

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique
Laboratoire LDCCP

Mémoire de Master en électronique

Réalisation d'un réseau d'antennes en technologie microruban.

ZEGHDOUD Abdelbaki

Sous la direction de
M. Pr. R. AKSAS

Présenté et soutenu publiquement le 17 Juin 2017

Composition du Jury :

Président	M. M. TRABELSI	Pr.	ENP
Promoteurs	M. R. AKSAS	Pr.	ENP
	M. K. FERTAS	M.A.	ESM
Examineur	M. B. BOUSSEKSOU	M.A.	ENP

ENP 2017

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique
Laboratoire LDCCP

Mémoire de Master en électronique

Réalisation d'un réseau d'antennes en technologie microruban.

ZEGHDOUD Abdelbaki

Sous la direction de
M. Pr. R. AKSAS

Présenté et soutenu publiquement le 17 Juin 2017

Composition du Jury :

Président	M. M. TRABELSI	Pr.	ENP
Promoteurs	M. R. AKSAS	Pr.	ENP
	M. K. FERTAS	M.A.	ESM
Examineur	M. B. BOUSSEKSOU	M.A.	ENP

ENP 2017

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'école nationale polytechnique. Il a été dirigé par Monsieur **Rabia AKSAS**, Professeur à l'ENP, et Monsieur **Khalil FERTAS**, Maître assistant de l'Ecole Supérieure du Matériel (ESM). Je les remercie pour m'avoir fait bénéficier de leurs grandes connaissances scientifiques ainsi que pour le temps, la patience qu'ils m'ont accordés et les précieux conseils qu'ils m'ont généreusement prodigués. Ils m'ont laissé une grande liberté dans le choix et l'orientation de mes travaux tout en sachant me guider. Je tiens à souligner la qualité de leurs observations pertinentes, leur grande rigueur scientifique et leur investissement dans cette étude.

Je remercie vivement Monsieur **Mohammed TRABELSI**, Professeur à l'école nationale polytechnique, de nous avoir accepté la présidence de notre jury de PFE.

Nous exprimons notre reconnaissance à Messieurs **Boualem BOUSEKSOU**, Maître assistant à l'école nationale polytechnique, qui nous a fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je voudrais aussi remercier tous les enseignants de département d'électronique de l'école nationale polytechnique.

Un grand merci pour toutes les personnes qui m'ont aidés, soutenus et encouragés pendant la réalisation de mon master.

Je pense bien sûr à mes parents, à mes familles, à mes amis et à mes camarades de promotion.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail.

ملخص

لقد أصبحت الهوائيات المطبوعة ضرورية في مختلف المجالات فهي تملك مزايا جيدة من حيث التصغير والتكلفة. مشكلتهم الرئيسية هي أن لديهم مكاسب منخفضة. وسيركز هذا العمل على تصميم مجموعة من اربع هوائيات التي تحصل عليها بالطريقة الجينية من أجل تحسين مكاسبها. سيتم استخدام برنامج CST للمحاكاة.

الكلمات المفتاحية: مجموعة الهوائي، الخوارزمية الجينية، الهوائيات المطبوعة، تعزيز، برنامج CST للمحاكاة.

Abstract

Microstrip antennas have become an indispensable tool for different areas. They have several advantages in terms of miniaturization and cost. Their main problem is that they have a low gain. This master will focus on the design and implementation of a four antennas array obtained by the genetic method in order to improve their gain. The CST software will be used for the simulation.

Keywords: Antenna array, Genetic algorithm, Microstrip antenna, Gain enhancement.

Résumé

Les antennes microruban sont devenues un outil indispensable pour de différents domaines. Elles ont plusieurs avantages en termes de miniaturisation et coût. Leur problème majeur est qu'elles présentent un faible gain. Ce master est dédié à la conception et la réalisation d'un réseau de quatre antennes afin d'améliorer leur gain. Le logiciel CST sera utilisé pour effectuer la simulation.

Mots clés: Réseau d'antennes, Algorithme génétique, Antenne microruban, Amélioration du gain.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des notations

Introduction générale	11
1 Etat de l'art	12
1.1 Structure de l'antenne microruban	12
1.2 Les avantages et limitations des antennes microruban	13
1.3 Techniques d'alimentation d'une antenne microruban	14
1.3.1 Alimentation par ligne microruban	14
1.3.2 Alimentation par connecteur coaxial	15
1.3.3 Alimentation par fente (couplage)	15
1.3.4 Alimentation par effet de proximité (couplage)	15
1.4 Adaptation d'impédance	16
2 Réseaux d'antennes imprimées	18
2.1 Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes imprimées	19
2.1.1 Avantages	19
2.1.2 Inconvénients	19
2.1.3 Méthode de conception des réseaux d'antennes imprimées	20
2.2 Etude du réseau d'antennes de base	20

2.3	Structure du réseau	22
2.4	Simulation	25
2.5	Discussion des résultats	26
2.5.1	Comparaison du module du coefficient de réflexion	26
2.5.2	Comparaison du gain	27
2.6	Conclusion	27
3	Réalisation du réseau à quatre antennes	28
3.0.1	Remarque	29
3.1	Conclusion	29
	Bibliographie	30

Table des figures

1.1	Structure d'une antenne microruban. [1]	12
1.2	Quelques formes utilisées pour les antennes [1]	13
1.3	Alimentation par ligne microruban [1]	14
1.4	Alimentation par connecteur coaxial [1]	15
1.5	Alimentation par fente [1]	16
1.6	Alimentation par effet de proximité [1]	16
1.7	Adaptation d'impédance par une ligne quart d'onde [2]	17
2.1	Réseaux d'antennes imprimées [3].	18
2.2	Architecture de base des réseaux d'antennes.	19
2.4	Coefficient de réflexion de l'antenne de départ.	20
2.3	Structure de départ.	21
2.5	Diagramme de rayonnement en 3D pour les trois résonances.	22
2.6	Diagramme de rayonnement du réseau dans le plan $\phi = 90^\circ$ pour les trois fréquences de résonances.	22
2.7		23
2.8		23
2.9	Coefficient de réflexion du réseau de deux antennes.	24
2.10	Coefficient de réflexion du réseau de deux antennes.	25
2.11	Coefficient de réflexion du réseau de quatre antennes et du réseau d'antenne de départ.	25
2.12	Diagramme de rayonnement du réseau dans le plan $\phi = 90^\circ$ pour les trois fréquences de résonances.	26

