

II.1. Introduction

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et les commandes à distance, ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. Les systèmes micro-ondes à structure micro ruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières.

Dans ce chapitre nous présentons la description et le mécanisme de fonctionnement, les avantages, les inconvénients des antennes patches, ainsi que les différents types d'alimentation. Aussi, nous détaillons le principe des méthodes usuelles les plus utilisées dans le domaine des antennes microstrip.

II.2.Historique

Grâce à leurs nombreux avantages, les antennes imprimées sont devenues très populaires dans diverses applications civiles et médicales. Ces antennes ont été proposées pour la première fois, par Deschamps en 1953. Mais la réalisation n'est pas possible qu'à partir de 1970 (HOWEL et MUSON) grâce à l'invention des diélectriques à faibles pertes. Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier pour exploiter les nombreux avantages des antennes imprimées; Une antenne à éléments rayonnants imprimés, communément appelée «antenne patch» est une ligne micro-ruban (microstrip) de forme particulière. Elle se compose d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique dont la surface porte un ou plusieurs éléments métalliques.

Cependant, plus de vingt ans après où Munson réalisa la première antenne à large bande [11]. En 1979 un colloque sur les antennes, déroula au Mexique, lance un intérêt international pour les antennes micro rubans. Plusieurs articles ont été présentés lors de cette réunion puis apparus dans une édition spéciale dans le journal IEEE [12]. Parmi les premiers livres qui définissent les caractéristiques des antennes microrubanes, et qui est toujours une référence standard, celui écrit par BAHL et BHARTIA [13]. Plusieurs travaux ont apparus montrant la diversité et la facilité des antennes imprimées en termes de géométrie et forme qui rend l'utilisation des antennes imprimées faisables dans plusieurs domaines.

II.3. Structure d'une antenne microruban

L'antenne micro ruban est un dispositif permettant de rayonner ou de capter à distance les ondes électromagnétiques. Elle comporte typiquement un plan de masse, et un élément rayonnant séparé de ce plan de masse par un diélectrique, figure I.1.

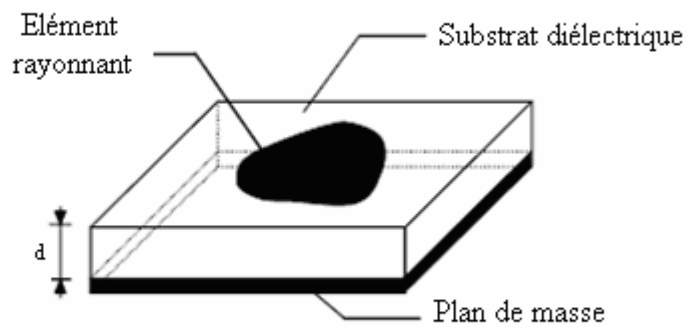


Figure II. 1 Géométrie typique d'une antenne microruban.

L'élément rayonnant est un conducteur mince, et dans la plupart des applications pratiques, il est de forme rectangulaire ou circulaire, mais en général d'autres géométries sont possible comme la forme triangulaire.

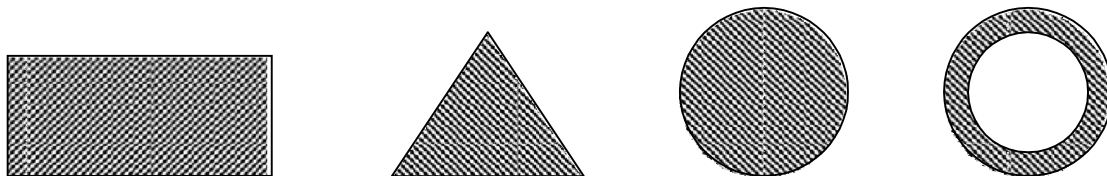


Figure II. 2 Divers types d'éléments rayonnants Les grandeurs qui caractérisent une antenne imprimée sont :

- L'épaisseur de la couche diélectrique (d).
- Les caractéristiques du substrat diélectrique (permittivité ϵ_r , pertes diélectriques, etc.).
- Les dimensions du conducteur métallique supérieur (longueur et largeur du rectangle, rayon du disque, etc.....).

II.4. Avantages et inconvénients des antennes microrubans

Les antennes micro rubans ont de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et par conséquent plusieurs applications dans la large gamme de fréquences allant de 100MHz à 50GHz sont réalisables. Parmi ces avantages, on peut citer :

- ✓ Faible poids, petit volume, configuration planaire, faible épaisseur;
- ✓ Faible coût de fabrication, production en masse possible;
- ✓ Ces antennes peuvent être placées sur les missiles, les fusées et les satellites sans modifications importantes;
- ✓ Les antennes ont de petites aires de rayonnement;
- ✓ La polarisation linéaire comme pour le cas des antennes plaques rectangulaire et circulaire (gauche ou bien droite) est possible avec de légers changements dans la position de l'alimentation.
- ✓ L'utilisation de deux fréquences de travail est possible.
- ✓ Les antennes micro rubans sont compatibles avec les constructions modulaires (Composants monolithiques tels que les oscillateurs, les alternateurs variables, les interrupteurs, les modulateurs, les mélangeurs, les déphaseurs et peuvent être adaptées directement sur le substrat);
- ✓ Les lignes d'alimentation et les circuits d'adaptation d'impédance sont fabriqués simultanément avec la structure de l'antenne ;

Cependant, les antennes microrubans ont aussi quelques inconvénients comparées aux classiques tels que :

- ✓ Bande passante étroite;
- ✓ Des pertes par conséquent un gain plus faible;
- ✓ La plupart des antennes microrubans rayonnent par un demi-plan;
- ✓ Des limitations pratiques sur le gain au maximum à 20dB;
- ✓ La performance du rayonnement longitudinal est médiocre;
- ✓ L'isolation entre les éléments rayonnants et l'alimentation est médiocre;
- ✓ Possibilité d'excitation des ondes de surface;
- ✓ Capacité de manipulation à faible énergie;

Néanmoins il existe des moyens substantiels qui peuvent minimiser les effets de certains de ces inconvénients : par exemple l'excitation à onde de surface [14], [15] peut être éliminée, en prenant des précautions lors de la conception et de la fabrication.

