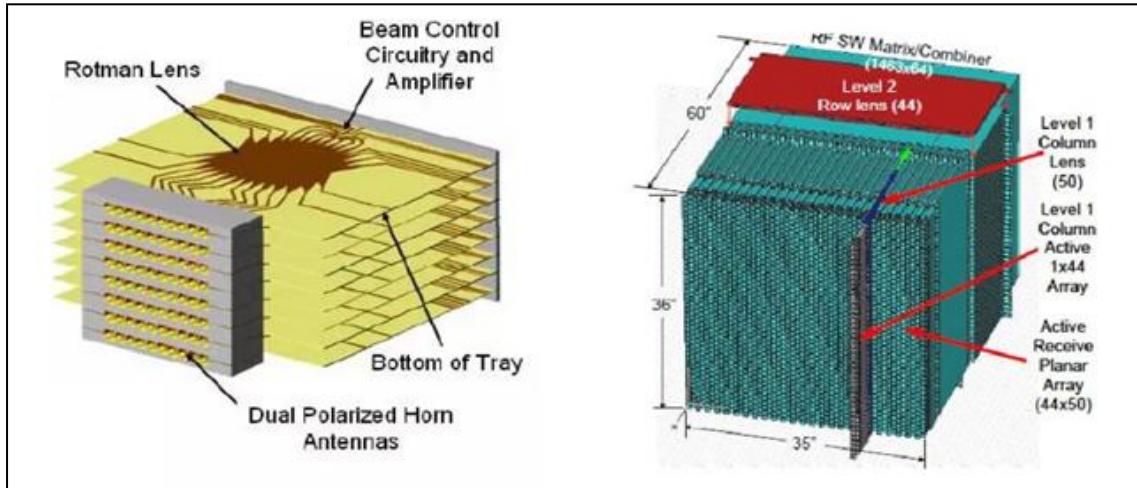


Figure II.11: Guide d'ondes en forme L pour polarisation verticale.

Le développement de dispositifs de communication modernes pour les dernières technologies telles que la 5G a mis la technologie des ondes millimétriques très demandée car elle offre des débits de données et une bande passante plus élevés. Dans le même sens, les lentilles de Rotman, qui sont utilisées dans l'alimentation des réseaux d'antennes, ont été conçues pour répondre à ce développement. Dans la Figure II.12, une lentille de Rotman pliée était proposée pour l'utilisation dans les ondes millimétriques.

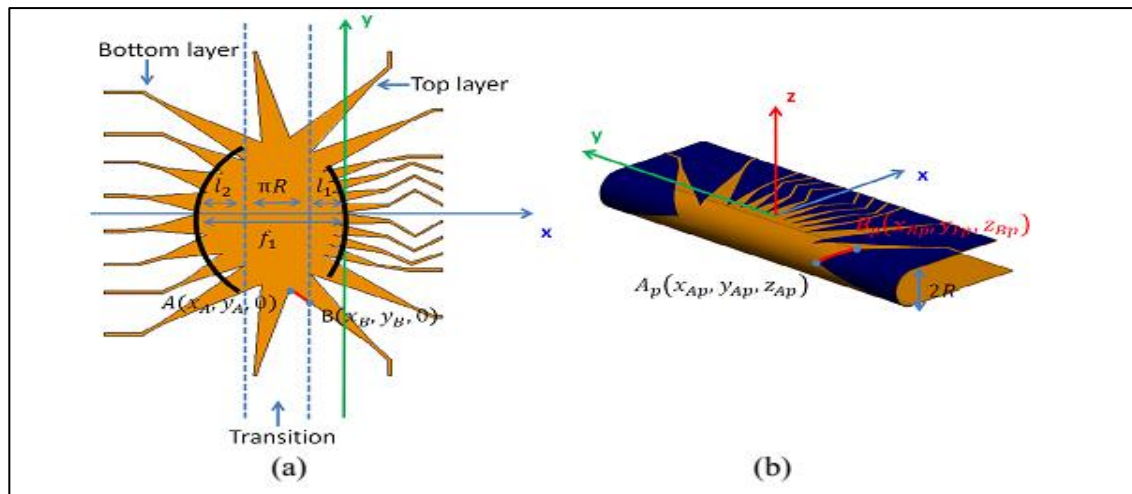


Figure II.12 : Schéma d'une lentille de Rotman conventionnelle en (a) et lentille pliée en (b) [27].

Wan Chen a proposé une lentille Rotman (5x5) planaire à large bande pour alimenter un réseau d'antennes à déphasage [28]. Elle se compose d'une lentille et des lignes de transmission à retard qui prennent la forme d'un trapèze. Ces lignes à retard vont créer un certain déphasage.

Une ancienne version de la lentille de Rotman avec un réseau d'antennes a été fournie par le laboratoire de recherche militaire par l'institut de Georgia [29-30]. Cette lentille fonctionnait entre 32 et 40 GHz. Comme illustrée dans la Figure II.13, elle se composait de 34 antennes qui étaient connectées aux 34 ports de réseau à la sortie de la lentille Rotman, à l'aide de guides d'ondes de forme U. L'entrée se composait de 19 ports de faisceau, qui étaient également connectés à un collecteur de port de faisceau à l'aide de guides d'ondes de forme U. La lentille Rotman a été réalisée avec une cavité métallique, permettant une faible perte d'insertion. Cette configuration a permis un balayage en azimut.

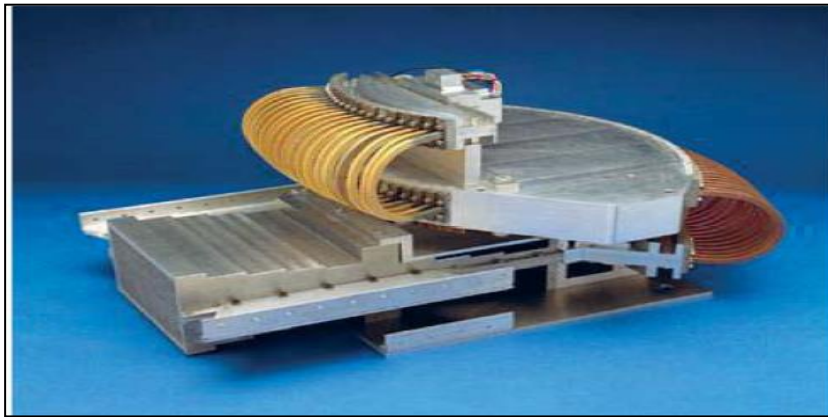


Figure II.13 : Une ancienne lentille de Rotman avec antennes à cornet sectoriel.

II.3. Quelques Modèles de conception d'une lentille de Rotman

Quelques modèles conventionnels et leur développement sont brièvement abordés dans les sections suivantes

II.3.1. Modèle conventionnelle de Rotman

Dans la conception conventionnelle des lentilles de Rotman de forme arbitraire, les équations généralisées obtenues par Gent sont utilisées [31]. Les paramètres de la lentille sont définis comme indiqué sur la Figure II.15. L'arc focal localise les éléments d'alimentation et il est également appelé contour du faisceau. En outre, le contour de lentille interne localise les éléments de réception où le contour de lentille externe localise les éléments de réseau d'antennes. Dans la conception du contour de la lentille intérieure, trois points focaux sont utilisés: deux points focaux hors axe symétriques (F_1 et F_2) et un point focal sur l'axe (G). La forme de l'arc focal est choisie comme un arc de cercle contenant les trois points focaux. Contrairement aux autres types de lentilles, la lentille de Rotman permet à Y (la coordonnée y d'un point arbitraire sur le contour intérieur de la lentille) et N (la coordonnée d'un élément de réseau connecté à l'élément récepteur se situant à $P(X, Y)$) d'être

différents. Ce qui offre un plus de degrés de liberté dans la conception. Afin de dériver des équations de conception pour le contour de la lentille, l'égalité de longueur de trajet optique et la géométrie de la lentille sont utilisées.

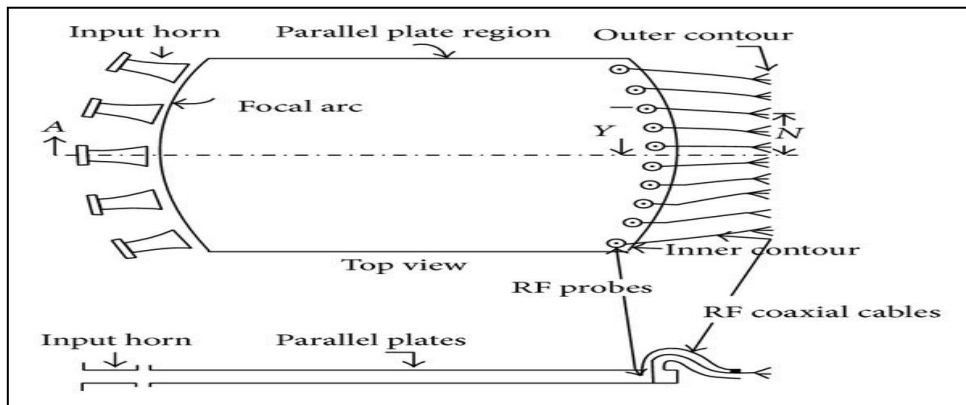


Figure II.14 : Configuration d'origine de la lentille Rotman [5].

II.3.2. Modèle symétrique de Shelton

En 1978, Shelton [32] a développé une configuration modifiée de la lentille Rotman. Cette configuration est symétrique, où le contour de faisceau et le contour de la lentille interne étaient identiques et symétriques par rapport à un plan de symétrie (voir la Figure II.15). Cette conception était utile pour un nombre comparable de ports d'entrée et de sortie, mais les équations de conception de ce type de lentille étaient plus compliquées que celles de Rotman.

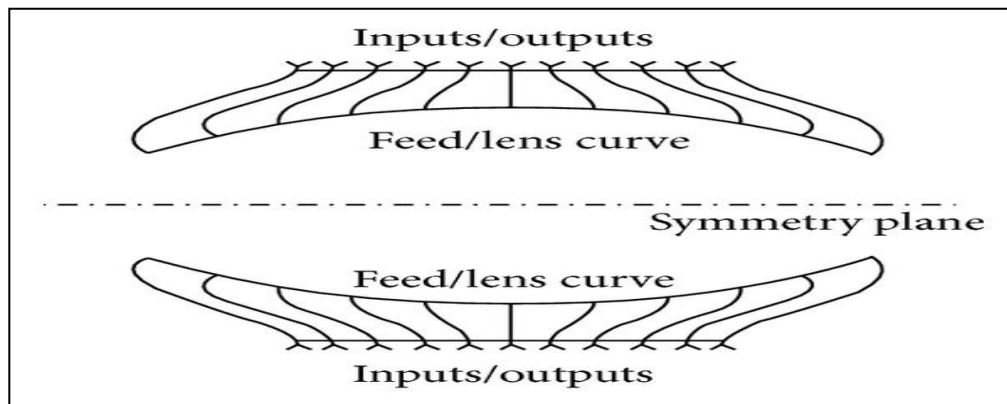


Figure II.15 : Lentille symétrique de Shelton [5].

II.3.3. Modèle de Katagi

En 1984, Katagi [33] a démontré les équations de conception données par Rotman et Turner en ajoutant une nouvelle variable qui a réduit l'erreur de phase sur l'ouverture d'un réseau d'antennes linéaire. Ce paramètre de conception a permis de réduire la taille de la lentille. Comme elle est montrée dans la Figure II.16, Katagi a défini un angle sous-tendu (α) correspondant à l'un des points focaux hors axe comme elle a été défini dans le modèle de Rotman. Cependant, l'angle de balayage

(β) correspondant au réseau d'antennes de F_1 était supposé différent de l'angle α . Par conséquent, Katagi a introduit une nouvelle variable de conception composée du rapport de l'angle de balayage et de l'angle sous-tendu correspondant. Cette variable a fourni un nouveau degré de liberté par rapport à la conception conventionnelle de Rotman. Katagi a également suggéré que la forme du contour du faisceau n'est pas nécessairement un arc circulaire. De même, le modèle proposé par Katagi montre des erreurs de phase plus faibles que la conception originale de Rotman.

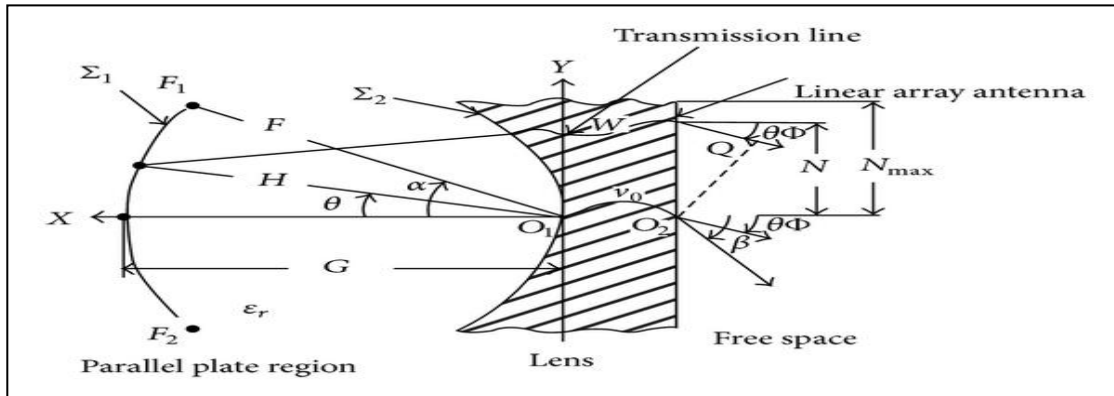


Figure II.16 : Schéma de la lentille de Katagi [5].

II.3.4. Le modèle de Hansen

En 1991, Hansen [34] a utilisé six paramètres de conception: angle focal, rapport focal, rapport angle de faisceau / angle de rayon, angle de faisceau maximal, distance focale et l'espacement inter-éléments du réseau. Un autre paramètre d'ellipticité a été introduit qui supposait que le contour du faisceau était elliptique plutôt que circulaire. Le rapport angle de faisceau (angle sous-tendu) à angle de rayon (angle de balayage) et l'ellipticité sont des ajouts aux paramètres de la conception conventionnelle. Hansen a expliqué les effets de ces sept paramètres de conception sur la forme et sur les erreurs géométriques de phase et d'amplitude de la lentille de Rotman. Dans cette conception, le contour du faisceau elliptique a été introduit et la relation entre l'angle de balayage et l'angle sous-tendu est défini par le paramètre $\gamma = \frac{\sin \psi}{\sin \alpha}$. La relation entre les erreurs de phase et les paramètres typiques de conception a été étudiée. Dans le modèle de Hansen, la lentille était supposée remplie d'air et le balayage des faisceaux étaient dans l'espace libre.

II.3.5. Modèle de Gagnon, modifiée par Singhal

Selon la loi de Snell, Gagnon a introduit une procédure de recentrer les lentilles Rotman qui sont remplies en diélectrique [35]. Par conséquent, l'application de la loi de Snell donne un rapport de $\sqrt{\epsilon_r}$ entre le sinus de l'angle de balayage et l'angle sous-tendu du contour du faisceau.

$$\sin \beta = \sqrt{\epsilon_r} \cdot \sin \alpha$$

Cette approche va donner les positions de port de faisceau et de port de réseau ce qui réduit le couplage entre les ports de faisceau externes, surtout pour les lentilles imprimées utilisées avec de petits réseaux d'antennes.

Une approche modifiée pour concevoir une lentille de Rotman avait été proposée par Singhal [36]. L'erreur de phase (déphasage) de l'onde incidente a été calculée. L'erreur obtenue par l'approche proposée et par l'approche conventionnelle a été comparée. L'analyse bidimensionnelle du champ électromagnétique de la lentille obtenue par l'approche modifiée et par la lentille d'approche conventionnelle a été réalisée en utilisant la méthode de calcul des résidus. Les résultats obtenus pour les deux lentilles ont été comparés.

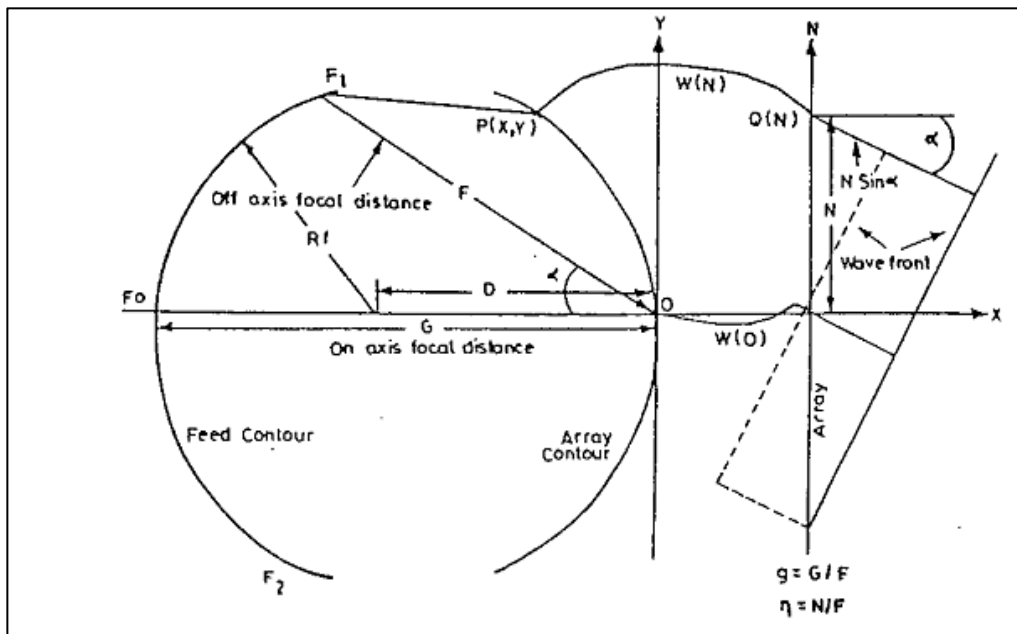


Figure II.17 : Une approche modifiée par Singhal pour concevoir la lentille de Rotman [36].