3.1	Antenne réalisée.	28
3.2	Coefficient de réflexion du réseau de quatre antennes simulation et réalisation.	29

Liste des tableaux

2.1	Comparaison du module coefficients de reflexion dans les trois frequences.	27
2.2	Comparaison du gain.	27

Liste des abréviations

CST	Computer Simulation Technology
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
IEEE	Institute of Electrical Electronic Engineers
VSWR	voltage standing wave ratio

Liste des notations

E	Le champ électrique (V/m)
H	Le champ magnétique (A/m)
ϵ_r	Permittivité relative
S_{11}	Coefficient de réflexion
L_f	Longueur de la ligne d'alimentation (mm)
W_f	Largeur de la ligne d'alimentation (mm)
Z_f	impédance caractéristique de la ligne d'alimentation (Ω)
h	Hauteur du substrat (mm)
f_r	Fréquence de résonance (Hz)
L_p	Longueur de patch (mm)
W_p	Largeur de patch (mm)

Introduction générale

Afin d'améliorer les performances des antennes imprimées, les chercheurs ont pensé de travailler avec les réseaux d'antennes. Ces derniers ont montré un gain meilleur pour diverses utilisations.

Ce mémoire est dédié à l'étude et la réalisation d'un réseau de quatre antennes en technologie microruban. Le logiciel CST sera utilisé pour effectuer la simulation des antennes lors de la conception. Quant à la réalisation, elle est basée sur la technique de la photo gravure (chimique).

Le premier chapitre est consacré à donner une brève introduction sur les antennes microruban.

Dans le deuxième chapitre, une explication des réseaux d'antennes sera présentée.

Le troisième et dernier chapitre est dédié à la réalisation du réseau d'antennes multi-bande.

Chapitre 1

Etat de l'art sur les antennes microruban

1.1 Structure de l'antenne microruban

Comme on peut le voir dans la figure 1.1, une antenne microruban est constituée d'un patch rayonnant d'un des deux côté d'un substrat de constante diélectrique $\epsilon_r \leq 10$ [4] (page 1) et d'un plan de masse de l'autre côté. Le plan de masse est suffisamment grand par rapport à l'élément rayonnant de telle sorte à limiter l'effet d'onde de surface présent sur les extrémités de l'antenne. [2]

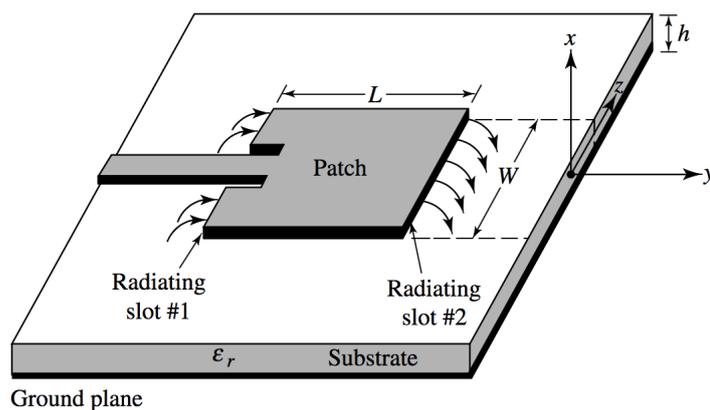


FIGURE 1.1 – Structure d'une antenne microruban. [1]

On peut utiliser n'importe quelle forme pour les deux faces de l'antenne, mais on utilise généralement des formes régulières pour simplifier l'analyse et la prédiction des perfor-

mances. Les formes les plus utilisées sont représentés dans la figure 1.2.

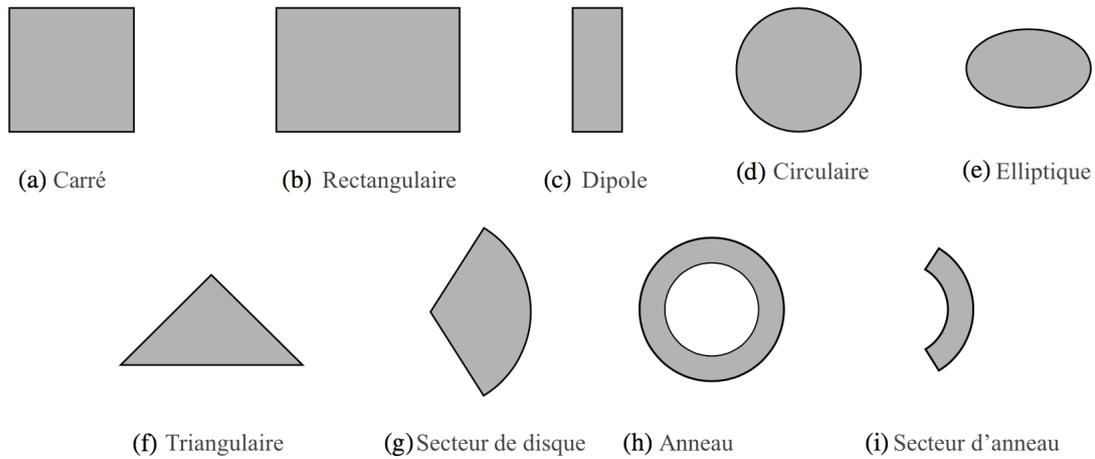


FIGURE 1.2 – Quelques formes utilisées pour les antennes [1]

Idéalement, on utilise une constante diélectrique $\epsilon_r \leq 2.5$ afin d'augmenter l'effet de rayonnement des champs de débordement appelés en anglais "fringe fields", mais on utilise généralement une constante diélectrique $\epsilon_r \geq 4$ [4]. Certains substrats sont flexibles et permettent de travailler avec plus de structures. Les antennes microrubans sont conformes et peuvent être placées sur des structures géométriques tridimensionnelles tels que les missiles, les vitres de véhicules...

1.2 Les avantages et limitations des antennes microruban

Les antennes microrubans ont plusieurs avantages, en commençant par leurs large bande d'utilisation (de 100 MHz jusqu'à 100 GHz).

Parmi les avantages des antennes microrubans, on a :

- Elles sont légères et peuvent être utilisées sur d'autres formes géométriques.
- Facilité de réalisation.
- Faible coût de production.
- Facilité de créer des réseaux pour améliorer la directivité et pour le balayage électronique.
- Les lignes d'alimentation et les réseaux d'adaptation sont fabriqués simultanément.

- Le choix de polarisation se fait tout simplement en changeant l'alimentation.

Cependant, ces antennes ont des limitations d'utilisation :

- Bande passante réduite (1% jusqu'à 5%)
- Un faible gain, de l'ordre de 6 dB

1.3 Techniques d'alimentation d'une antenne microruban

Les antennes microrubans peuvent être alimentées directement par une connection électrique : ligne microruban ou connecteur coaxial ; mais parce qu'elles ne consomment pas beaucoup d'énergie, on peut trouver d'autres modes d'excitation (par couplage, ...)

La classification qu'on va utiliser dans la suite est tirée de [1] et [?].

1.3.1 Alimentation par ligne microruban

L'alimentation par ligne microruban consiste à alimenter l'élément rayonnant par une ligne de faible largeur par rapport à ce dernier, imprimée sur le même côté du substrat (Fig. 1.3). Cette technique est facile à implémenter et permet de réaliser des réseaux d'antennes sur le même substrat afin d'augmenter la directivité et le gain.

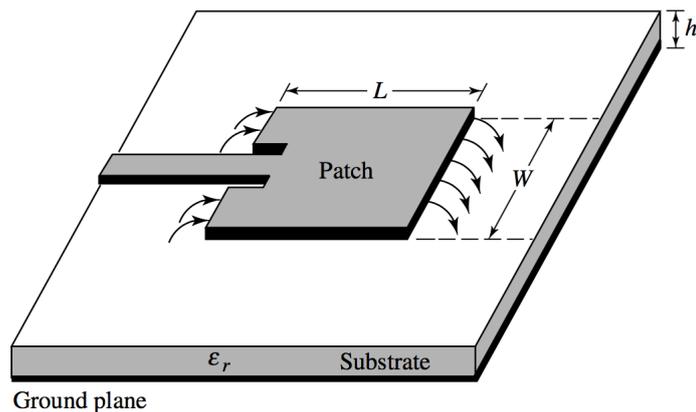


FIGURE 1.3 – Alimentation par ligne microruban [1]

1.3.2 Alimentation par connecteur coaxial

Cette technique consiste à alimenter l'élément rayonnant à travers le substrat. L'âme centrale du câble SMA est reliée directement à l'élément rayonnant et le conducteur extérieur est soudé au plan de la masse. Ainsi, on peut changer la position d'alimentation de l'antenne ce qui permet d'avoir l'adaptation entre le connecteur SMA (50Ω en général) avec l'élément rayonnant. Cette technique présente un faible rayonnement parasite et une faible bande passante, elle est aussi difficile à modéliser [?].

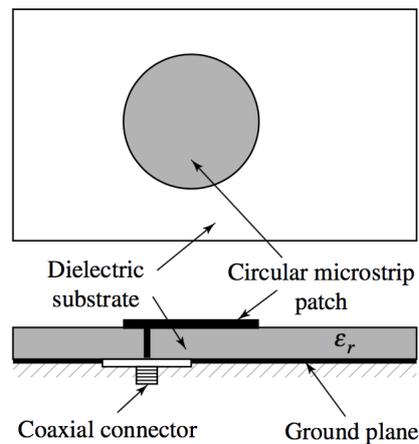


FIGURE 1.4 – Alimentation par connecteur coaxial [1]

1.3.3 Alimentation par fente (couplage)

L'alimentation par fente repose sur le phénomène de couplage électromagnétique. Le couplage existe entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant à travers une fente dans un conducteur qui se trouve au milieu de deux substrats superposés (Fig. 1.5). Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant.

En général, un diélectrique avec une permittivité élevée est utilisé pour le substrat inférieur et un diélectrique épais avec une permittivité faible pour le substrat supérieur [?].

1.3.4 Alimentation par effet de proximité (couplage)

Ce type d'alimentation repose aussi sur le phénomène de couplage électromagnétique. La différence dans ce cas est que la ligne d'alimentation est située entre l'élément rayonnant

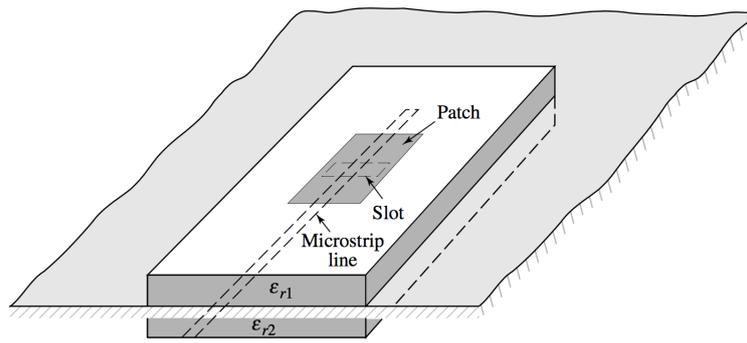


FIGURE 1.5 – Alimentation par fente [1]

et le plan de masse (Fig. 1.6). Cette configuration présente une large bande passante et facilite l'adaptation mais elle est difficile à réaliser [?].

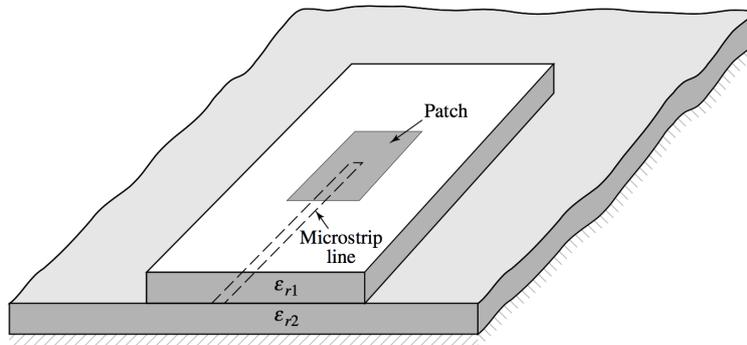


FIGURE 1.6 – Alimentation par effet de proximité [1]