II.4.Applications de lentilles de Rotman

Les principales applications militaires des lentilles micro-ondes sont les systèmes radar aéroportés et maritimes. Par exemple, le système ECM d'autoprotection AN/ALQ-184 pour l'avion tactique de l'armée de l'air (Figure II.18(a)), et le système de contre-mesures électroniques AN/SQL32 (Figure II.18(b)) construit par la société Raytheon adopte une structure de lentille micro-ondes pour effectuer la formation de faisceau (beamforming) avancée [37]. Les applications nécessitant plusieurs faisceaux dans les directions d'azimut ou d'élévation peuvent appliquer une seule lentille micro-ondes plane 2D. Théoriquement et même expérimentalement, la capacité de balayage d'une seule lentille

micro-ondes atteint $\pm 60^\circ$. La lentille de Rotman a des bonnes performances, ce qui la rendent idéales pour des applications civiles telles que les véhicules télécommandés, la communication satellitaire, les radars anticollision, et les systèmes de communications de la technologie ULB (Ultra Large Bande). [7].

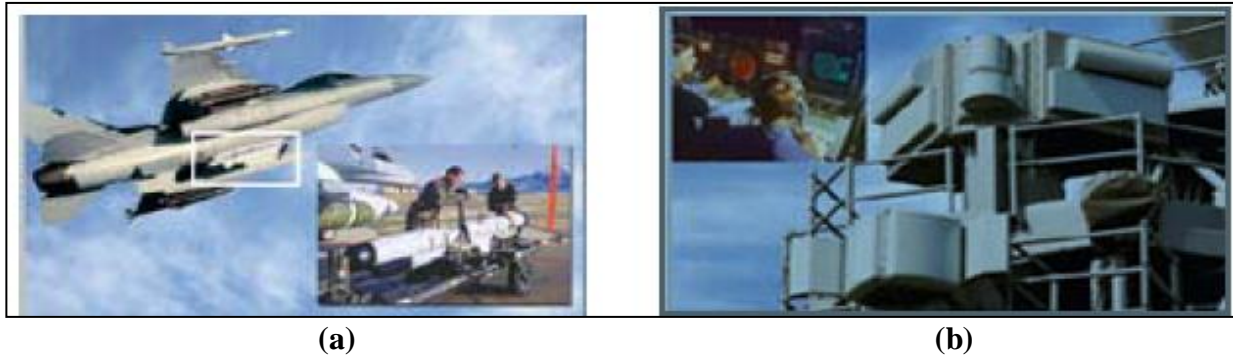


Figure II.18: (a):AN/ALQ-184 (b): AN/SQL32[37].

Dans les applications de systèmes de communication radar, il est souhaitable d'avoir une large zone de couverture dans une certaine direction. En d'autres termes, un système électronique orientable avec une antenne de large ouverture est très nécessaire pour suivre la cible rapidement sans faire une inclinaison mécanique dans l'antenne. Dans cette situation, la lentille de Rotman forme une solution formidable pour remplir la tâche de poursuite et détection dans les systèmes de défense électronique. Comme un exemple, on peut citer le système AN-SLQ-32 qui utilise une plate-forme embarquée dépend du mécanisme de configuration orientable en utilisant une lentille Rotman développée par la compagnie Raytheon (la Figure II.19)[37].

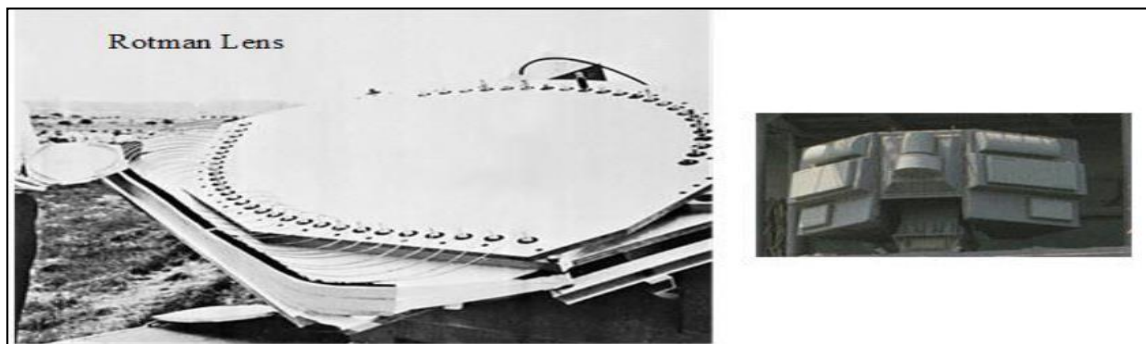


Figure II.19: AN-SL-32 Radar System [37].

Le système de communication sans fil utilise une lentille de Rotman pour diriger le lobe principal à l'angle désiré. De même, la lentille de Rotman est utilisée pour garantir une liaison de communication avec une bonne performance pour une système dynamique (récepteur et émetteur en mouvement). Un exemple de ces liaisons est montré dans la Figure II.20 qui décrit une liaison entre

des avions et un satellite [37].

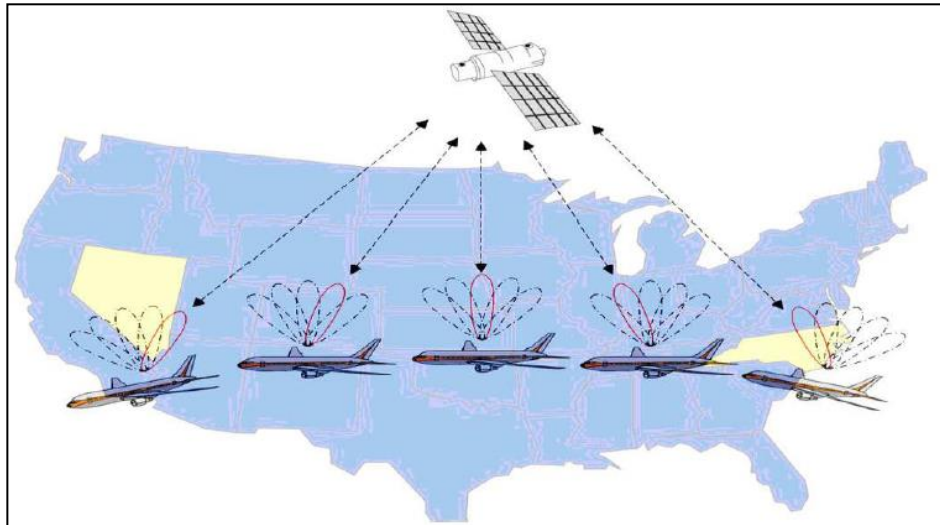


Figure II.20: Schéma d'un système de communication entre avions et satellite [38]

La lentille de Rotman est utilisée dans les applications requérant une bonne performance telles que les systèmes d'imagerie médicales et les capteurs de véhicule. Figure II.21 explique la lentille de Rotman compact comme un capteur de véhicule [39].

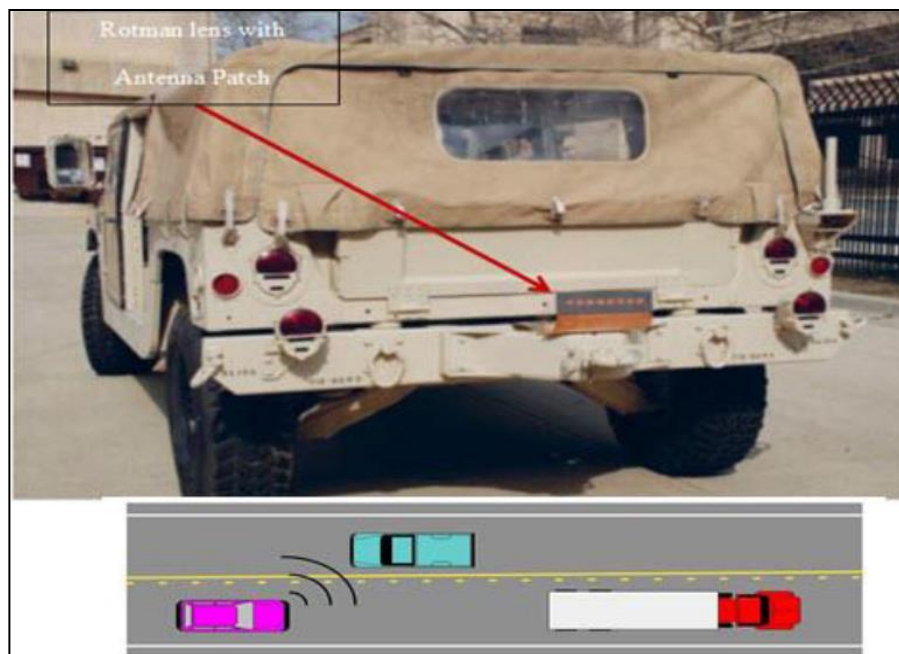


Figure II.21: Lentille Rotman comme capteur de véhicule [39].

II.5. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on a vu un état de l'art sur la lentille de Rotman et ces différentes applications civiles et même militaires. La lentille de Rotman était développée pour obtenir un circuit d'alimentation d'un réseau d'antennes à faible coût, simple et performant. Pour aboutir à ce modèle efficace avec une erreur de phase réduite, quelques travaux ont été faits par plusieurs chercheurs comme on a déjà vu dans ce chapitre. Le chapitre suivant sera consacré à une étude analytique de la lentille de Rotman.

Chapitre III
Etude
Paramétrique
de la
lentille de Rotman

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a fait un état de l'art sur la lentille de Rotman et leurs domaines d'applications. La lentille de Rotman est considérée comme une technique d'alimentation des réseaux d'antennes la plus intéressante à cause de ses plusieurs caractéristiques. Parmi ces caractéristiques on cite : Elle a un système stable en fréquence, elle bénéficie de l'obtention d'une quantité appréciable de faisceaux et elle couvre une large zone de couverture. Ces caractéristiques et des autres rendent la lentille de Rotman très utilisée dans plusieurs domaines de télécommunication (réseaux d'antennes, système radar, les communications par satellite, et même dans des applications militaires). Dans ce chapitre, on va présenter une étude analytique et autre paramétrique de cette lentille de Rotman afin d'avoir une bonne idée sur sa conception par un logiciel de simulation EM (Remcom, CST,...).

III.2 Etude analytique de la lentille de Rotman

III.2.1 Le principe de la lentille de Rotman

Une méthode systématique doit être employée dans la conception de la lentille de Rotman. Pour avoir une bonne compréhension de la lentille Rotman, elle devrait être soigneusement considérée. On décompose la conception de cette lentille comme suit: (1) la définition des caractéristiques de la lentille de Rotman, (2) l'extraction de ses paramètres, (3) dessin de la géométrie de la lentille de Rotman [7]

III.2.1.1 Le modèle de la lentille Rotman

La conception de la lentille micro-ondes de Rotman commence par des paramètres théoriques qui sont déterminés en utilisant l'optique géométrique. Les chercheurs développent et modifient trois lentilles focales [4], quatre lentilles focales [40] et des lentilles non focales [41].

III.2.1.1.1 Comparaison entre une lentille non focale par rapport à celle focale

La différence entre ces deux conceptions est le nombre de degrés de liberté dans la conception et l'erreur de phase théorique à travers l'ouverture de la lentille. Généralement, le concept de la conception des lentilles non focales est validé en comparant avec les résultats publiés des lentilles trifocales et quadri-focales dans la littérature. Parce que les modèles existants sont basés sur des concepts de la géométrie optique, la comparaison est faite d'une manière théorique.

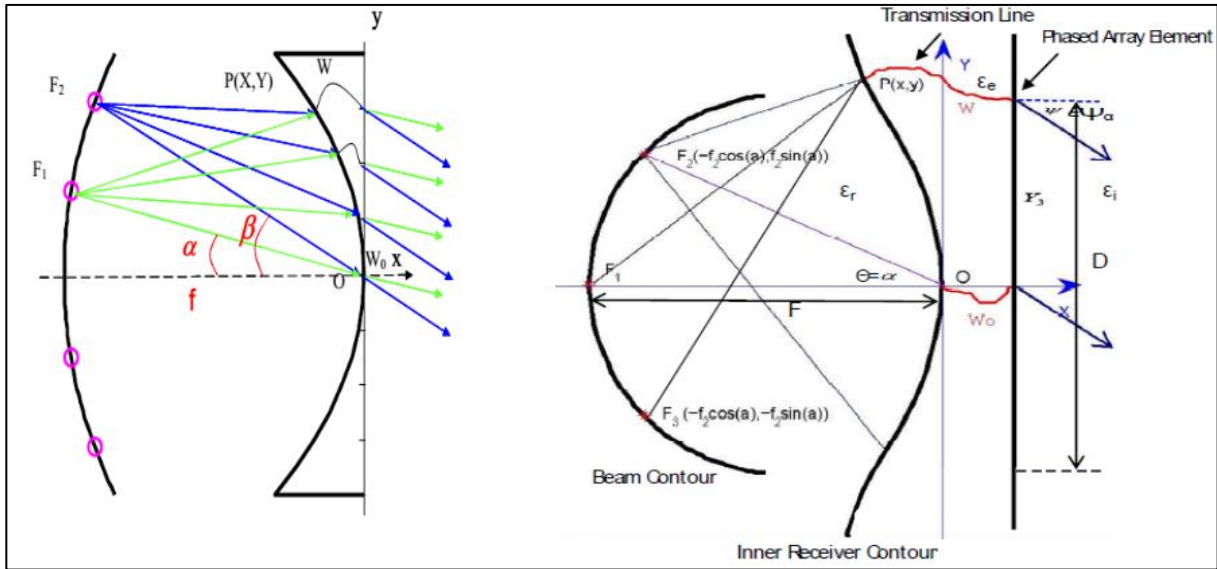


Figure III.1 : Schéma géométriques de la lentille de Rotman trifocale et quadri-focale

Pour faire la comparaison entre les approches de conception des lentilles non focales avec celles focales, on considère que les paramètres de la lentille sont identiques que celles rapportés dans [42] et avec un rapport F/D (distance focale à dimension du réseau) égal à un. On commence par la conception d'une lentille non focale qui minimise l'erreur de phase sur l'ouverture du réseau [42]. Ensuite, on va voir la conception d'une lentille trifocale et les lentilles quadri-focales pour le même rapport F/D . La Figure III.2 montre une comparaison entre une lentille non focale et les deux lentilles focales aux angles de balayage sous-tendus du demi-plan. Comme illustré, il y a points focaux idéaux à 0° et 23° , pour la lentille trifocale, et à 11° et 25° , pour la lentille quadri-focale. Comme prévu, les lentilles trifocales et quadri-focales ont plus d'erreur de phase pour la plupart des ports par rapport à la lentille non focale. La Figure III.2 montre une comparaison de la phase typique distributions à travers l'ouverture du réseau pour la lentille trifocale et celle non focale aux ports du faisceau [7].

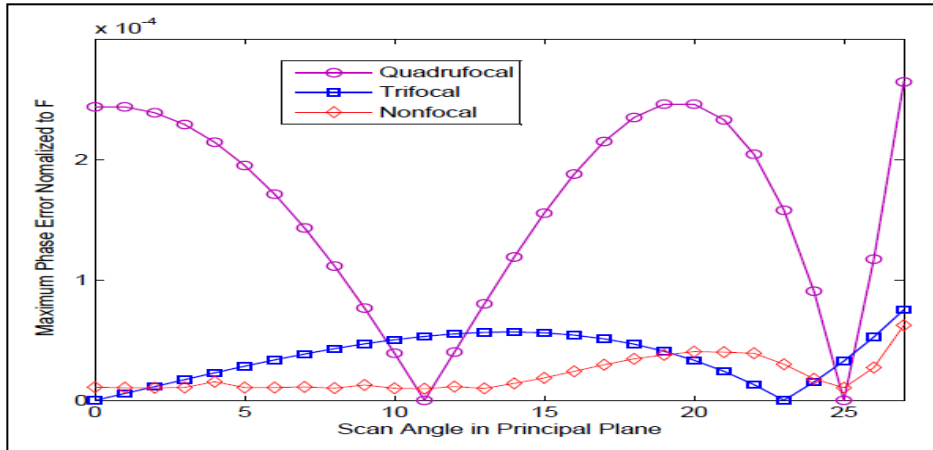


Figure III.2 : Une comparaison entre les lentilles non focales et les lentilles Rotman focales

Pour évaluer la performance de phase à travers l'ouverture, la Figure III.3 et la Figure III.4 représentent les distributions de phase typiques à travers l'ouverture du réseau d'antennes linéaire uniforme qui se compose de 21 éléments pour une lentille trifocale et une autre non focale aux excitations de port de faisceau de $\alpha_i = 10^\circ$ et 25° . On peut observer que les erreurs de phase les plus élevées de la lentille trifocale se produisent au niveau des ports de réception de bord, tandis que celles de la lentille non focale ont lieu au niveau des ports relativement centraux. Bien que la lentille non focale présente des erreurs plus importantes le long de quelques ports centraux, des erreurs de phase moyennement faibles ont été bien maintenues à travers l'ouverture du réseau.

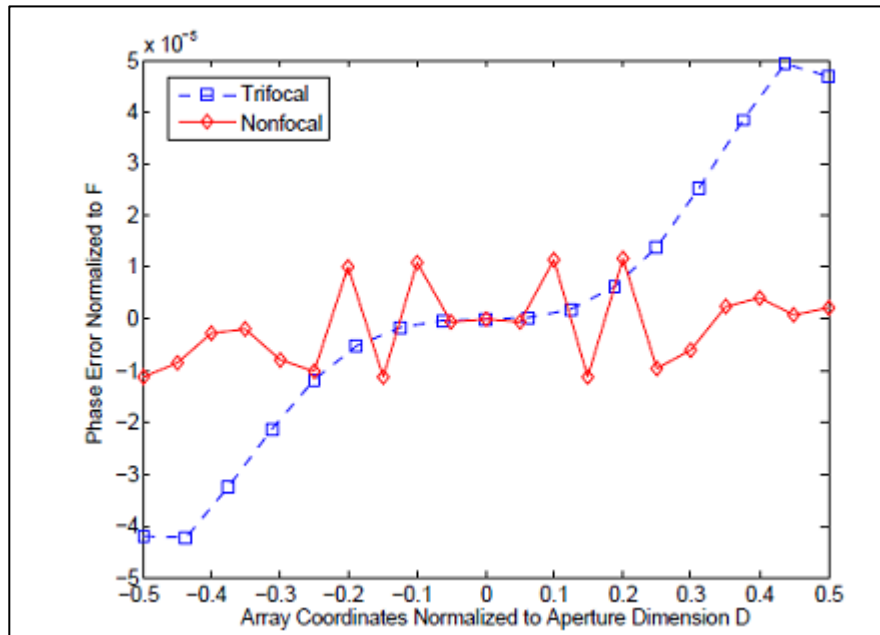


Figure III.3 : Erreur de phase à travers l'ouverture du réseau pour des lentilles trifocale et non-focales pour un une excitation de faisceau à 10° .

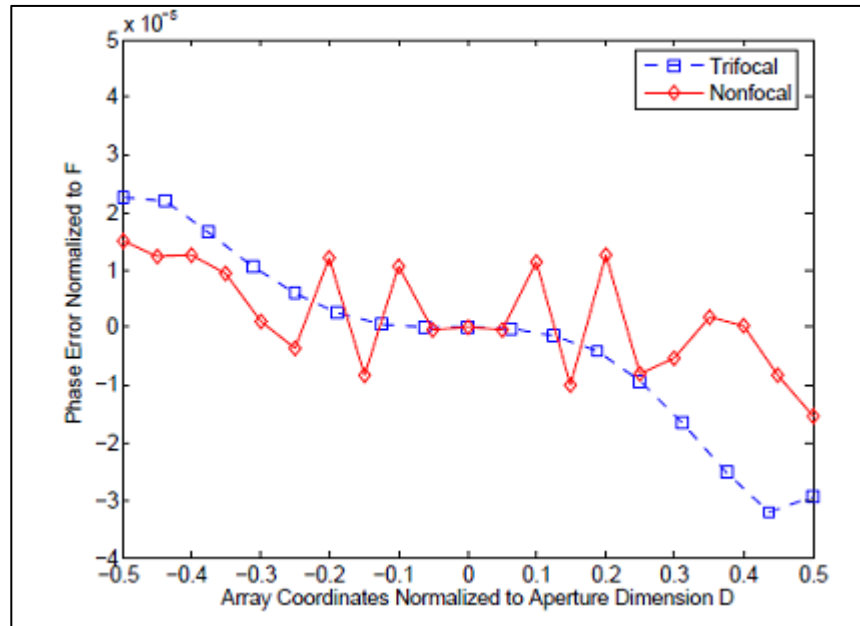


Figure III.4 : Erreur de phase à travers l'ouverture du réseau pour des lentilles trifocale et non-focales pour une excitation de faisceau à 25°

Donc, la réduction des erreurs de phase dans la lentille non-focale est devenue très grande pour des réseaux à grande ouverture. Dans ce cas, il faut choisir une autre technique d'alimentation pour ce réseau à grande ouverture. En haute fréquence, plusieurs applications nécessitent des faisceaux très étroits, malheureusement ce n'est pas le cas avec un réseau avec un grand nombre d'éléments (100 ou plus). Pour ces points ci-dessus, la lentille de Rotman trifocale représente un choix parfait pour les applications hyperfréquences [7].

III.2.1.2. Les caractéristiques de la lentille de Rotman

Généralement, la lentille de Rotman a deux caractéristiques mécaniques et électriques. Parmi les caractéristiques mécaniques, on peut citer : la taille, le poids, la plage de fonctionnement de la température, etc. Par exemple, l'augmentation de la taille améliore les performances, mais la taille maximale peut aller jusqu'à 30x30 cm en raison des limitations de fabrication (miniaturisation). Le poids est important dans certaines applications portables (avions, ...). L'épaisseur du substrat peut définir la puissance tolérable et la résistivité mécanique. Du point de vue électrique, on doit considérer plusieurs caractéristiques telles que l'erreur de phase et d'amplitude, l'angle maximal de balayage, le nombre de ports d'entrée et de sortie, les erreurs de faisceau vs la fréquence, le coefficient de réflexion dans les ports, la bande passante, l'efficacité énergétique, puissance maximale tolérable, etc.[7].

Dans ce chapitre, on va voir une lentille de Rotman trifocale avec un certain nombre de faisceaux dans l'espace dans une gamme de fréquence autour de 10 GHz. Premièrement, on doit définir les paramètres géométriques dans lesquels quelques caractéristiques affectent la géométrie finale de la lentille de Rotman tels que l'erreur de phase, l'angle maximal de balayage et le nombre de ports d'entrée et de sortie. Le substrat choisi est le Rogers 3003.

Rogers RO3003 est un composite chargé de céramique très utilisé dans les applications micro-ondes et RF. Ce substrat offre une excellente stabilité avec un constant diélectrique de 3 à 40 GHz à une température ambiante. Le matériau a un facteur de dissipation (D_f) de 0,0013 à 10 GHz et est idéal pour les filtres passe-bande, les antennes micro-ruban et les oscillateurs à tension contrôlée. Matériau haute performance pour circuits RF et micro-ondes. Ce matériau a une très faible perte diélectrique jusqu'à 40 GHz. Deux tailles sont existées dans l'industrie : de 4,5 x 6 pouces et 9 x 6 pouces.

Rogers RO3003 a les caractéristiques suivantes :

- Constant diélectrique : 3.00
- Facteur des pertes : 0.0013
- L'épaisseur du substrat : 0.02" (0.5 mm)
- L'épaisseur du cuivre : 0.5 onces (14 gr)
- Petite taille = 4.5 "x 6"
- RO3000 circuits imprimés PCB

Les paramètres mentionnés de la lentille de Rotman sont tabulés dans le tableau III.1 avec les valeurs souhaitées par le concepteur

Tableau III.1: Spécification de l'émetteur-récepteur pour les bandes VHF et UHF

| Spécifications de l'émetteur-récepteur | Spécifique |
|--|----------------|
| Gamme de fréquences | 10GHz |
| Couverture spatiale | $\pm 40^\circ$ |
| Nombre de faisceaux | 4 |

| | |
|--------------------------|----------|
| Permittivité du substrat | 2.2 |
| Épaisseur du substrat | 0.5 mm |
| Distribution d'amplitude | Uniforme |
| Distribution de phase | Linéaire |

III.2.1.3 L'extraction des paramètres géométriques de la lentille

On considère une lentille de Rotman trifocale, c'est-à-dire une lentille à trois points focaux (F , F_1 et F_2) au contour d'entrée, ce qui permet de produire trois faisceaux avec une erreur de phase nulle. Pour augmenter le nombre des faisceaux au niveau de sortie, on doit augmenter le nombre des points d'excitation au contour d'entrée, ce qui entraînera plus d'erreur de phase à la sortie. Dans cette partie, on va introduire les paramètres géométriques et les formules de Rotman, ce qui permet d'extraire l'emplacement des ports d'entrée et de sortie.

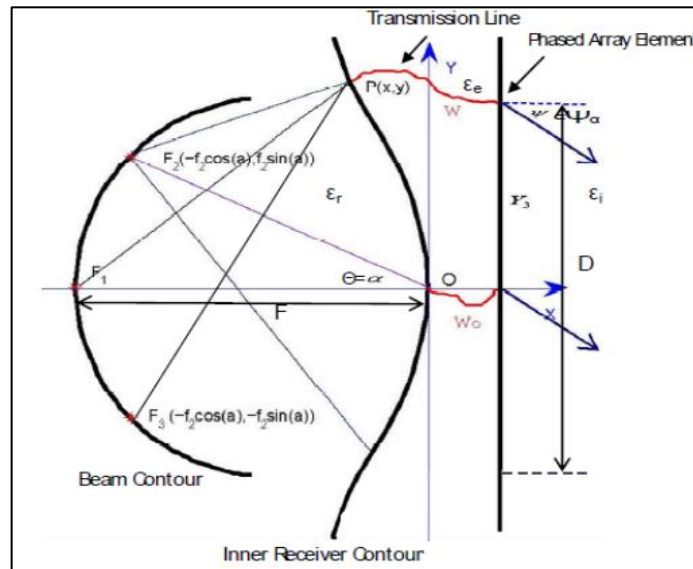


Figure III.5 : Schéma géométrique de la lentille de Rotman trifocale.

Les différents paramètres géométriques de la Figure III.5 sont les suivants:

α : Angle focal décentré

β : Rapport focal, $\beta = OF_2 / OF_1$, $\beta = F_2 / F_1$

ψ : Angle de balayage du réseau

θ : Angle sous-tendu pour les centres de phase des ports des faisceaux

γ : Rapport d'angle rayon/faisceau, $\gamma = \sin(\psi_\alpha) / \sin(\alpha)$

OF_2 : Distance focale latérale, f_2 ; OF_1 est la distance focale centrale, f_1

ζ : Paramètre intermédiaire $\zeta = Y_3 \gamma / f_1$

Y_3 : Distance de tout point du réseau par rapport à l'axe X

W : Longueur de la ligne de transmission

e : Excentricité du contour du faisceau

w : Longueur relative normalisée de la ligne de transmission, $w = (W - W_0) / f_1$

$\epsilon_r, \epsilon_e, \epsilon_i$: Constantes diélectriques pour la région de la cavité, la ligne de transmission et l'environnement

X, Y : Coordonnées indéterminées des centres de phase du port de réception interne, normalisées en X, Y .

Les équations finales pour extraire les contours de sortie (contours de réception intérieurs) sont répertoriées ci-dessous [42, 43]

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_e} - b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{\sqrt{\epsilon_r}} \\ x = \frac{\epsilon_i y_3^2 \sin^2 \psi}{2 \epsilon_r (\beta \cos \alpha - 1)} + \frac{(1 - \beta)w}{\beta \cos \alpha - 1} \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_r}} \\ y = \sqrt{\frac{\epsilon_i}{\epsilon_r}} \frac{y_3 \sin \psi \alpha}{f_1 \sin \alpha} \left(1 - \frac{w}{\beta} \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_r}} \right) \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

où,

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 1 - \left(\frac{1 - \beta}{1 - \beta c} \right)^2 - \frac{\zeta^2 \epsilon_i}{\beta^2 \epsilon_r} \\ b = -2 + \frac{2\zeta^2 \epsilon_i}{\beta \epsilon_r} + \frac{2(1 - \beta)}{1 - \beta c} - \frac{\zeta^2 S^2 (1 - \beta)}{(1 - \beta c)^2} \frac{\epsilon_i}{\epsilon_r} \\ c = \left(-\zeta^2 + \frac{\zeta^2 S^2}{1 - \beta c} - \frac{\zeta^2 S^4}{4(1 - \beta c)} \right) \frac{\epsilon_i}{\epsilon_r} \\ \beta = f_2 / f_1 \\ \zeta = \frac{y_3 \sin \psi \alpha}{f_1 \sin \alpha} \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

Dans ce cas, x, y sont les valeurs de X et Y normalisées à f_1 , et w la différence de longueur de

chemin $W - W_0$ normalisé à f_1 , et $S = \sin \alpha$; $C = \cos \alpha$.

Après avoir défini les paramètres géométriques des contours de sortie, les contours d'entrée dans la lentille Rotman avec un nombre de ports doivent être conçus. Pour ce faire, le contour des ports d'entrée doit être considéré comme un cercle ou une ellipse qui traverse trois points focaux.

Les valeurs des axes majeur et mineur de l'ellipse a et b (voir Figure III.6) et les emplacements géométriques des ports d'entrée peuvent être facilement défini à l'aide des équations suivantes:

$$X_b = \frac{1}{2} \frac{a \left[-2a + 2ab + 2\sqrt{b^2 a^2 - b^2 \tan^2 \theta} + 2b^3 \tan^2 \theta \right]}{a^2 + b^2 \tan^2 \theta} \quad (\text{III.3})$$

$$y_b = -\tan \theta \times X_b \quad (\text{III.4})$$

$$a = \frac{1 - \beta^2 \cos^2 \alpha + 2\beta \cos \alpha + \beta^2 \sin^2 \alpha (e^2 - 1) - 1}{2 \sqrt{1 - e^2} (\beta \cos \alpha - 1)} \quad (\text{III.5})$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (\text{III.6})$$

Où θ est l'angle sous-tendu du faisceau et x_b et y_b sont les coordonnées indéterminées des ports de faisceau.

L'excentricité est un paramètre de conception contrôlant la forme de contour de faisceau et il est défini par l'équation (III.6) [42].

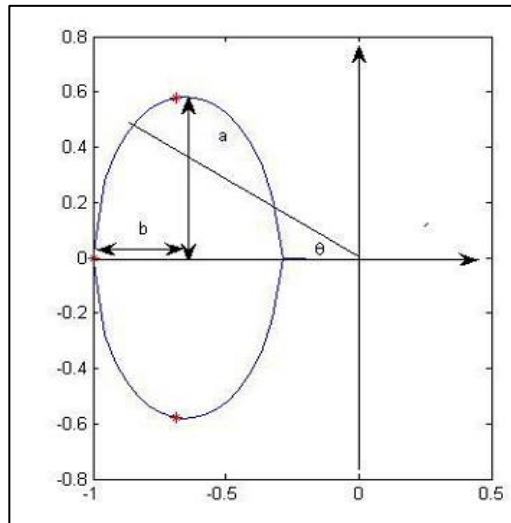


Figure III.6 : Schéma géométriques d'une ellipse.

III.3. Etude paramétrique d'une lentille de Rotman

Durant l'étude paramétrique, on doit varier un seul paramètre physique où les autres paramètres doivent être fixes, ce qui permet de voir l'effet du paramètre varié sur les caractéristiques de la lentille de Rotman conçue. Parmi les paramètres pris en considérations ; on peut citer l'angle focale, le rapport focal, les ports des faisceaux et les ports de réseau. L'objectif de cette étude paramétrique est de mieux comprendre le fonctionnement de la lentille ce qui permet d'atteindre une lentille de Rotman parfaite qui peut être utilisée pour les différentes applications et télécommunication.

Un code Matlab est ensuite utilisé pour résoudre les équations (III.1-III.6), ce qui permet de dessiner la géométrie de la lentille résultante.

A ce point, on a vu la méthode pour choisir la géométrie optimale de la lentille de Rotman, des paramètres et leur effet sur la structure géométrique de cette lentille et de même les performances de phase du système.

Tableau III.2: Quelques paramètres utilisés au Matlab pour construire la lentille montrée dans la Figure III.7

| Les paramètres du code Matlab | Structure de la lentille 3X6 |
|-------------------------------|------------------------------|
| Le rapport γ | 1.99 |
| Angle α | 30 |
| Angle de balayage ψ | 20 |
| F/D | 1 |
| Le rapport focal β | 1.001 |

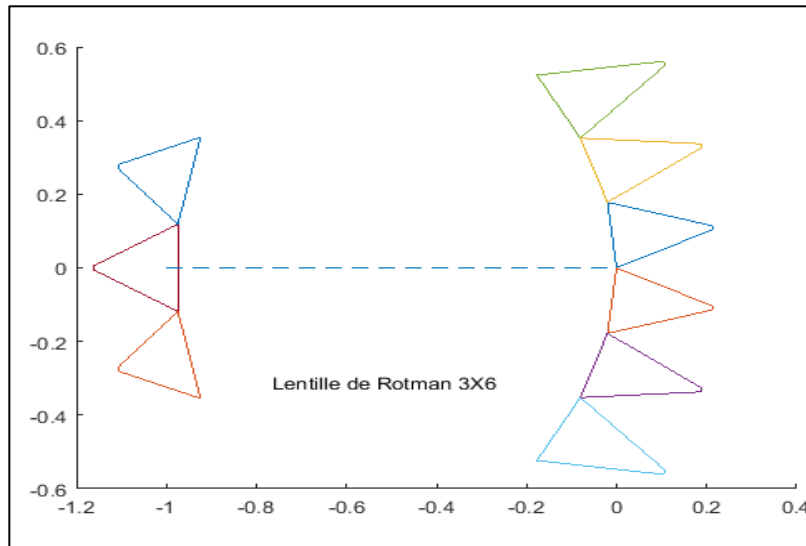


Figure III.7 : Un exemple d'une lentille 3X6 sous Matlab.