1.4 Adaptation d'impédance

Pour adapter l'impédance d'entrée du patch à celle de la ligne d'alimentation de 50Ω , on va utiliser la méthode de la ligne quart d'onde (figure 1.7), La longueur de cette dernière vaut le quart de la longueur d'onde dans le milieu :

$$L_s = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1.1)$$

Concernant son impédance caractéristique Z_s , on peut la calculer en utilisant

$$Z_s = \sqrt{Z_{in} Z_0} \quad \text{tel que} \quad Z_0 = 50\Omega$$

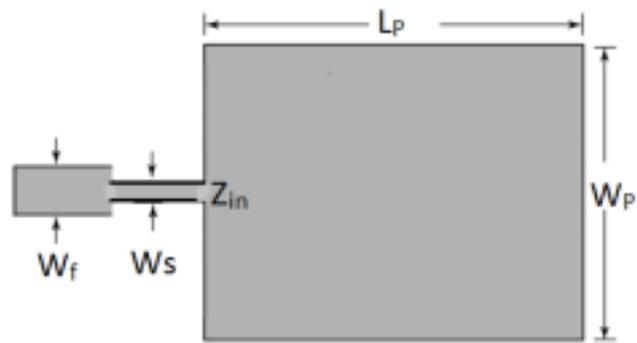


FIGURE 1.7 – Adaptation d'impédance par une ligne quart d'onde [2]

Finallement, on utilise l'expression ?? pour déduire la largeur de la ligne quart d'onde W_s .

Chapitre 2

Réseaux d'antennes imprimées

Comme a été illustré précédemment, les antennes imprimées sont largement utilisées de nos jours. Elles permettent de répondre à de nombreuses contraintes imposées par certains systèmes de télécommunication. Leurs formes et dimensions favorisent leur intégration sur de nombreux mobiles (avion, voiture, missile, téléphone portable...).

L'utilisation d'une antenne imprimée unique s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées [3]. Des caractéristiques spécifiques comme un gain élevé ou un lobe principal conformé ne peuvent généralement être obtenues que par le regroupement de plusieurs sources rayonnantes pour former un réseau d'antennes imprimées (fig 2.1).

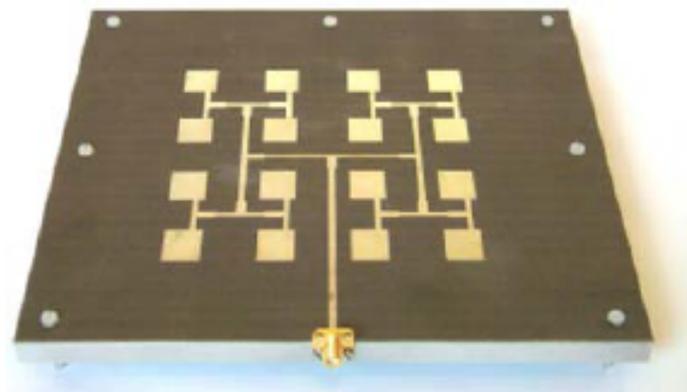


FIGURE 2.1 – Réseaux d'antennes imprimées [3].

Il existe plusieurs architectures pour concevoir un réseau d'antennes imprimées, les plus

simples, sont obtenus avec des sources identiques qui se déduisent les unes des autres par translation pour former des réseaux linéaires (fig 2.2a) et des réseaux planaires (fig 2.2b).

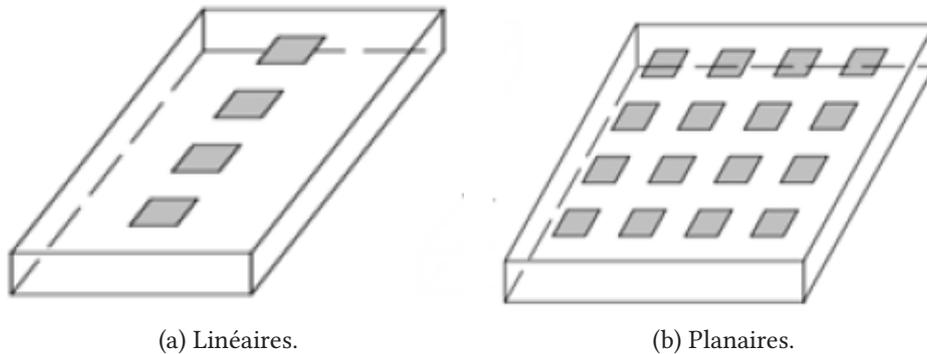


FIGURE 2.2 – Architecture de base des réseaux d'antennes.

2.1 Avantages et inconvénients des réseaux d'antennes imprimées

2.1.1 Avantages

- Faible poids et l'encombrement réduit (en particulier en épaisseur).
- La possibilité de générer la polarisation circulaire est également très intéressante dans de nombreuses applications telles que les télécommunications spatiales, la navigation, les systèmes radars [6].
- La mise en réseau permet d'atteindre des gains élevés.
- La possibilité de jouer sur de nombreux facteurs pour adapter le diagramme notamment aux exigences les plus variées des cahiers des charges.

2.1.2 Inconvénients

- la complexité de réalisation compte tenu des précisions à assurer sur les faibles largeurs des différentes lignes aux fréquences de travail élevées.
- Tout en étant acceptable, le niveau de gain d'un réseau d'antennes imprimées demeure en dessous de celui de certains dispositifs rayonnants micro-ondes.

2.1.3 Méthode de conception des réseaux d'antennes imprimées

Quel que soit le cahier des charges à respecter, la démarche reste la même pour concevoir un réseau d'antennes imprimées. Les principales étapes de la conception sont :

- Etude de l'élément de base.
- Détermination de la géométrie du réseau : nombre d'éléments et leurs espacements.
- Mise au point du circuit de distribution à partir de la théorie des lignes permettant de ramener une impédance de 50Ω au niveau de la connexion.
- analyse rigoureuse pour affiner les dimensions de dispositif rayonnant compte tenu d'un cahier des charges imposé.

2.2 Etude du réseau d'antennes de base

La structure de départ (Fig 2.3) consiste en un réseau d'antennes $18\text{mm} \times 14\text{mm}$ imprimés au-dessus d'un plan de masse plein. Cette antenne est réalisée sur un substrat de type FR4 de permittivité relative $\epsilon_r=4.3$, de hauteur $h=1,6 \text{ mm}$ et des pertes $(\tan \alpha)= 0.0019$. L'alimentation est réalisée par une ligne micro-ruban de largeur $W_f = 3.1\text{mm}$ adaptée à une impédance caractéristique de 50Ω .