III.3.1 Effet de l'angle α sur la géométrie de la lentille de Rotman

On suppose que tous les paramètres cités dans le Tableau III.2 soient fixes alors on va varier seulement l'angle focal α . Les structures trouvées sont illustrées dans la Figure III.8.

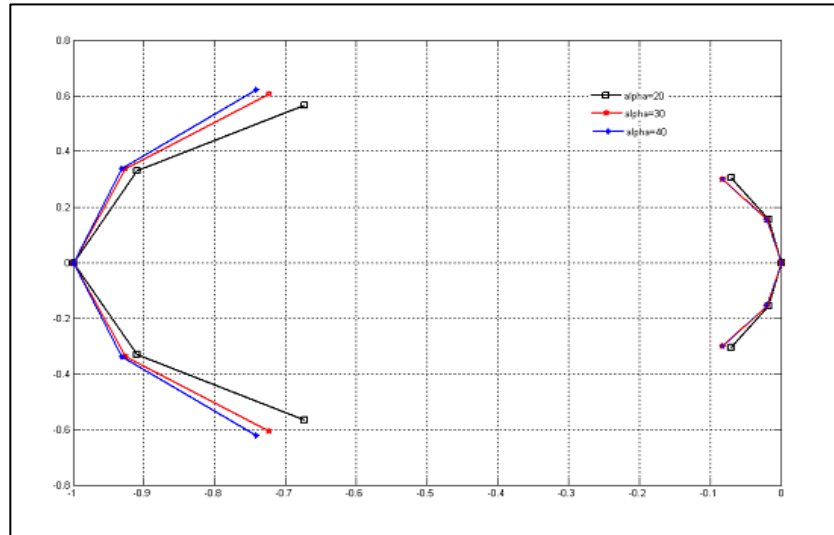


Figure III.8 : Effet de α sur la géométrie de la lentille.

Comme celle est illustrée dans la Figure III.8, si l'angle focal α diminue, le contour du faisceau se rétrécit vers le centre et le contour de réception devient beaucoup plus plat.

III.3.2 Effet de paramètre θ sur la géométrie de la lentille de Rotman

De même que l'exemple précédent, on va varier l'angle θ , alors que toutes les autres variables sont fixes (Tableau III.2). On prend trois cas possibles ($\theta = 20^\circ$, $\theta = 30^\circ$ et $\theta = 40^\circ$).

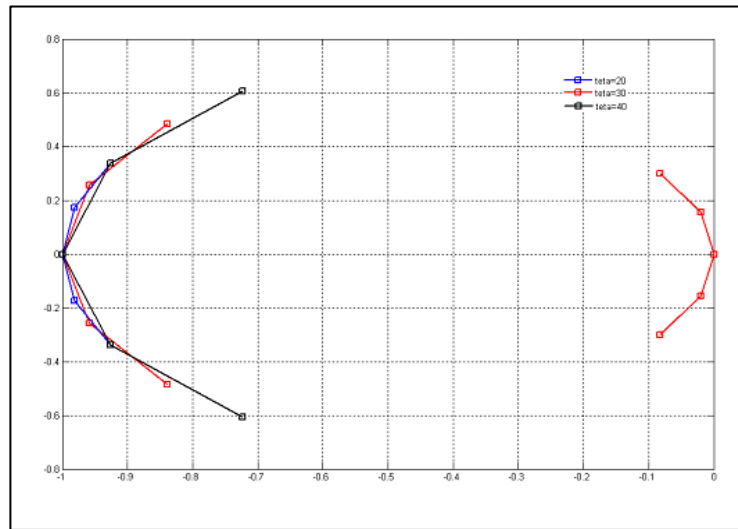


Figure III.9 : Effet de θ sur la géométrie de la lentille.

La Figure III.9 montre que l'angle maximal sous-tendu n'affecte que sur les contours d'entrées, Alors que les contours de sortie restent invariables.

De même, comme on a vu sur la Figure III.9, l'angle θ a un effet sur les positions des ports d'entrée de contour d'entrée.

III.3.3 Effet de paramètre g sur la géométrie de la lentille de Rotman

Dans le même sens, on va varier le rapport focal g , alors que toutes les autres variables sont fixes (Tableau III.2). On prend quatre cas possibles ($g = 1.03$, $g = 1.06$, $g = 1.09$ et $g = 1.16$).

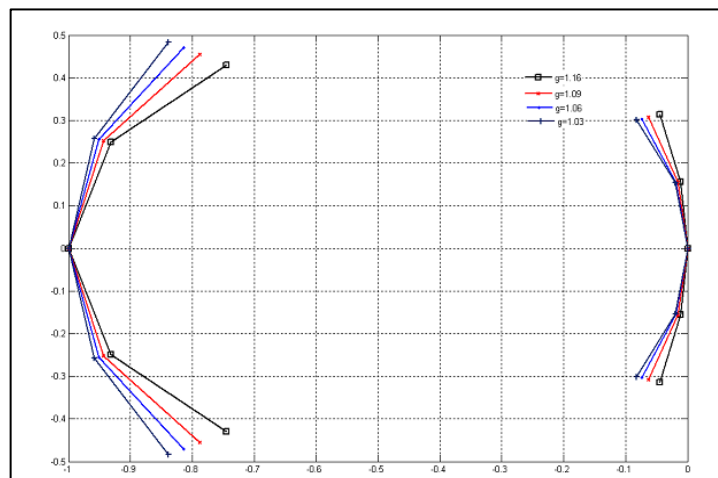


Figure III.10 : Effet du rapport focal sur la géométrie de la lentille.

D'après les résultats de la Figure III.10, on constate que le rapport focal affecte sur les deux contours d'entrée et de sortie. D'où chaque augmentation dans la valeur de g va produire un étalement dans le contour du faisceau et un rétrécissement dans le contour de faisceau.

Note : Dans la littérature, le rapport focal g est considéré comme un paramètre d'optimisation le plus utilisé pour minimiser l'erreur de phase. La valeur optimale est liée directement à l'angle focal par $g = 1 + \frac{\alpha^2}{2}$

III.4. Conception de la lentille

On prend une lentille de Rotman avec la configuration 4X4 comme suit :

- Quatre ports d'entrée
- Quatre ports de réseau (de sortie)
- Deux ports factices (Dummy ports).

Les spécifications de la lentille de Rotman sont tabulées dans le tableau suivant:

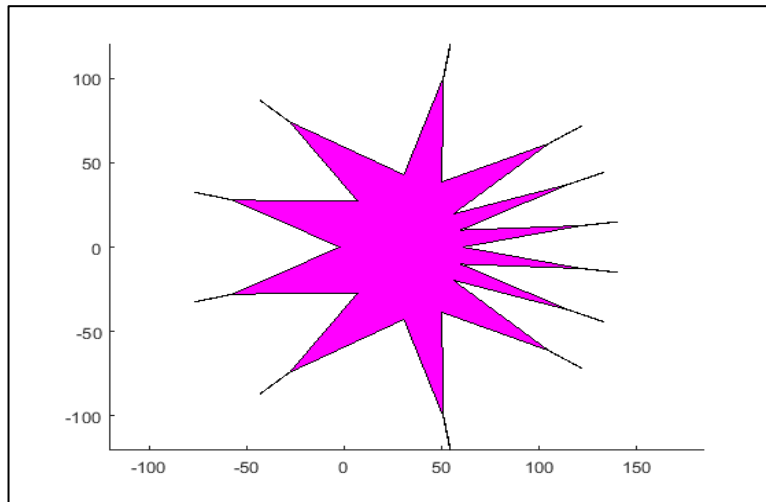
Tableau III.3: Quelques paramètres utilisés au Matlab pour construire la lentille montrée dans la Figure III.11

| Les paramètres du code Matlab | Valeur |
|------------------------------------|-------------------------|
| Fréquence de fonctionnement f_0 | 10 GHz |
| Angle de balayage du réseau | $\psi = \pm 40^\circ$ |
| Angle focale | $\alpha = \pm 40^\circ$ |
| Rapport focal | $g = 0.9$ |
| Facteur d'expansion | $\gamma = 1.0$ |
| Espacement des éléments d'antennes | $d = \lambda_0/2$ |
| Distance focale sur l'axe | $f_1 = 3\lambda_0$ |

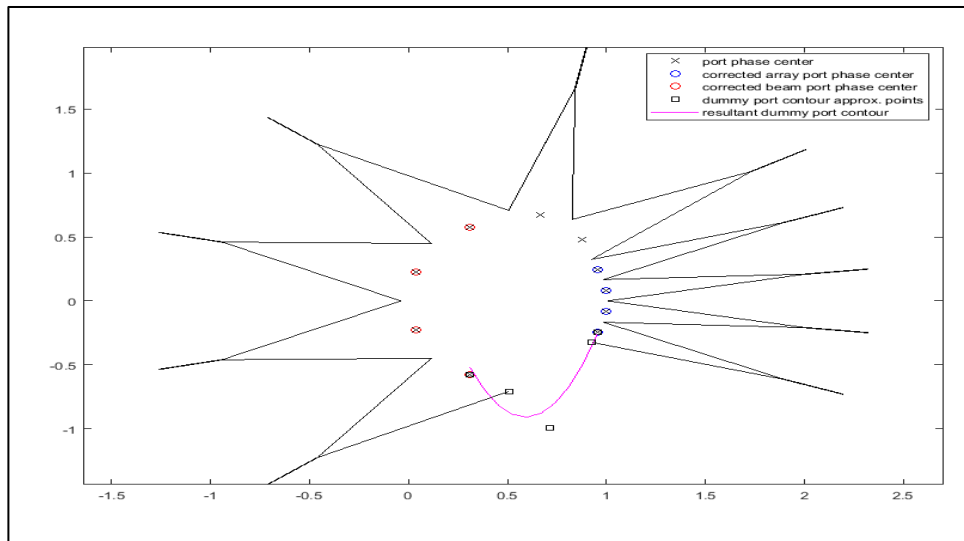
III.4.1 Variation de la distance focale (f_1)

On va prendre trois cas ($f_1 = 3\lambda_0, f_1 = 5\lambda_0$ et $f_1 = 8\lambda_0$), les autres paramètres sont fixes (voir Tableau III.3)

- **Pour une distance focale $f_1 = 3\lambda_0$**



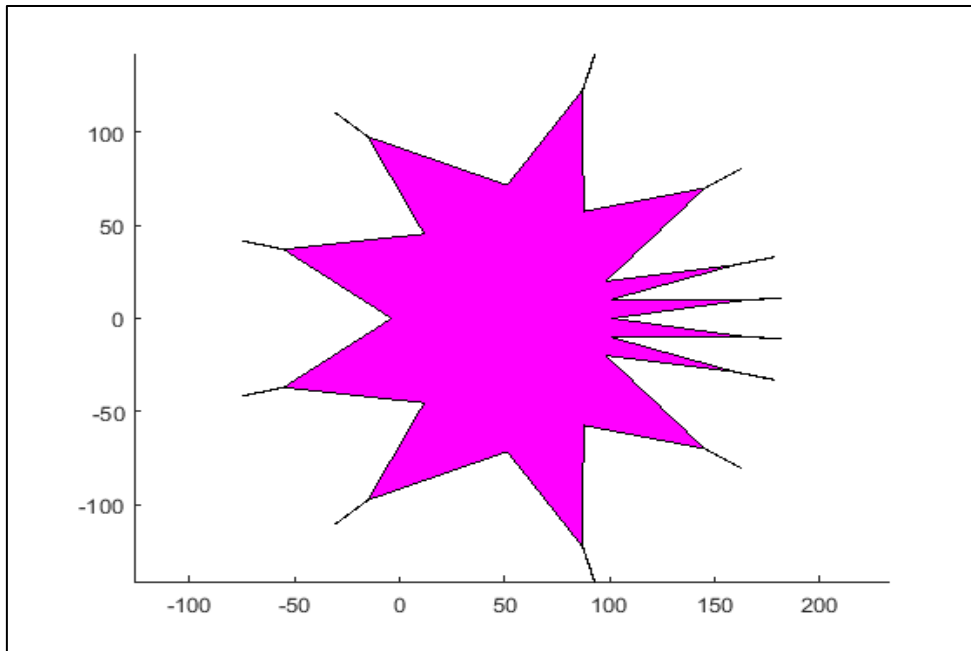
(a) : La lentille de Rotman générée par Matlab suivant les spécifications montrées en Tableau III.3



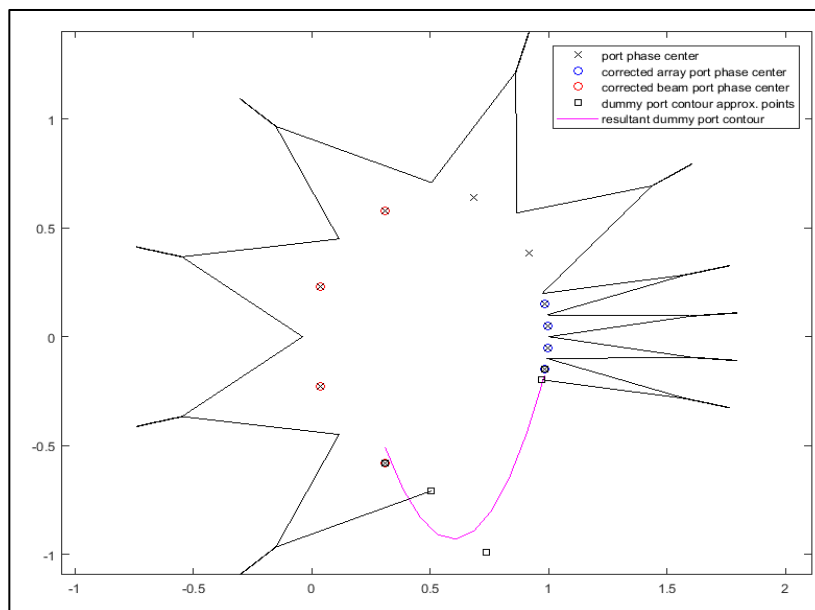
(b) : Visualisation du contour de la lentille pour des points spécifiques en fonction de λ
Figure III.11: La lentille de Rotman construite par Matlab avec $f_1=3\lambda_0$.

- Pour une distance focale $f_1=5\lambda_0$

On suppose que toutes les variables soient fixes alors on va varier seulement la distance focale f_1 . La lentille construite est illustrée dans la Figure III.12.



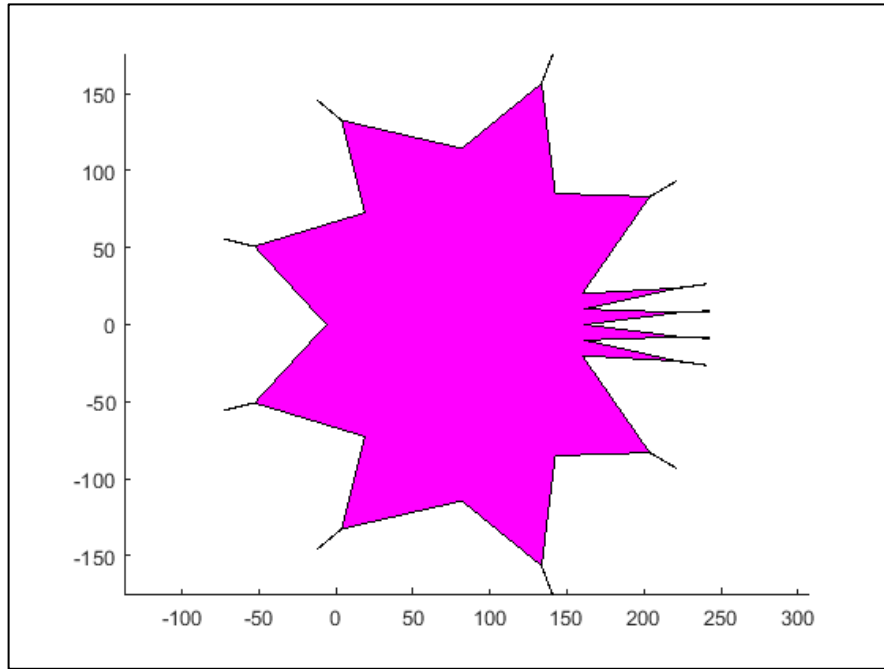
(a) : La lentille de Rotman générée par Matlab suivant les spécifications montrées en Tableau III.3.



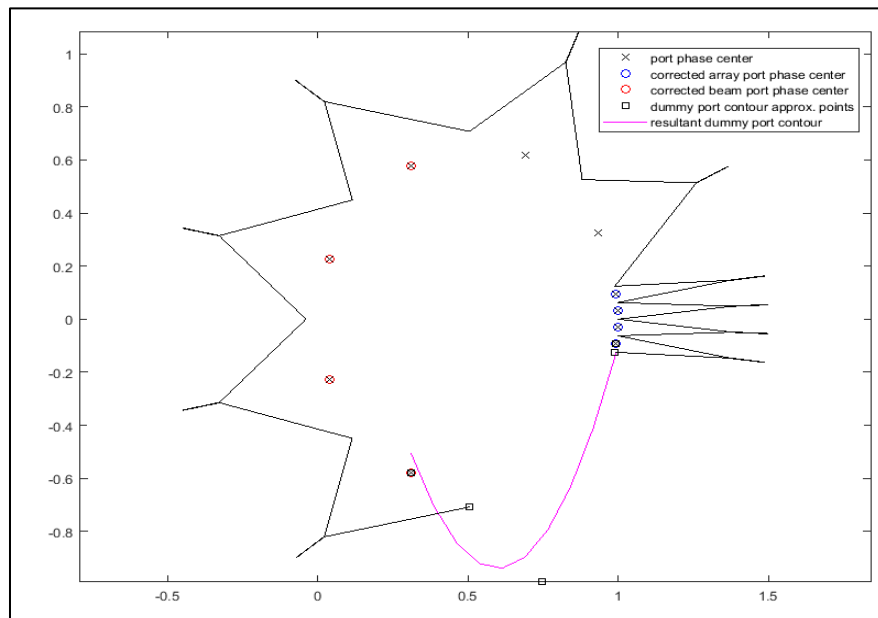
(b) : Visualisation du contour de la lentille pour des points spécifiques en fonction de λ
Figure III.12: La lentille de Rotman construite par Matlab avec $f_1=5\lambda_0$.

- **Pour une distance focale $f_1=8\lambda_0$**

De même que celle précédente, on va prendre les mêmes valeurs reportées en Tableau III.3, avec une distance focale $f_1=8\lambda_0$. La lentille résultante est présentée dans la Figure III.13.



(a) : La lentille de Rotman générée par Matlab suivant les spécifications montrées en Tableau III.3.

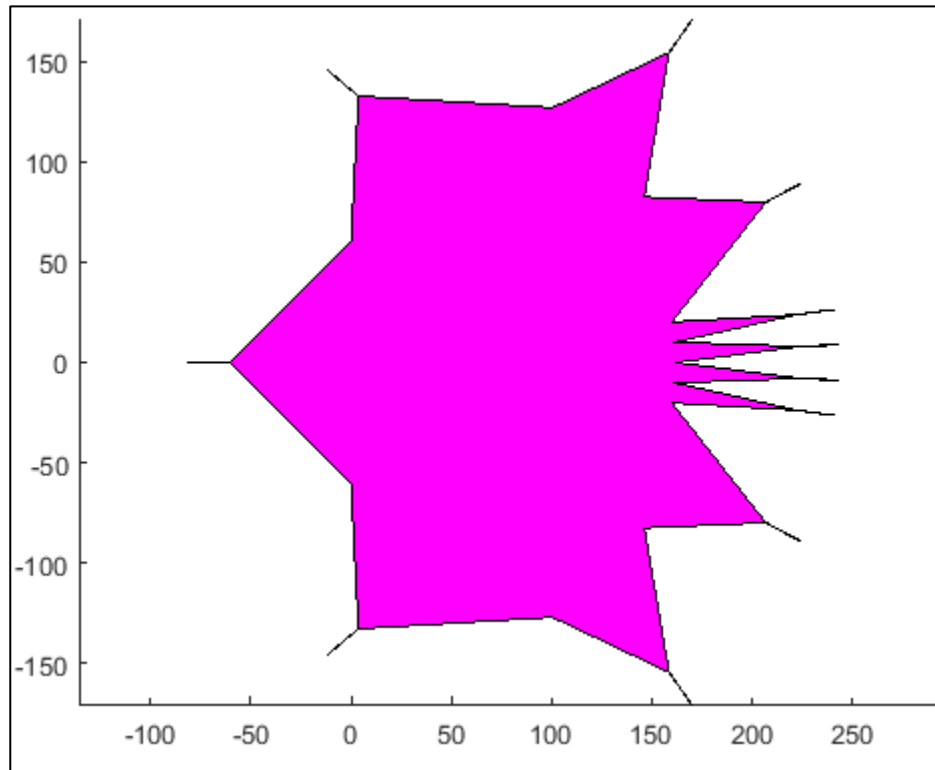


(b) : Visualisation du contour de la lentille pour des points spécifiques en fonction de λ
Figure III.13 : La lentille de Rotman construite par Matlab avec $f_1=8\lambda_0$

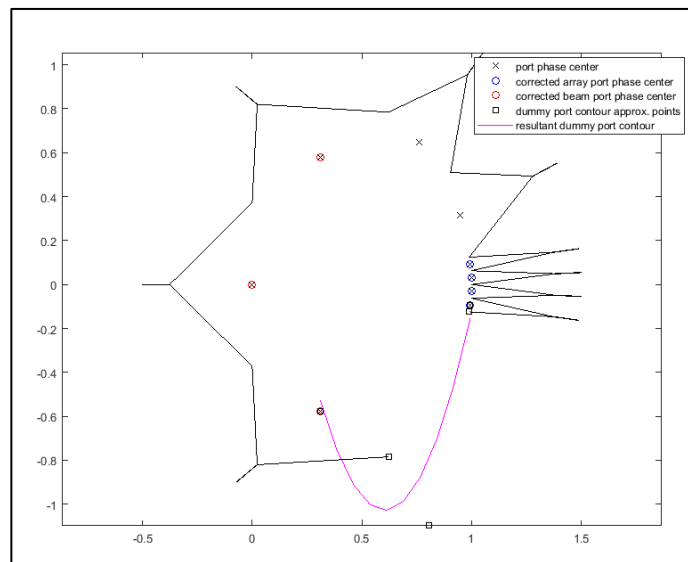
III.4.2 Variation du nombre de faisceaux ($N_b=3$ et $N_b=6$)

- Pour $N_b=3$

On suppose que toutes les variables soient fixes alors on va varier seulement le nombre de faisceau N_b . Les résultats trouvés sont illustrés dans la Figure III.14.



(a) : la lentille de Rotman

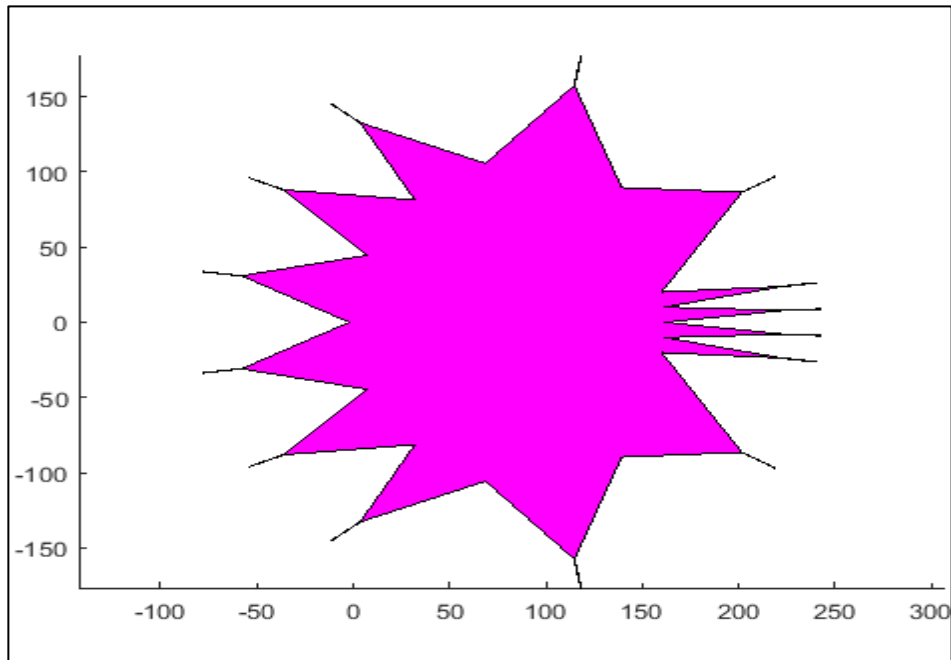


(b) : Le contour de la lentille

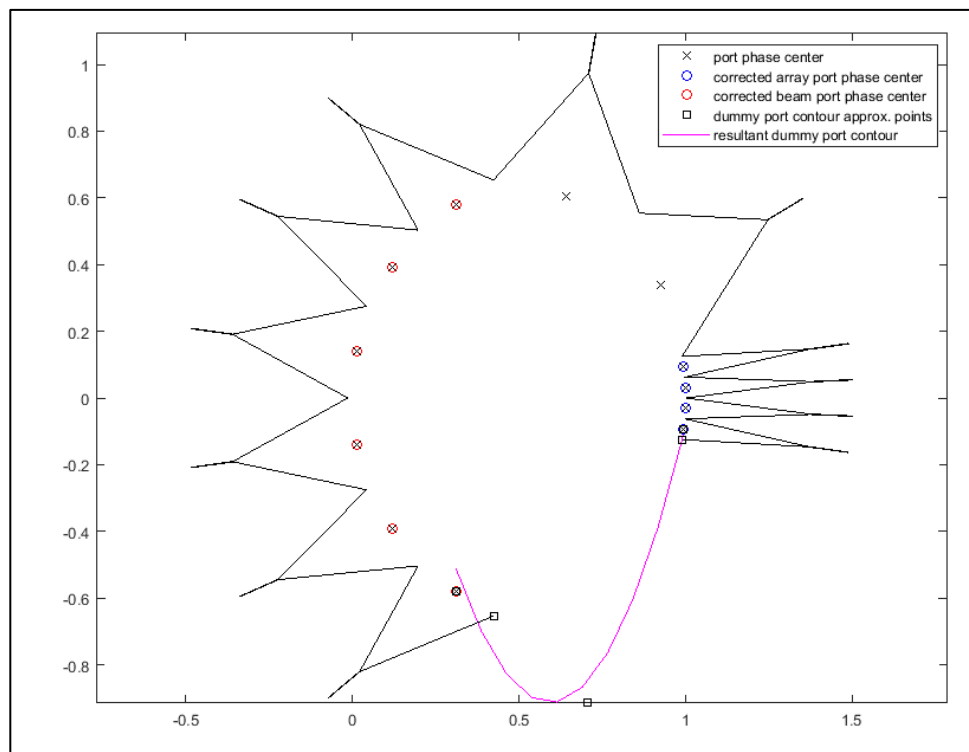
Figure III.14: La lentille conçue pour $N_b=3$.

- Pour $N_b=6$

Les résultats trouvés sont illustrés dans la Figure III.15



(a) : La lentille de Rotman construite



(b) : Contour de la lentille construite

Figure III.15 : La lentille conçue pour $N_b=6$.

Il est important de noter que les réflexions multiples diminuent considérablement si les ports factices pointent vers le milieu des ports du réseau et le contour des ports du faisceau. De plus, les orientations des ports factices à l'intérieur du mur sont très importantes pour concevoir la lentille Rotman en utilisant les simulateurs

full-Wave (CST, Remcom). Pour réduire la taille de la lentille de Rotman, le rapport F/D est choisi unité ($F/D=1$), c'est-à-dire les dimensions du réseau est de la distance focale de la lentille. De même, l'angle focal est choisi identique celle de balayage maximum ($\psi = \alpha$).

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une étude analytique et paramétrique sur la lentille de Rotman. On a également vu une comparaison entre les différents types de la lentille de Rotman, ce qui nous permis de choisir la lentille trifocale pour faire la conception. Cette lentille a une erreur de phase minimale que les autres types (quadri-focale et non-focale). Dans le chapitre suivant, on va voir un modèle conçu de la lentille de Rotman en utilisant un simulateur EM full-Wave (HFSS, Remcom).

Chapitre IV
La conception d'une
lentille de Rotman
imprimée.

IV.1 Introduction

Après une étude analytique et paramétrique de la lentille de Rotman dans les chapitres précédents, on a une idée sur l'effet des différents paramètres physiques sur les caractéristiques d'une lentille de Rotman.

Dans ce dernier chapitre, On va voir la conception d'une lentille de Rotman en utilisant deux simulateurs EM (Ansoft HFSS et la validation du résultat par un projet sur le simulateur Remcom). La conception sera faite pour une lentille de configuration 8X8 sur la gamme 8-11.2 GHz. On mentionne que la fréquence opérationnelle est 9.6 GHz. Ce que nous permet d'obtenir la conception finale de la lentille de Rotman.

IV.2 Choix de l'outil de simulation

Il existe un grand nombre des simulateurs électromagnétique consacrés pour la conception des différents circuits microondes passifs et actifs (Antennes, filtres RF, des coupleurs, des diviseurs de puissance et des autres). Parmi ces simulateurs, on peut citer le FEKO, Ansoft Designer, CST studio, ADS Momentum, Remcom et l'Ansoft HFSS.

On va voir dans ce mémoire, un modèle conçu de la lentille de Rotman avec le HFSS et avec le Remcom pour une conception d'une lentille de Rotman déjà existe. Cette étude nous a permet de voir une conception finale de la lentille de Rotman 8x8.

IV.3 Le simulateur Remcom

IV.3.1 Introduction

Ce logiciel est également connu sous le nom de XFDTD, c'est un solveur électromagnétique tridimensionnel (3D) full-wave basé sur la méthode de différence de domaine temporel finie. Depuis 1994, Remcom propose des solutions électromagnétiques puissantes et abordables. Ce logiciel de simulation est très utilisé pour les domaines académiques et universitaires, industriels et gouvernementaux. XFDTD 7 est un ajout exceptionnel à notre gamme de produits logiciels avec de nombreuses nouvelles fonctionnalités. Alors que XFDTD a ses racines dans la simulation des téléphones, les utilisations actuelles du logiciel ont atteint des marchés aussi divers que la chimie, l'optique, la pénétration du sol radar et appareils biomédicaux, en plus de la diffusion sans fil, des circuits micro-ondes et du radar applications [44].

L'interface de ce simulateur est illustrée dans la Figure IV.1.

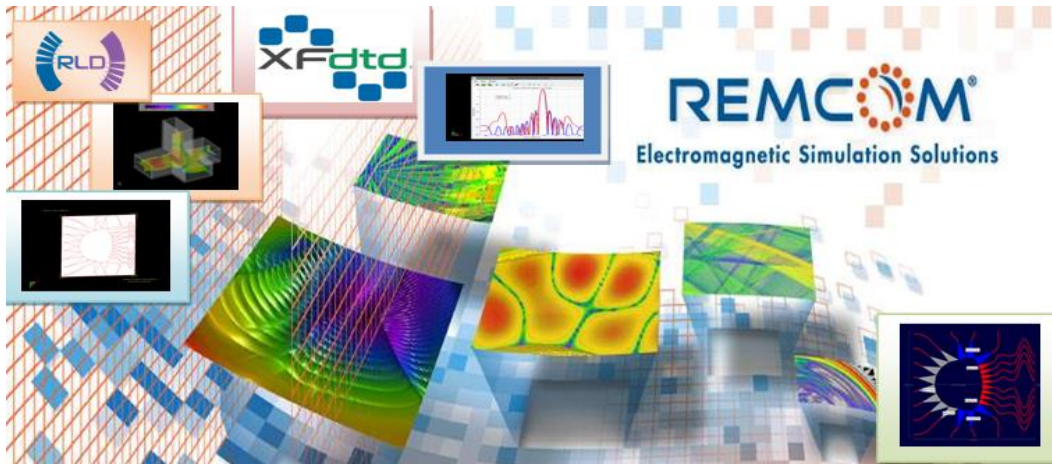


Figure IV.1: Une interface graphique du simulateur Remcom.

IV.3.2 Les produits du logiciel Remcom

Les quatre produits Remcom, sont conçus pour fonctionner ensemble pour fournir des résultats complets et précis. De nos solutions logicielles de simulation EM de classe mondiale au conseil personnalisé, Remcom fournit une expertise électromagnétique pour nous faire gagner du temps et réduire nos coûts [45].

IV.3.2.1 Solveur XFDTD full-Wave

Le XFDTD est un solveur de simulation électromagnétique 3D qui fournit aux ingénieurs des outils puissants et innovants pour la modélisation et la simulation de champ EM. Les options de performance sont : accélération GPU (jusqu'à 500x speedup), multiprocesseur, MPM, 64 bits. Les applications EM sont nombreuses, notamment l'analyse des antennes, des circuits, des guides d'ondes, la diffusion, les EMI / CEM, l'analyse biomédicale, les matériaux spéciaux, etc. [45].

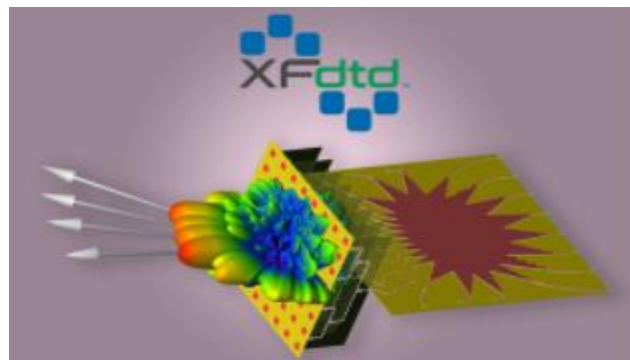


Figure IV.2 : Logo de simulateur XFDTD [45].