Cette antenne est construite par les algorithmes génétiques afin de fonctionner dans trois bandes de fréquence. La simulation du coefficient de réflexion de cette antenne est illustrée sur la figure 2.4.

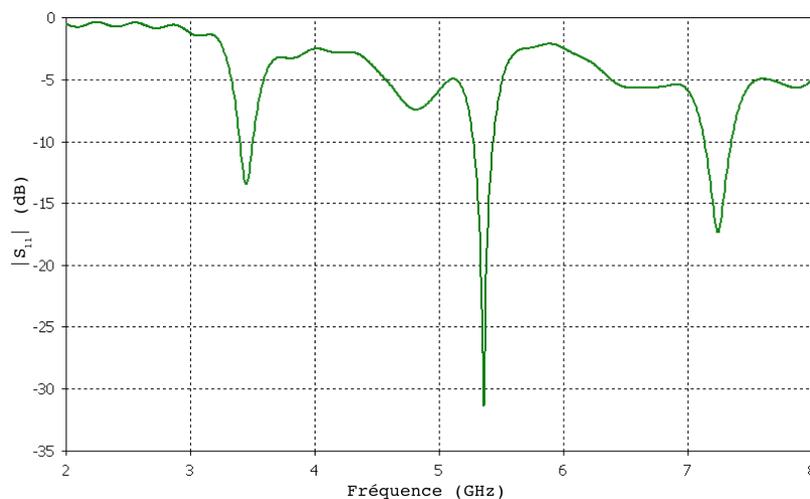


FIGURE 2.4 – Coefficient de réflexion de l'antenne de départ.

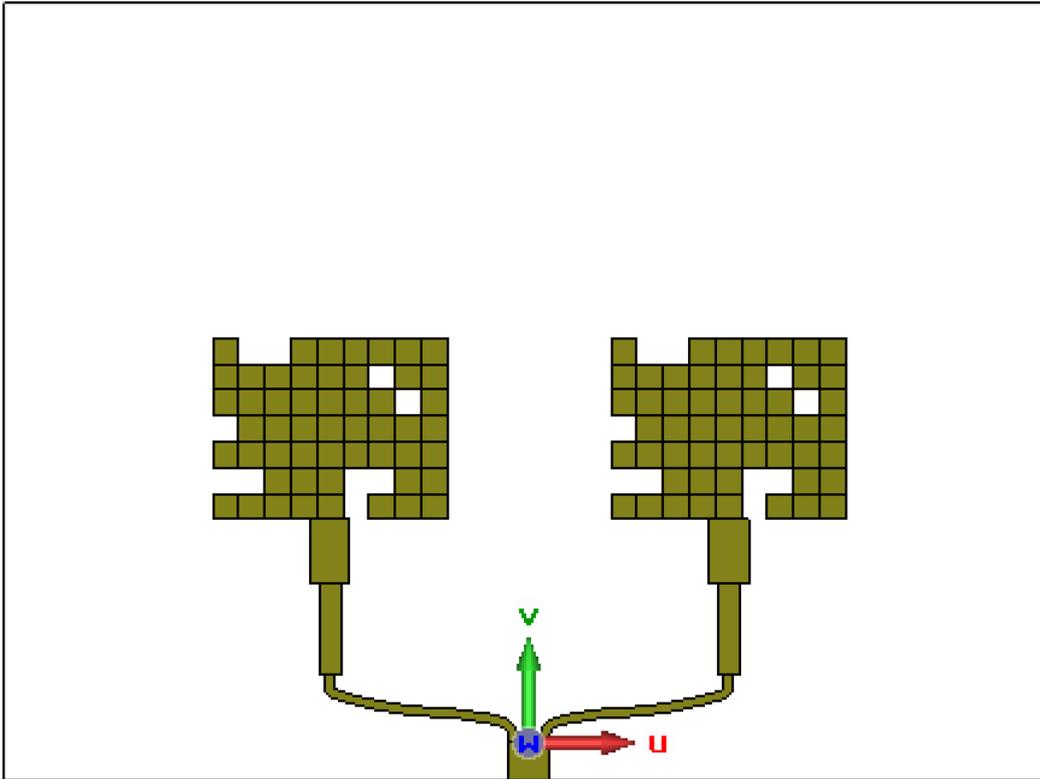


FIGURE 2.3 – Structure de départ.

La figure 2.4 montre que l'antenne a une adaptation de l'ordre de -13 dB à la fréquence 3.45 GHz avec une largeur de bande de 2.78 %, d'une adaptation de l'ordre de -32 dB à la fréquence 5.36 GHz avec une largeur de bande de 2.99 %, et de -17 dB à la fréquence 7.24 GHz avec une largeur de bande de 2.90 %.

Diagramme de rayonnement

La figure (2.5) représente le diagramme de rayonnement en 3D alors que la figure (2.6) représente le diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour les trois fréquences de résonances :

1. $f=3.45$ GHz.
2. $f = 5.36$ GHz
3. $f=7.24$ GHz.

Pour la fréquence de 3.45 GHz, le gain maximum est de 4.33 dB. La direction du lobe principal est 3.0° avec une ouverture à $-3dB$ de 83.1° .

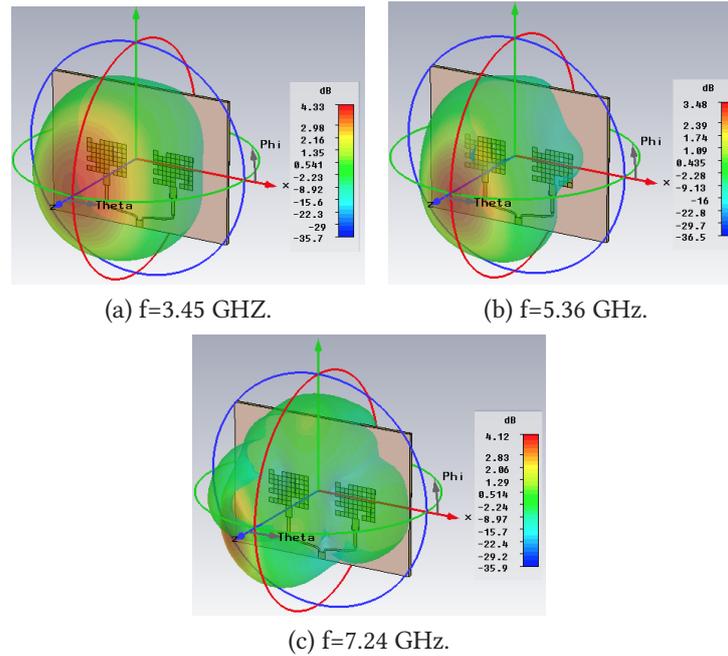


FIGURE 2.5 – Diagramme de rayonnement en 3D pour les trois résonances.

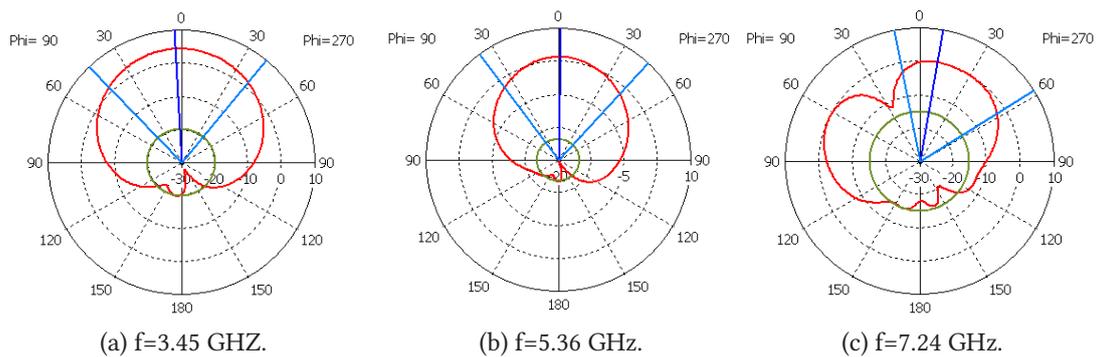


FIGURE 2.6 – Diagramme de rayonnement du réseau dans le plan $\phi = 90^\circ$ pour les trois fréquences de résonances.

Pour la fréquence de 5.36 GHz, le gain maximum est de 3.48 dB. La direction du lobe principal est 1.0° avec une ouverture à $-3dB$ de 79.0° .

Pour la fréquence de 7.24 GHz, le gain maximum est de 4.12 dB. La direction du lobe principal est 10.0° avec une ouverture à $-3dB$ de 68.9° .

2.3 Structure du réseau

On propose de construire un réseau à quatre (4) antennes afin d'améliorer le gain de l'antenne. La figure 2.7 représente l'antenne conçue en utilisant le logiciel CST.

Le réseau que l'on a adopté (fig. 2.7) est alimenté en utilisant un circuit d'alimentation en T.

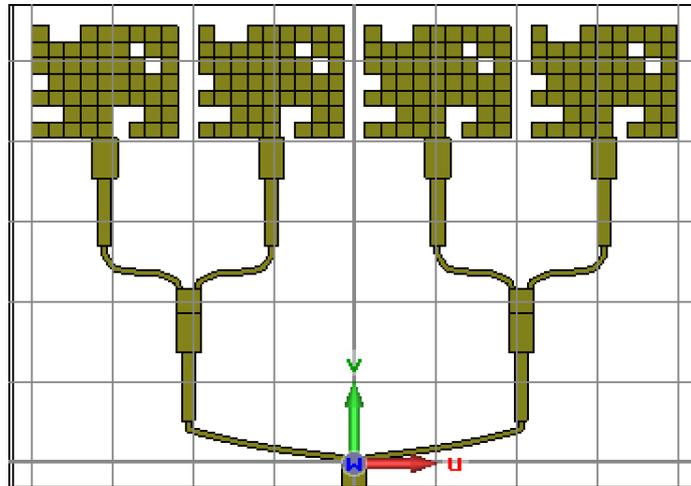


FIGURE 2.7

Les dimensions du diviseur en T sont données dans la figure 2.8

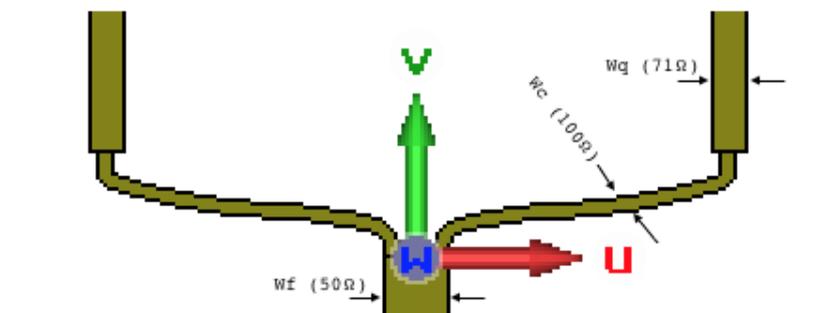


FIGURE 2.8

Ce diviseur est utilisé pour alimenter équitablement les différents éléments d'un réseau à partir d'une seule source. Le circuit d'alimentation (2.9) utilisé pour alimenter les deux éléments du réseau est un diviseur de puissance de l'accès d'entrée (port SMA) vers les sorties 1 et 2.

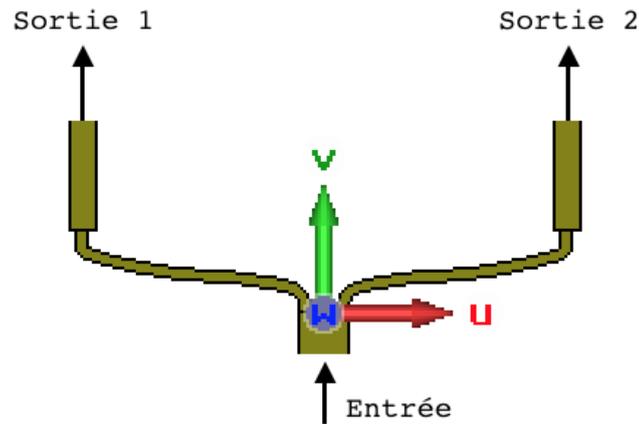


FIGURE 2.9 – Coefficient de réflexion du réseau de deux antennes.