Parmi les applications de logiciel XFDTD, on peut citer : la conception des performances et sécurité des antennes, ce qui permet d'analyser les performances de l'antenne et optimiser l'emplacement des communications, des capteurs ou du brouillage. Calcul de débit d'absorption

spécifique (DAS) pour les téléphones portables [45].

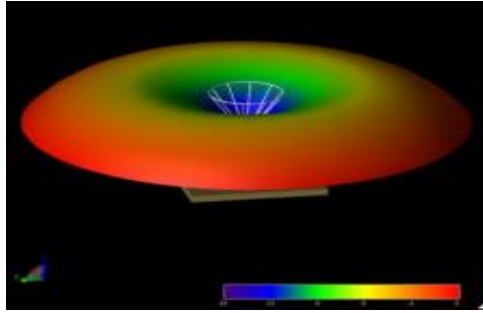


Figure IV.3: Capteur de sol sans Surveillance [45].

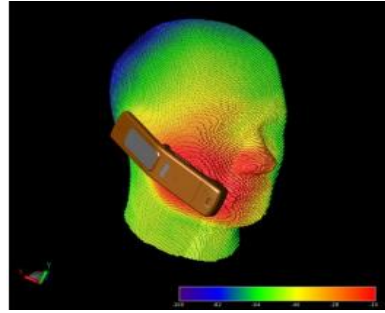


Figure IV.4 : Téléphone portable (Conformité aux normes de sécurité) [45].

IV.3.2.2 InSite sans fil

L'Insite est un logiciel d'analyse de propagation radio pour analyser l'effet de l'environnement physique sur les performances des systèmes de communications sans-fil. Les applications vont de la défense militaire aux communications commerciales [45].



Figure IV.5 : Logo de simulateur InSite sans fil [45].

Parmi les applications de ce simulateur, on cite la modélisation détaillée des canaux intérieurs avec diffusion diffuse pour les réseaux sans fil 5G à ondes millimétriques. Cette méthode présente la capacité de diffusion de Wireless InSite. Un environnement de bureau intérieur est utilisé pour montrer les effets clés spécifiques de la diffusion, y compris son impact sur la réponse impulsionnelle complexe et l'augmentation de la polarisation croisée des signaux reçus [45].

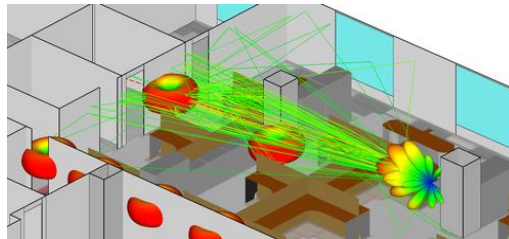


Figure IV.6: Analyse des ondes millimétrique en intérieur par InSite sans fil [45].

IV.3.2.3 Solveur haute fréquence XGtd

Ce logiciel est basé sur GTD / UTD haute fréquence pour la conception et analyse de systèmes d'antennes sur des objets complexes tels que des véhicules et des avions [45].



Figure IV.7: Logo de simulateur XGTD [61].

Parmi les applications de ce simulateur, on montre l'exemple de navette. Cet exemple démontre les capacités de XGtd à importer la géométrie à partir de fichiers CAO puis calculer la puissance reçue et les diagrammes de rayonnement d'antenne de zone champs lointain pour un émetteur situé dans les navettes spatiales [45].

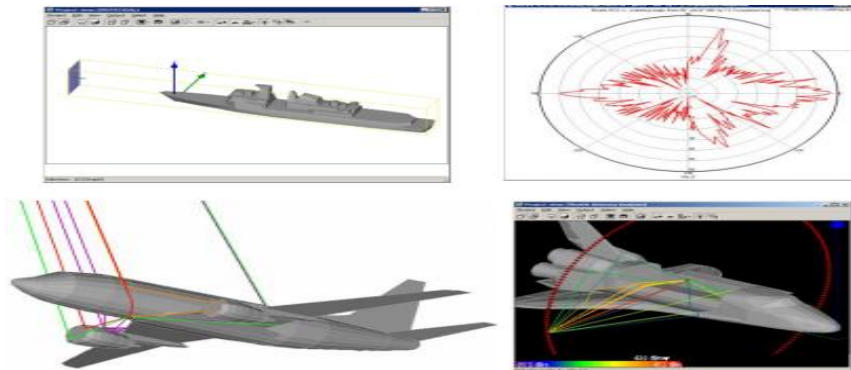


Figure IV.8:Exemple de navette par XGTD [45].

IV.3.2.4 Logiciel de simulation de Radar Automobile WaveFarer

Le WaveFarer est un simulateur radar d'haute-fidélité. Il est très utilisé pour la modélisation de scénarios de conduite à des fréquences allant jusqu'à 100 GHz et au-delà. Les méthodes de propagation et de diffusion en champ proche calculent les retours radar bruts des objets cibles tout en tenant compte des interactions multi-trajets des réflexions au sol et d'autres structures [45].



Figure IV.9: Logo de simulateur WaveFarer [45].

Parmi les applications de ce simulateur, on peut citer : le Scénarios de test de conduite. La simulation de retours radar bruts à partir d'un ensemble de scénarios permet de mieux comprendre un

algorithme de conception, d'identification de cible sans installer des prototypes et prendre des mesures [45].

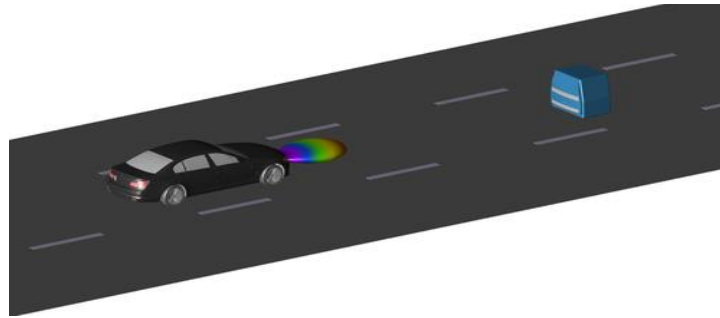


Figure IV.10 : Scénarios de test de conduite par WaveFarer [61].

IV.4 La conception d'une lentille de Rotman avec Remcom

La conception (ou le design) d'une lentille de Rotman dans un logiciel de simulation consiste à réaliser nombreuses étapes (*design flow*) nécessaires pour concevoir correctement et sans erreurs cette lentille.

Le concepteur de la lentille de Rotman (RLD), est un outil de haut niveau pour concevoir la lentille de Rotman micro-ruban ou imprimée. Les calculs de l'outil sont basés sur la théorie de la géométrie optique combinée avec les équations de conception des lentilles développées par Rotman et d'autres [46-47]. L'outil RLD peut produire rapidement une conception de lentille réglée à partir d'un ensemble de paramètres de conception. On peut le considérer comme une version interactive d'une conception par le Remcom standard. La forme finale d'une lentille est générée avec des couleurs appropriées (les ports factices en couleur bleu, les ports d'entrée en gris alors que les ports de faisceaux sont en rouge), la géométrie de la ligne de transmission (coloré en rouge). La figure IV.11 montre une lentille avec l'outil RLD. Une analyse approximative de la géométrie des ports absorbants et génère des fichiers de géométrie à importer dans XFDTD [45].

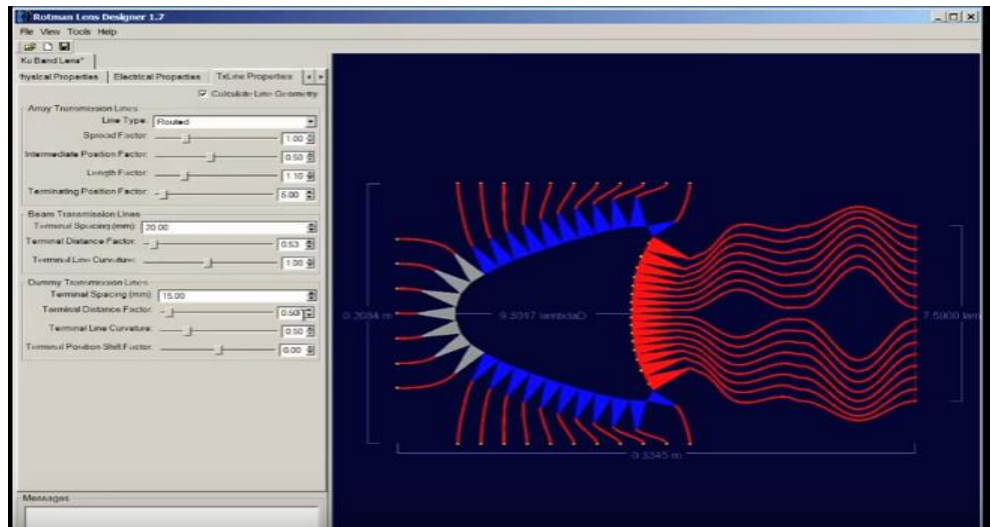


Figure IV.11 : Une lentille de Rotman générée dans RLD [45].

Comme le concepteur RLD est non disponible pour nous, on va utiliser un projet d'une lentille de Rotman sous le Remcom [48] et l'exporter dans un fichier.SAT pour l'utiliser dans un autre logiciel et pour faire la comparaison avec les résultats trouvés par l'outil RLD.

La lentille de Rotman conçue a une fréquence centrale de 9,6 GHz et une bande passante de 1,6 GHz. L'angle de balayage est de 40 degrés avec un espacement des éléments de sortie de 0,46431 longueurs d'onde (distance de séparation entre les éléments du réseau de sortie).

La lentille est imprimée sur un substrat Rogers RO3003 de permittivité 3et tangente de pertes de 0.0013 dans la gamme 8-40 GHz et d'épaisseur $h=0.508$ mm.

La configuration de la lentille est de 8X8, où le nombre de ports de faisceau et de ports réseau sera fixé à 8 entrées, 8 sorties et 6 ports factices (3 en haut et 3 en bas). La lentille de Rotman est réglée pour de bonnes performances dans le logiciel XFtd [45].

La Figure IV.12 montre une lentille de 8x8 créée par XFtd avec les ports de faisceau à gauche et les ports de réseau à droite. En haut et en bas, on trouve les ports factices attachés aux parois latérales qui sont destinés pour diminuer le couplage mutuel dans la lentille [45].

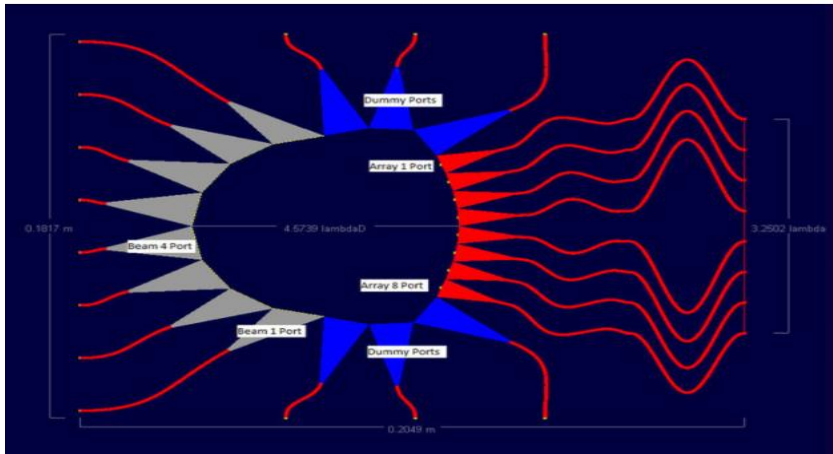


Figure IV.12 : Une lentille de Rotman générée dans le RLD.

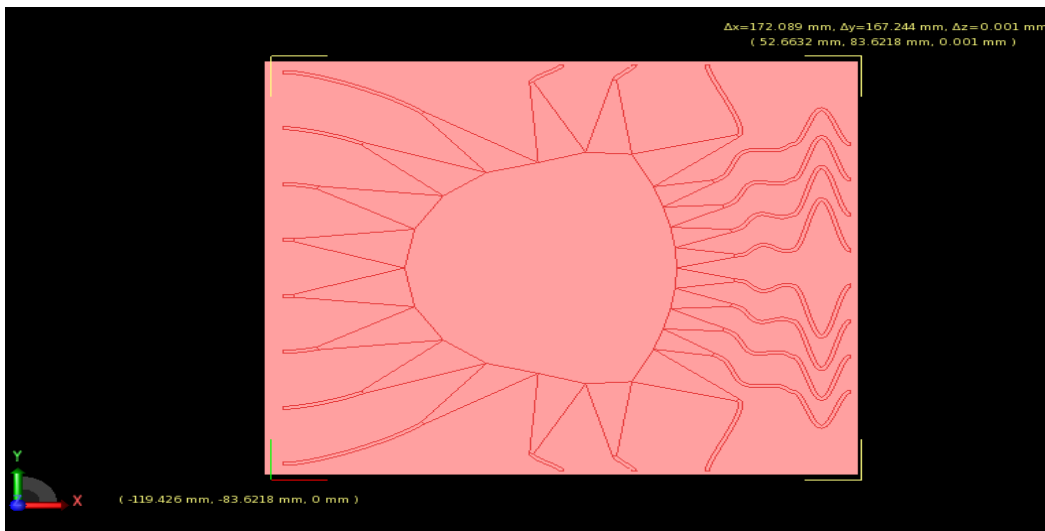


Figure IV.13 : Une lentille de Rotman avec les dimensions réelles générée dans le Remcom.

Des simulations ont été effectuées sur la lentille pour déterminer le diagramme de rayonnement (facteur de réseau) possible pour différents déphasages. On suppose que tous les ports d'excitation sont utilisés sans déphasage de sorte que tous les diagrammes de rayonnent d'un réseau d'antennes est orienté vers la direction (0°) pour le cas d'une alimentation uniforme.

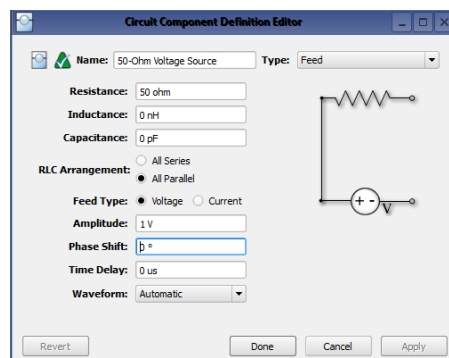


Figure IV.13 : Port d'excitation est supposé sans déphasage.

- **Le port 1 actif**

La simulation est lancée pour que le quatrième port de faisceau est actif, le diagramme de rayonnement résultant est illustré pour les deux outils (XFDTD, RLD) :

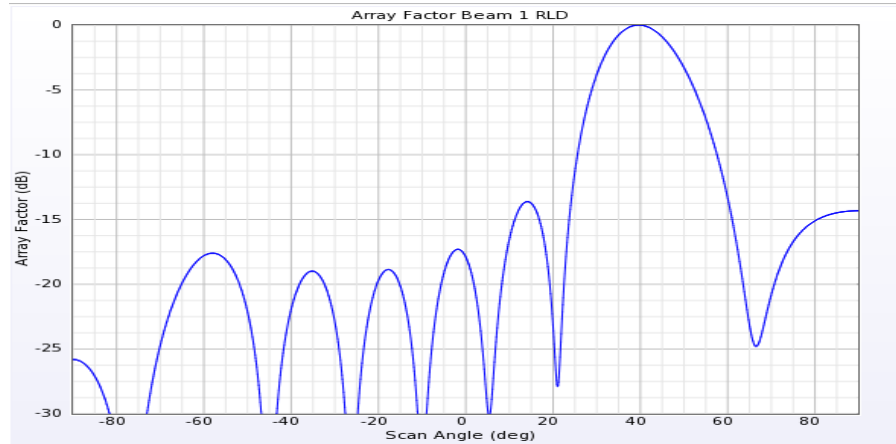


Figure IV.15 : Facteur de réseau résultant par RLD.

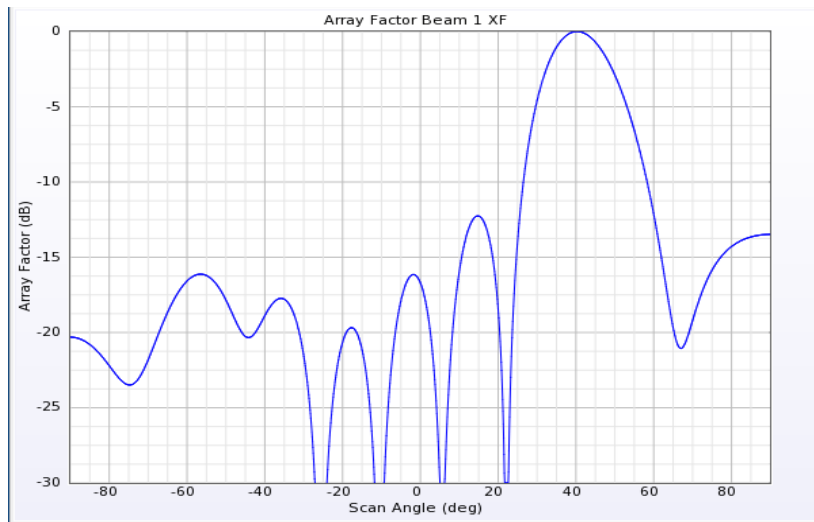


Figure IV.16 : Facteur de réseau résultant par XFDTD

Les Figures IV.15 et IV.16 présentent les facteurs de réseaux résultant par RLD & XFDTD. On observe que les résultats sont presque identiques où le lobe principal est orienté vers 40° , malgré que les ports d'excitation ne soient pas la source de ce déphasage. Le nombre des lobes secondaire est le même pour les deux outils de simulation (on a six lobes) avec un niveau de lobes secondaires de -13dB. L'ouverture à mi-puissance est environ de 14° pour les deux cas.

- **Le Port 4 actif**

La simulation est lancée pour que le quatrième port de faisceau est actif, le diagramme de rayonnement résultant est illustré pour les deux outils (XFDTD, RLD):

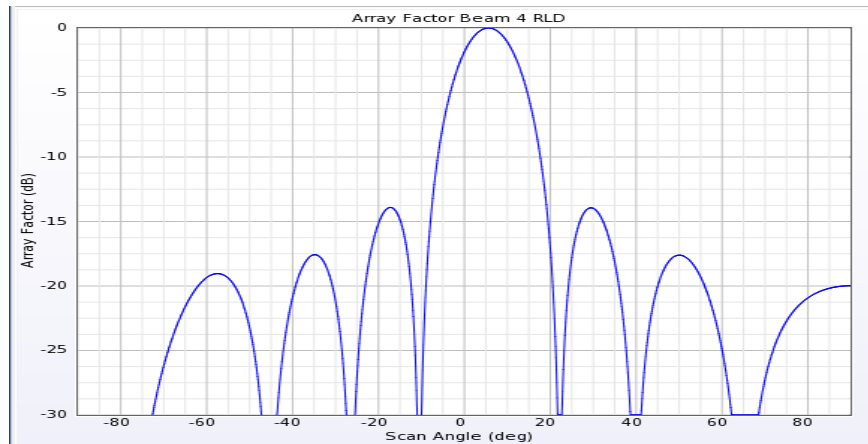


Figure IV.16 : Facteur de réseau résultant en utilisant RLD.

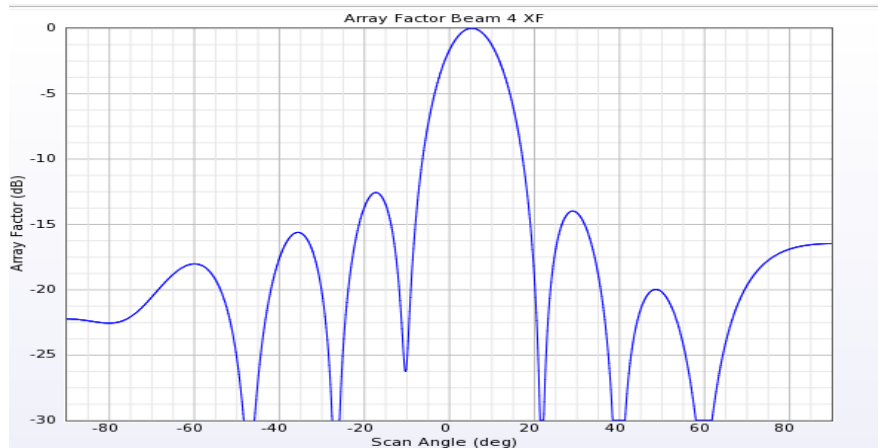


Figure IV.17 : Facteur de réseau résultant par XFtdt.

Les figures au-dessus présentent les facteurs de réseaux résultant par RLD & XFtdt. On observe que les résultats sont presque identiques où le lobe principal est orienté vers 5°. Le nombre des lobes secondaire est le même pour les deux outils de simulation (on a six lobes) avec un niveau de lobes secondaires de -13dB.

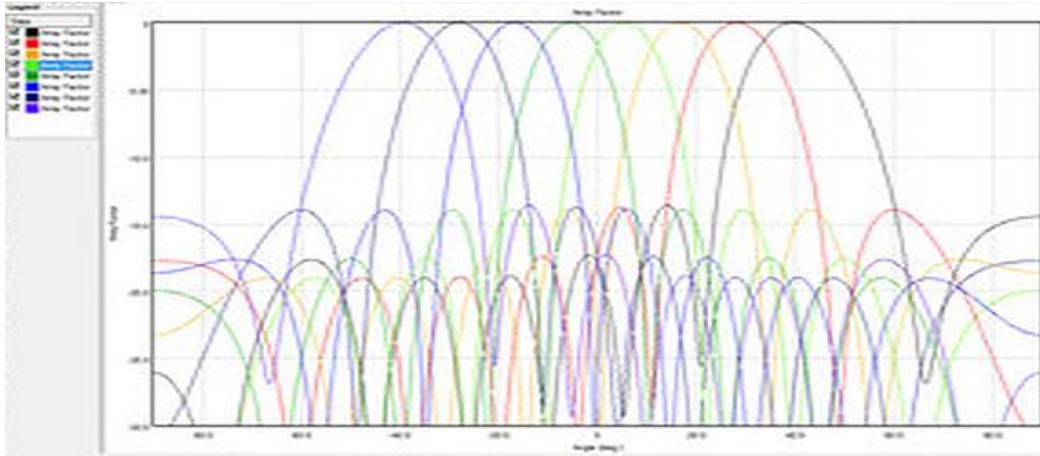


Figure IV.18 : Facteur de réseau résultant par RLD pour différents déphasages [45].

La Figure IV.18 présente les diagrammes de rayonnement des 8 ports de sortie (8 faisceaux) produits par la lentille conçue dans le logiciel RLD. L'angle de balayage maximal du faisceau est de +/- 40 degrés, ce qui est généré par les ports 1 et 8 du côté d'entrée.

IV.5 Simulation avec HFSS

La conception initiale a simplement été vérifiée dans l'environnement de conception Ansoft HFSS. Les lignes micro-ruban ont été terminées par les ports de discret ; les ports de faisceau 1-8 et les ports de sortie 9-16. Les ports factices ont été terminés par des charges adaptées.

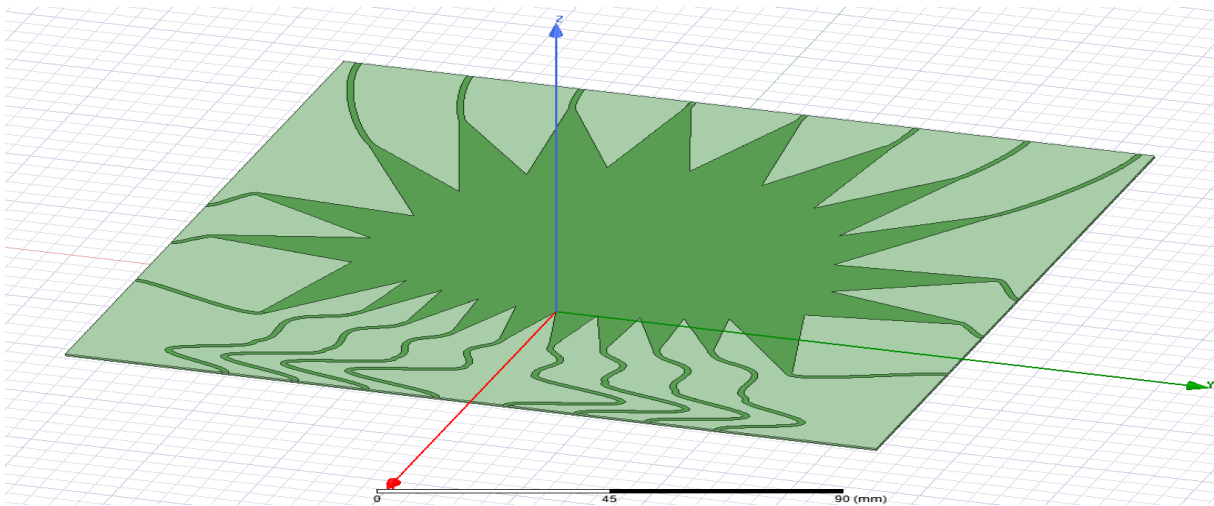


Figure IV. 19 : La structure de la lentille de Rotman dans l'environnement HFSS Design.

Dans la conception avec les autres simulateurs

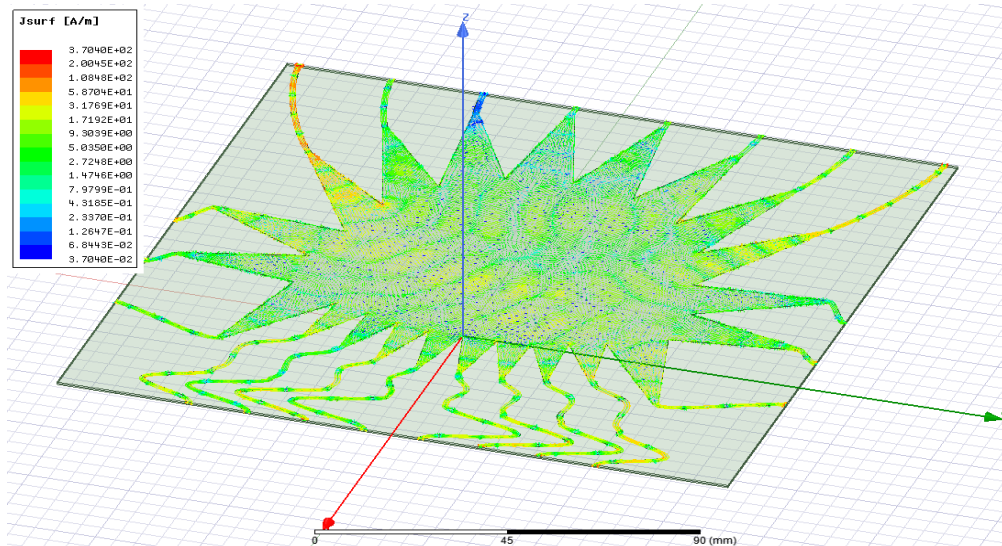


Figure IV. 20 : La distribution du courant sur la surface de la lentille de Rotman dans le HFSS pour la fréquence 9.6 GHz.

Les régions en rouge sur la lentille sont des positions où le courant surfacique est très élevé pour la fréquence mentionnée au-dessus par contre les régions en bleu ont des courant surfacique très faible.

Comme illustré, le port 1 qui avait les surfaces en rouge, ce qui explique clairement que le port 1 est actif (voir la Figure IV.12 pour connaître l'emplacement du port 1).

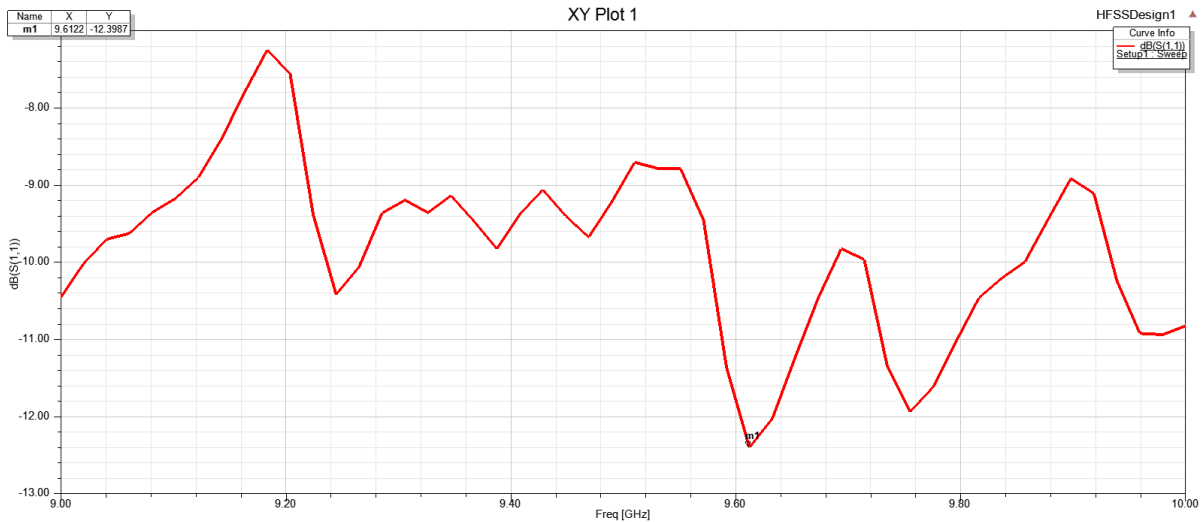


Figure IV. 21 : Le coefficient de réflexion S11 pour la lentille montrée en Figure IV.19.

La figure IV.21 montre le coefficient de réflexion S11 pour le quel le port 1 est alimenté alors que les autres ports sont adaptés. Comme on a déjà vu, la lentille présente une bonne adaptation à la

fréquence 9.6 GHz où elle avait un S11 moins que -12dB.

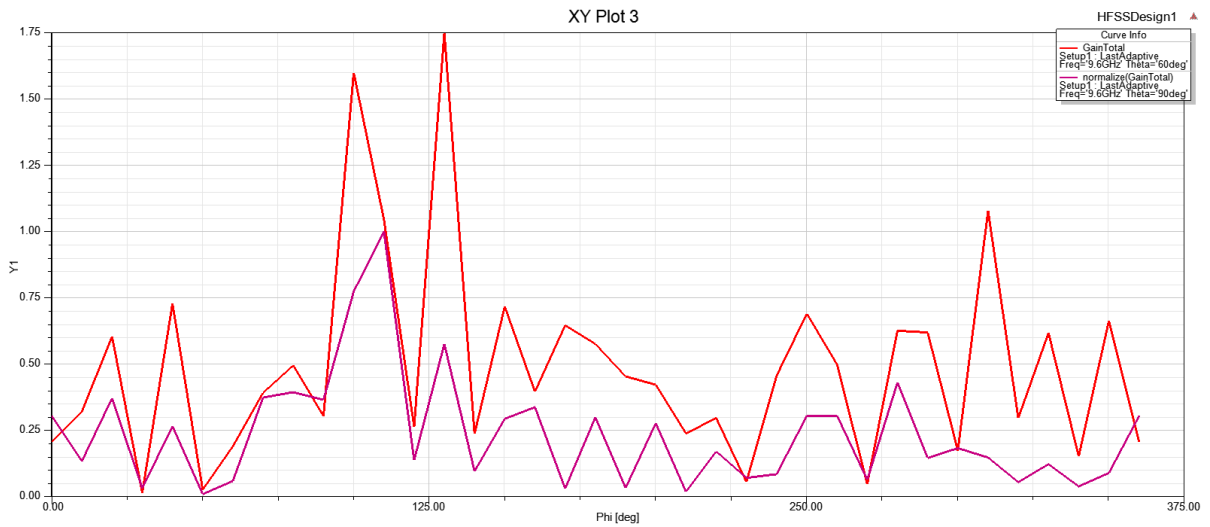


Figure IV.22:Le diagramme de rayonnement cartésien pour la fréquence 9.6 GHz pour le cas port 1 actif

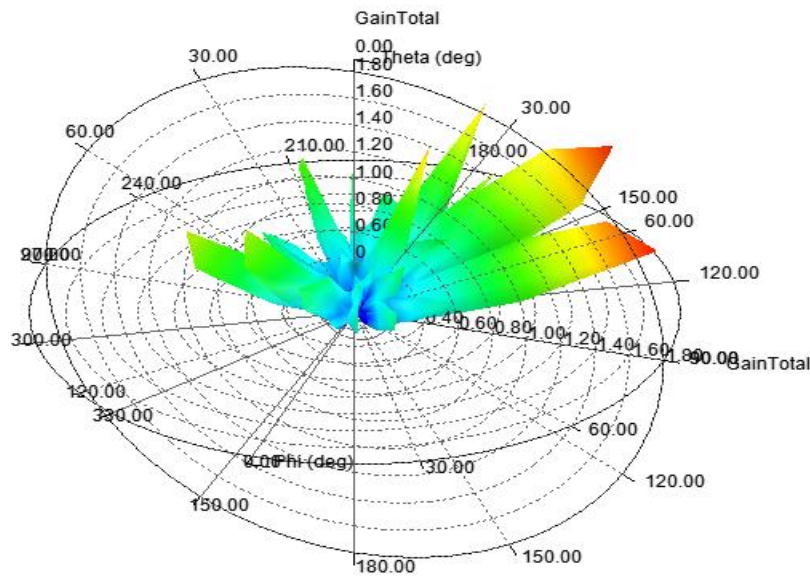


Figure IV.23 : Le diagramme de rayonnement en 3D pour la fréquence 9.6GHz

Le diagramme de rayonnement en 3D à la fréquence 9.6 GHz. Le premier port est alimenté alors que les autres ports sont connectés à une charge adaptée.