La structure consiste en une ligne d'excitation 50Ω soudée au connecteur SMA. Cette ligne est connectée à deux lignes en parallèle d'impédance caractéristique de 100Ω . Chacune de ces lignes est courbée conduisant à une partie différente du réseau. La fin de chaque ligne est liée à une ligne quart d'onde 75Ω . L'impédance de cette ligne est calculée en utilisant l'équation 2.1

$$Z = \sqrt{Z_0 \times Z_{in}} \quad (2.1)$$

Chaque extrémité de la ligne quart d'onde est liée au réseau de deux antennes d'impédance d'entrée 50Ω .

Remarques

1. Relier la ligne quart d'onde directement à l'antenne ne changera pas les résultats de simulation car l'impédance d'entrée sera la même.
2. On peut aussi relier les deux lignes quart d'onde à la ligne d'alimentation centrale sans changer les résultats de simulation. On a choisi d'ajouter les deux lignes de 100Ω pour les raisons pratiques suivantes :
 - La longueur de la courbure est difficile à mesurer.
 - On doit éloigner les pavés rayonnants pour éviter l'interférence.

2.4 Simulation

La simulation du coefficient de réflexion du réseau à quatre antennes est illustrée sur la figure 2.10.

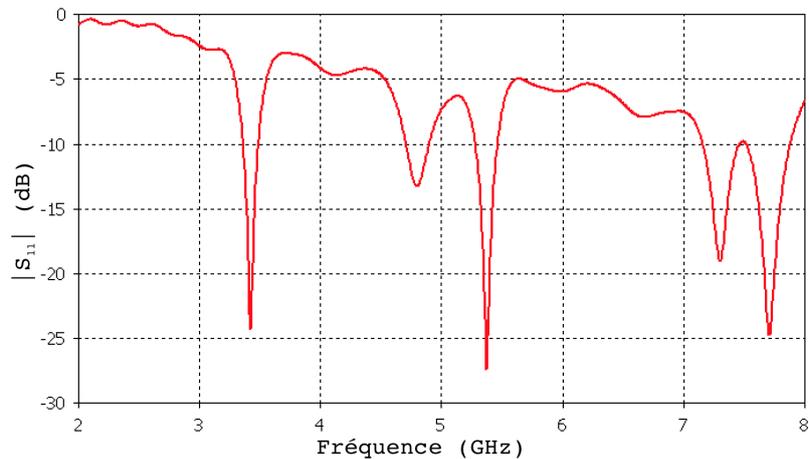


FIGURE 2.10 – Coefficient de réflexion du réseau de deux antennes.

Cette figure montre que l'antenne a une adaptation de l'ordre de -24 dB à la fréquence 3.42 GHz, d'une adaptation de l'ordre de -27 dB à la fréquence 5.37 GHz, et de -18 dB à la fréquence 7.29 GHz. On a une apparition d'une nouvelle bande de fréquence autour de 7.71 GHz, d'adaptation de l'ordre -24 dB.

La figure 2.11 représente le module du coefficient de réflexion du réseau d'antennes en contraste avec le réseau d'antenne de départ.

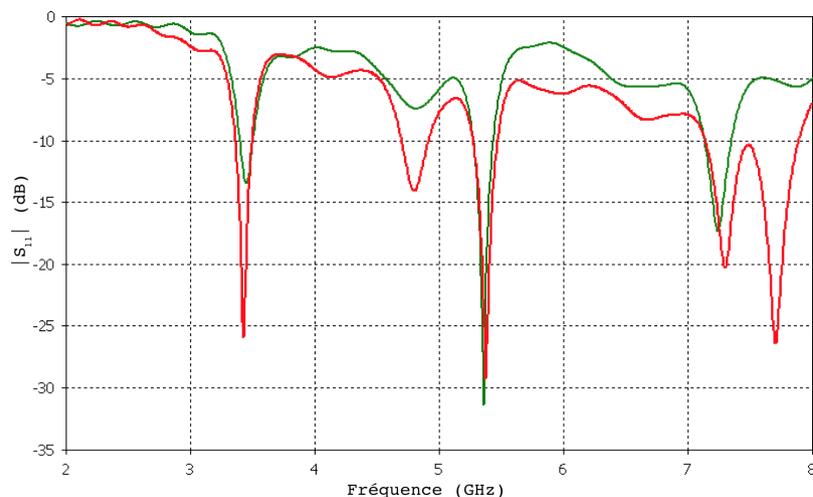


FIGURE 2.11 – Coefficient de réflexion du réseau de quatre antennes et du réseau d'antenne de départ.

Diagramme de rayonnement

La figure (2.12) représente le diagramme de rayonnement en coordonnées polaires pour les trois fréquences de résonances :

1. $f=3.42$ GHz.
2. $f = 5.37$ GHz
3. $f=7.29$ GHz.

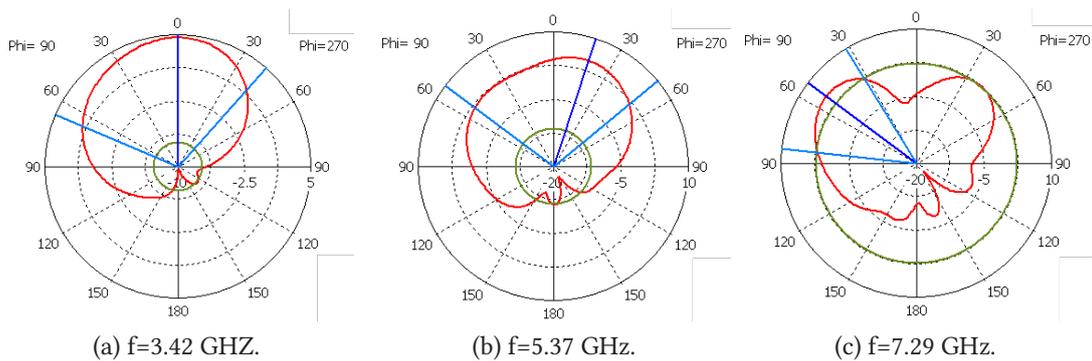


FIGURE 2.12 – Diagramme de rayonnement du réseau dans le plan $\phi = 90^\circ$ pour les trois fréquences de résonances.