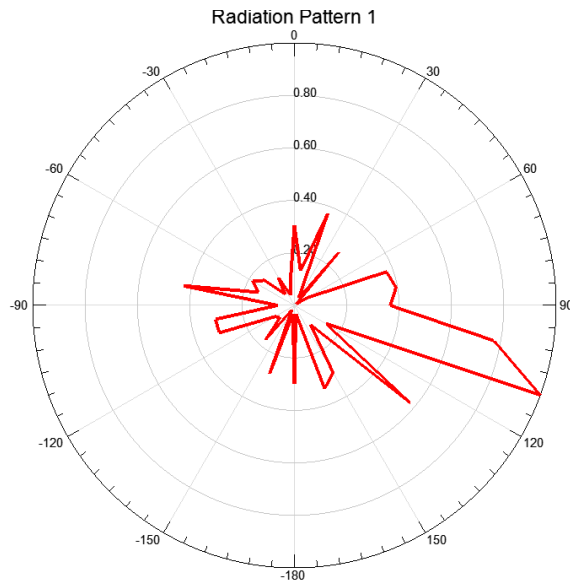


Figure IV.24 : Le diagramme de rayonnement polaire pour la fréquence 9.6GHz au plan $\phi=90^\circ$

Le diagramme montré à la Figure IV.24 est pour le faisceau 1 pour le cas où le port 1 est actif, voir que le faisceau est orienté vers 110°

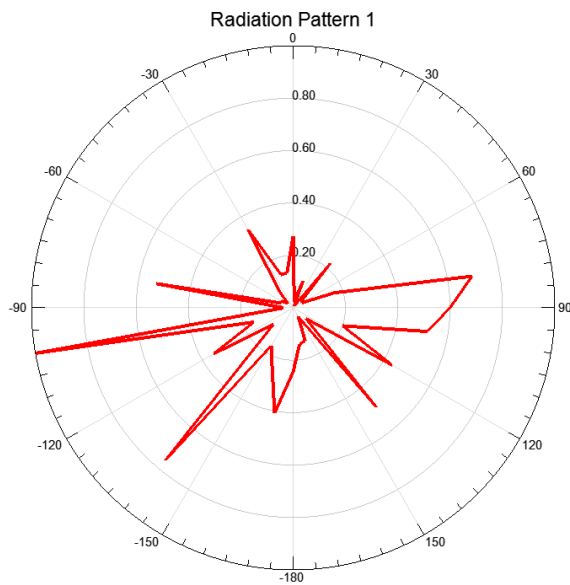


Figure IV.25 : Le diagramme de rayonnement pour la fréquence 9.6GHz au plan $\phi=90^\circ$ (2D)

Dans le diagramme montré en Figure IV.25, le faisceau 4 est orienté vers 70° avec un déphasage de 40° avec celui du faisceau 1.

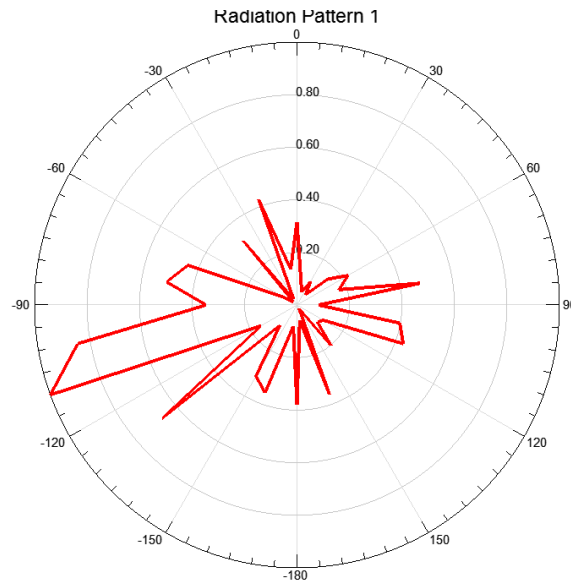


Figure IV.26 : Le diagramme de rayonnement pour la fréquence 9.6GHz au plan $\phi=90^\circ$ (2D)

Le diagramme de la Figure IV.26 est pour le faisceau 8 (toujours le port 1 est actif), ce faisceau est orienté vers -110°

Voir que la lentille conçue a une bande passante allant de 110° vers -110° (très large).

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu la conception d'une lentille de Rotman de configuration 8X8. Cette lentille est simulée à l'aide deux outils de simulation EM (Remcom et HFSS). Malgré que les ports d'excitation n'aient aucun déphasage, mais au niveau des ports de sortie, le déphasage est assuré par les lignes de retard (*delay lines*).

Conclusion générale

Conclusion générale

Il est clair que l'objectif principal de ce travail a été atteint, malgré que la conception d'une lentille de Rotman soit une tâche très délicate à cause de manque dans les différentes astuces utilisées dans la conception (ligne de transmission à retard : delay lines) afin d'avoir un déphasage bien défini au niveau de réseau d'antennes.

Dans ce travail, on a présenté la conception d'une lentille de Rotman imprimée en utilisant des simulateurs EM full-Wave (HFSS, Remcom). Cette lentille est dédiée pour les applications des systèmes Radar (la fréquence opérationnelle de 9.6 GHz).

Cette conception a permis d'acquérir les connaissances théoriques nécessaires à la technologie des circuits micro-ondes passifs (Antennes, matrice de Butler, ligne de transmission,) et de même, de familiariser avec plusieurs simulateurs EM (HFSS, Remcom et de même le CST studio).

Cette conception a aussi accompagné par une étude analytique et paramétrique d'une lentille de Rotman ce qui permet de voir l'effet de différents paramètres physiques de la lentilles (le rapport F/D, la distance focale, l'angle focal, les ports des faisceaux et les ports de réseau, ...) sur leurs caractéristiques en terme de l'erreur de phase, le coefficient de réflexion et le diagramme de rayonnement.

Dans le chapitre I, on a décrit les principes fondamentaux des formateurs BFN et ses classifications, Quelques répartiteurs à commutation tels que Butler, Nolen, Blass et la lentille de Rotman. De même, on a montré que la lentille de Rotman est une technologie populaire dans les systèmes à formation multifaisceaux (BFN), en raison de sa simplicité et ses bonnes performances.

Le deuxième chapitre décrit un état de l'art sur la lentille de Rotman, où on a montré l'essentiel des notions théoriques de la lentille de Rotman (description en détail les composants et leurs propriétés). Dans le même chapitre, quelques modèles réels de la lentille de Rotman sont présentés avec leurs spécifications et domaine d'applications. On a terminé ce chapitre par la présentation de quelques techniques de conception utilisées pour augmenter les performances de la lentille.

Dans le troisième chapitre, on a fait une étude analytique de la lentille de Rotman, ce qui permet d'acquérir une bonne compréhension du fonctionnement de la lentille. L'objectif de notre

travail était la conception d'une lentille de Rotman imprimé, avec une fréquence 9.6 GHz dédiée aux applications radar et satellitaires. Cette étude analytique était suivie par une étude paramétrique en utilisant le logiciel MATLAB.

Finalement, la lentille de Rotman était conçue en utilisant le simulateur HFSS et validé à l'aide d'un autre simulateur EM Remcom (XFDTD).

La lentille de Rotman est intéressante, car elle autorise une certaine liberté de conception avec de nombreux paramètres à ajuster, elle bénéficie de l'obtention d'une quantité appréciable de faisceaux et elle dispose surtout d'un système stable en fréquence. Plusieurs perspectives peuvent être envisagées à la fin de cette étude, à savoir

- La réalisation de la lentille de Rotman afin de faire une comparaison entre les résultats simulés et ceux mesurés.
- Intégration d'un réseau d'antenne linéaire dans le modèle de la lentille conçue pour voir mieux le déroulement de la lentille en présence de ce réseau.

Ceci constitue certainement une bonne voie de recherche d'avenir.

References

- [1] Richard C. Johnson, *Antenna Engineering Hand Book*, New York: McGraw- Hill, 1993.
- [2] J. Blass, "The multidirectional antenna a new approach to stacked beams," *IRE International Convention Record*, vol. 8, pp. 48-50, 1966.
- [3] J. McFarland, J. Ajioka, *Beam-Forming Feeds*, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [4] W. Rotman, R. F. Turner, "Wide-Angle Microwave Lens for Line Source," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 11, pp. 623-632, 1963.
- [5] S. Vashist, M. K. Soni, and P. K. Singhal, "A Review on the Development of Rotman Lens Antenna," *Chinese Journal of Engineering*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014.
- [6] Donald H. Archer, Michael J. Maybell, "Rotman lens development history at Raytheon Electronic Warfare Systems 1967-1995," in *Antennas and Propagation on Society Internationala*, 2005.
- [7] : Design of Wideband Rotman Lenses with Dummy Ports for Wide-Scan Phased Array Applications By Somayeh ADIBIFARD, THESIS PRESENTED TO ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE IN PARTIAL FULFILMENT FOR A MASTER'S DEGREE WITH THESIS IN ELECTRICAL ENGINEERING M.A.Sc. MONTREAL, AUGUST 29, 2018 ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC .
- [8] : C. W. Penney, R. J. Luebbers, and E. Lenzing, "Broad band Rotman Lens simulations in FDTD," in *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and USNC/URSI Meeting*, pp. 51–54, Washington, DC, USA, July 2005.
- [9] : G. L. Leonakis, "Correction to wide-angle microwave lens for line source applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 8, p. 1067, 1986.
- [10] : A. H. Jafari, W. Liu, and D. R. Morgan, "Study of sensor positions for broadband beamforming," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 779–782, 2013.
- [11] : D. Archer, "Lens-fed multiple beam arrays," *Microwave Journal*, vol. 18, pp. 37–42, 1975.
- [12] : Conception et réalisation d'un système réseau d'antennes ultra large bande à formation de faisceaux basé sur la matrice de Butler Par Mohamed Lamine Abdelghani Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maitre ès sciences (M.Sc) en télécommunications.
- [13] : THÈSE ; En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE , Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Discipline ou spécialité Génie Electrique Présentée et soutenue par Nelson Jorge Gonçalves Fonseca Le 15 Octobre 2010, Étude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseaux pour Applications Multifaisceaux.
- [14] : SEKKAL WASSILA, ETUDE ET SIMULATION DES SYSTEMES BFN POUR RESEAUX D'ANTENNES A FAISCEAUX MULTIPLES. APPLICATION DU CONCEPT CORPS, DE

L'ECOLE DOCTORALE DES TECHNOLOGIES ET APPLICATIONS SPATIALES, Soutenu en 2011

[15] : N. FADLALLAH <<Contribution à l'optimisation de la synthèse du lobe de rayonnement pour une antenne intelligente. Application à la conception de réseaux à déphasage>> ; Thèse de doctorat de l'université de Limoge, faculté des Sciences et Techniques, soutenu le 24 Mai 2005. Thèse de doctorat de l'université de Limoge, faculté des Sciences et Techniques, soutenu le 13 Novembre 2003.

[16]: PENG CHEN, Wei Hong, Zhenqi Kuai, Junfeng Xu. 2009. A Double Layer Substrate Integrated Waveguide Blass Matrix for Beamforming Applications. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.19, no.6, pp.374-376.

[17] : CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION DE NOUVELLES CONFIGURATIONS DE MATRICE DE BUTLER EN TECHNOLOGIES PLANAIRE ET CONFORME ; MÉMOIRE PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGENIERIE PAR MOEZ BEN KILANI.

[18] : A Broadband Direct-Demodulator Based on Nolen Matrix for 5G Wireless Communication Systems Par Esam Abdul Salam Shafah Mémoire présentée pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) En Télécommunications.

[19] : wikipédia.

[20] : ZAGHLOUL, A.I, O. Kilic, S.J. Weiss, E.D. Adler. 2009. Realization of Rotman's concepts of beamformer lenses and artificial dielectric materials. Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. COMCAS 2009. IEEE International Conference. p. 1-4.

[21] : KILIC, O et R. Dahlstrom. 2005. Rotman lens beam formers for Army multifunction RF antenna applications. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol.2B, pp. 43-46.

[22]: ZAGHLOUL, A.I, O. Kilic, S.J. Weiss, E.D. Adler. 2009. Realization of Rotman's concepts of beamformer lenses and artificial dielectric materials. Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. COMCAS 2009. IEEE International Conference. p. 1-4].

[23] : D. Thomas, "Multiple beam synthesis of low sidelobe patterns in lens fed arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 26, no. 6, pp. 883–886, Nov. 1978.

[24]: R. Clapp, "Extending the R-2R lens to 360°," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, no. 7, pp. 661–671, Jul. 1984.

[25] : J. Ruze, «Wide-Angle Metal-Plate Optics», Proceedings of the IRE, vol. 38, non. 1, pp. 53-59, janvier 1950.

- [26]: D. H. Archer and M. J. Maybell, "Rotman lens development history at Raytheon Electronic Warfare Systems 1967-1995," 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.
- [27]: T. K. Vo Dai and O. Kilic, "compact rotman lens structure configurations to support millimeter wave devices," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 71, pp. 91–106, 2016.
- [28]: W. Chen, J. Fu, Q. Wu, and J. Hua, "A design of Rotman lens for phase antenna array," 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 2012.
- [29]: E. O. Rausch, A. F. Peterson and W. Wiebach, "A Low Cost, High Performance, Electronically Scanned MMW Antenna," *Microwave Journal*, 40, I, 1997, pp. 20-32.
- [30]: E. O. Rausch, A. F. Peterson and W. Wiebach, "Millimeter Wave Rotman Lens," Proceedings of the 1997 IEEE National Radar Conference, May 1997, pp. 78-81.
- [31]: S. S. D. Jones, H. Gent, and A. A. L. Browne, "Improvements in or relating to electromagnetic-wave lens and mirror systems," British Provisional Patent Specification No. 25926/56, 1956.
- [32]: J. Shelton, "Focusing characteristics of symmetrically configured bootlace lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 26, no. 4, pp. 513–518, Jul. 1978.
- [33]: T. Katagi, S. Mano, and S. Sato, "An improved design method of Rotman lens antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 5, pp. 524–527, May 1984.
- [34]: R. C. Hansen, "Design trades for Rotman lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, no. 4, pp. 464–472, Apr. 1991.
- [35]: D. R. Gagnon, "Procedure for correct refocusing of the Rotman lens according to Snell's law," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 3, pp. 390–392, 1989.
- [36]: P. K. Singhal, R. D. Gupta, and P. C. Sharma, "Design and analysis of modified Rotman type multiple beam forming lens," Proceedings of IEEE TENCON'98. IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control (Cat.No.98CH36229).
- [37]: <http://www.raytheon.com>, Date de visite Août 2020
- [38]: YuJian Cheng et al., "Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman Lens and Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications," *Antennas and Propagation*, vol. 56, pp. 2504 - 2513, 2008.
- [39]: Ozlem Kilic, Steven J. Weiss, "Rotman Lens Applications for the US Army: A Review of History Present and Future," *Radio Science Bulletin*, vol. 333, pp. 10 -21, 2010.
- [40]: J. Rao, "Multifocal three-dimensional bootlace lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 6, pp. 1050–1056, 1982.

- [41]:J. Rao, "Correction to "Multifocal three-dimensional bootlace lenses"," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.31, p. 541, 1983.
- [42]:J dong and all (2009)
- [43]:J. Brown, *Microwave Lens*: Methuen, 1953.
- [44] :<https://www.scribd.com/doc/237799239/XFtd-Reference-Manual-pdf>.
- [45] :<http://www.remcom.com/>.
- [46]Rotman, W. and R. Turner, "Wide-Angle Microwave Lens for Line Source Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 623-632, Nov. 1963.
- [47]Hansen, R. C., "Design Trades for Rotman Lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, no. 4, pp. 464-472, April 1991.
- [48]<https://www.remcom.com/examples/impact-of-substrate-thickness-on-rotman-lens-designs.html>.

ABSTRACT:

Wide coverage area is one of the most important requirements of the antenna applications, such as radar systems or satellite communications. Rotman lens is a low-cost beam forming system that provides wide scan angle and it is simple to implement in Microstrip model. The objective of this thesis, is the study and design of a Rotman planar lens for mobile networks, this lens has 8 inputs and 8 output cover the frequency range 8-11.2 GHz. In this work, we first presented different techniques for feeding antenna arrays, which are known by beamforming. Then we presented a state of the art of the Rotman lens, some basic notions and some approaches. After we presented an analytical and other parametric study on the Rotman lens, and finally, we made a design of a Rotman lens with the EM simulator (Ansoft HFSS), and we validated the result by the simulator (Remcom, RLD).

Keywords: Rotman lens, Beamforming, wide scan angle, feeding technique, array antenna,

ملخص

تعد منطقة التغطية الكبيرة واحدة من أهم متطلبات تطبيقات الهوائي، مثل أنظمة الرادار أو الاتصالات بالأقمار الصناعية. عدسة روتمان هي نظام تشكيل حزمات الأشعة منخفضة التكلفة و التي توفر زاوية مسح كبيرة وسهلة التنفيذ في نموذج ميكروستريب.

الهدف من هذه الرسالة هو دراسة وتصميم عدسة روتمان مستوية من اجل شبكات الأقمار الصناعية، تحتوي هذه العدسة على 8 مداخل و 8 مخارج على مدى تردد 8-11.2 جيجا هرتز. في هذا العمل، قدمنا أولاً مختلف التقنيات لتغذية شبكات الهوائي، والتي تعرف بتشكيل حزم الأشعة. ثم قدمنا حالة الفن لعدسة روتمان، بعض المفاهيم الأساسية وبعض الأساليب. بعدها قدمنا دراسة تحليلية وأخرى بارامترية على عدسة روتمان. وأخيراً، قمنا بالتحقق من صحة النتيجة بواسطة المحاكاة وقمنا (Ansoft HFSS) بتصميم عدسة روتمان باستخدام المحاكاة (Remcom, RLD).

الكلمات المفتاحية: تقنيات تغذية، مصفوفة الهوائيات. عدسة روتمان، زاوية مسح كبيرة، تشكيل حزمة الأشعة،