Pour la fréquence de 3.42 GHz, le gain maximum est de 4.67 dB. La direction du lobe principal est 0.0° avec une ouverture à $-3dB$ de 108° .

Pour la fréquence de 5.37 GHz, le gain maximum est de 4.78 dB. La direction du lobe principal est 18.0° avec une ouverture à $-3dB$ de $103.5.0^\circ$.

Pour la fréquence de 7.29 GHz, le gain maximum est de 4.95 dB. La direction du lobe principal est 53.0° avec une ouverture à $-3dB$ de 52° .

2.5 Discussion des résultats

2.5.1 Comparaison du module du coefficient de réflexion

Le tableau suivant représente le module du coefficient de réflexion dans les trois fréquence résonnantes.

Fréquence	$ S_{11}(dB) $ du réseau de deux antennes (dB)	$ S_{11}(dB) $ du réseau de quatre antennes (dB)
Fréquence 1	-13	-24
Fréquence 2	-32	-27
Fréquence 3	-17	-18

TABLE 2.1 – Comparaison du module coefficients de reflexion dans les trois fréquences.

Observation On observe que le réseau de quatre antennes est légèrement plus adapté dans les fréquences 1 et 3.

2.5.2 Comparaison du gain

Le tableau suivant représente le gain dans les trois fréquence résonnantes pour le réseau à deux et à quatre antennes.

Fréquence	Gain du réseau de deux antennes (dB)	Gain du réseau de quatre antennes (dB)
Fréquence 1	4.33	4.67
Fréquence 2	3.48	4.78
Fréquence 3	4.12	4.95

TABLE 2.2 – Comparaison du gain.

Observation On observe que le gain dans le cas d'un réseau d'antennes est plus large que le gain d'une seule antenne. Ce qui est conforme à nos prévisions.

2.6 Conclusion

On a une amélioration du gain part rapport au réseaux de deux antennes. Ce qui confirme l'hypothèse de départ.

Chapitre 3

Réalisation du réseau à quatre antennes

L'antenne réalisée est représentée sur la figure suivante.

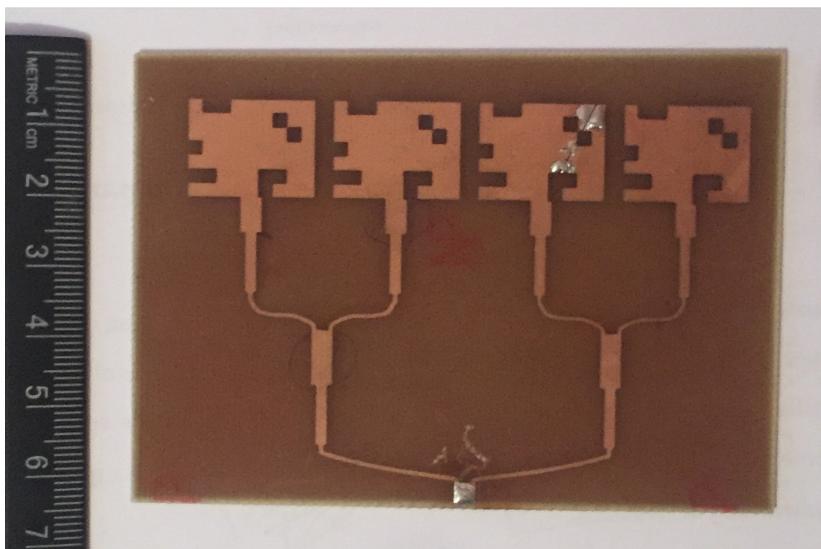


FIGURE 3.1 – Antenne réalisée.

La comparaison entre les résultats de simulation et ceux de l'expérimentation sont données dans la figure 3.2

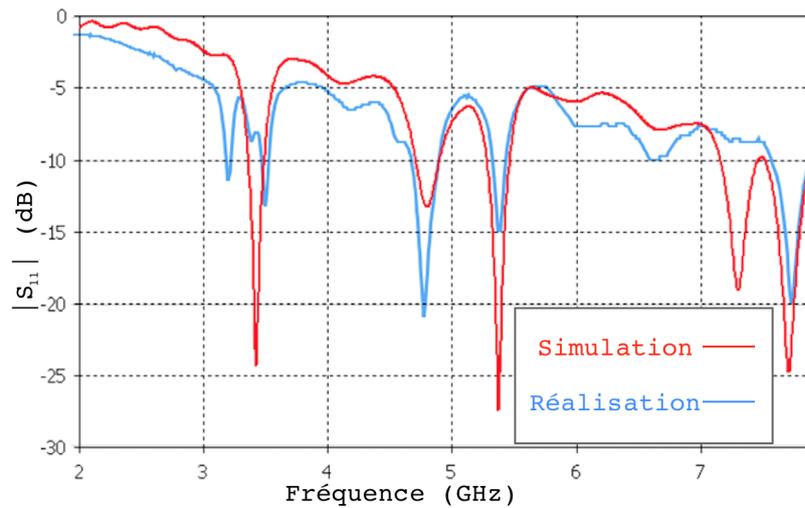


FIGURE 3.2 – Coefficient de réflexion du réseau de quatre antennes simulation et réalisation.

3.0.1 Remarque

On a des petites différences entre la simulation et la réalisation. Les deux graphes sont en accords en général.

3.1 Conclusion

Les résultats expérimentaux corroborent en général avec ceux de la simulation. Les différences remarquées sont dû aux erreurs commises lors de la réalisation. Une des erreurs est la rectification de discontinuité sur le troisième patch par une soudure.

Bibliographie

- [1] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory : Analysis and Design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [2] K.Abdelouahab. Etude et conception d'une antenne microruban rectangulaire adaptée par ligne quart d'onde. Master's thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
- [3] R. AKSAS. *Antennes - Théorie et Applications*. Ellipses, 1980.
- [4] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, 2001.
- [5] J. R. James. *Microstrip Antenna Theory and Design*. Electromagnetic Waves. Institution of Engineering and Technology, 1981.
- [6] H. AKSAS. Conception et réalisation d'antennes réseaux imprimées larges-bandes a motifs optimisés. Master's thesis, Ecole Militaire Polytechnique, 2014.