De même l'insertion d'un trou métallisé [16] entre la plaque rayonnante et le plan de masse permet d'élargir la bande passante et de remédier aux problèmes des décharges électrostatiques et d'écoulement thermique.

II.5. Alimentation des antennes plaquées

L'excitation est un point très important en étudiant des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories :

- ✓ Les alimentations par contact (par sonde ou ligne microruban).
- ✓ Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

II.5. 1. Alimentation directe par une ligne micro ruban:

Dans ce type d'alimentation, une bande conductrice est reliée directement au bord du patch microruban. La bande conductrice est plus petite dans la largeur par rapport au patch [17]. L'avantage de ce type d'alimentation est qu'elle peut être gravée sur la même face de l'antenne, elle est facile à fabriquer et simple à adapter à la résonance [17]. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite.

On peut distinguer trois types [18]:

➤ Alimentation par ligne microruban à travers un bord rayonnant

Dans ce cas la ligne d'alimentation entre en connexion directement sur le côté rayonnant du patch (Figure I.3a), cette technique est l'une des méthodes les plus utilisées. Il existe une variation de l'impédance d'entrée car le point d'alimentation est déplacé le long de ce côté.

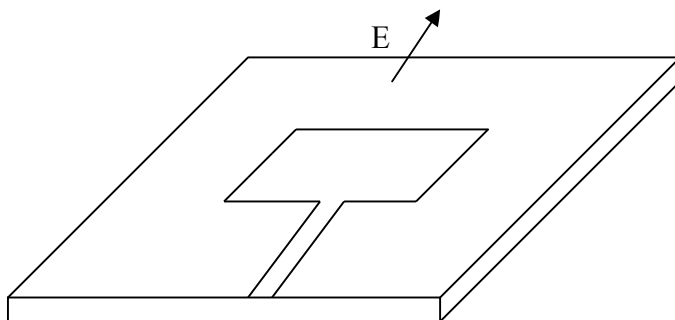


Figure II. 3a Le patch alimenté par ligne micro ruban à travers un bord rayonnant

➤ **Alimentation par ligne microruban à travers un bord nonrayonnant**

La ligne d'alimentation entre en contact avec le patch sur le bord non rayonnant (Figure I.3b), dans ce cas les calculs sont plus complexes, car les courants de la ligne d'alimentation, sont orthogonaux à ceux du patch.

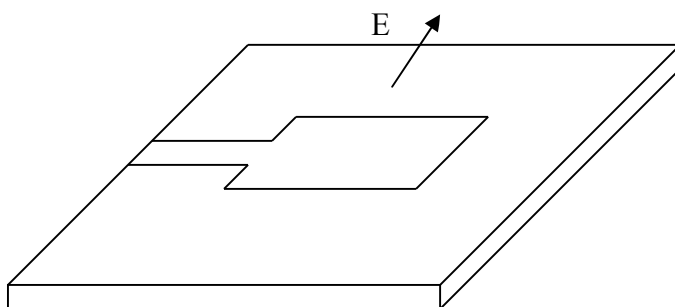


Figure II.3b Le patch alimenté par ligne micro ruban à travers un bord non rayonnant

II.5.2. Antenne patch rectangulaire couplée capacitivement à une ligne microruban

Dans ce cas l'élément rayonnant est couplé capacitivement à la ligne micro ruban injectée dans le substrat (Figure I.3c). L'utilisation de substrat différent entre la ligne d'excitation et l'antenne augment les dimensions de l'antenne.

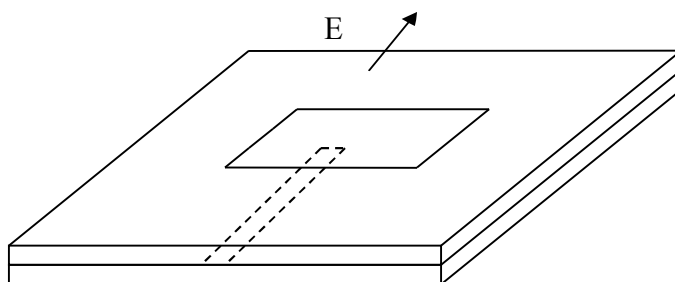


Figure II.3c Le patch couplé capacitivement à ligne micro ruban R de la bande passante de

l'antenne

II. 5. 3. Alimentation coaxiale

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation de sonde est une technique très utilisée pour alimenter les antennes microrubans (Figure II. 4). Dans ce cas le conducteur intérieur du connecteur coaxial traverse le diélectrique et est soudé au patch, alors que le conducteur externe est relié au plan de masse.

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit choisi à l'intérieur du patch, avec une facilité de fabrication. Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme de rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme de rayonnement. De plus, des pertes apparaissent avec le perçage du plan de masse, du diélectrique ainsi que de l'élément plaqué [19].

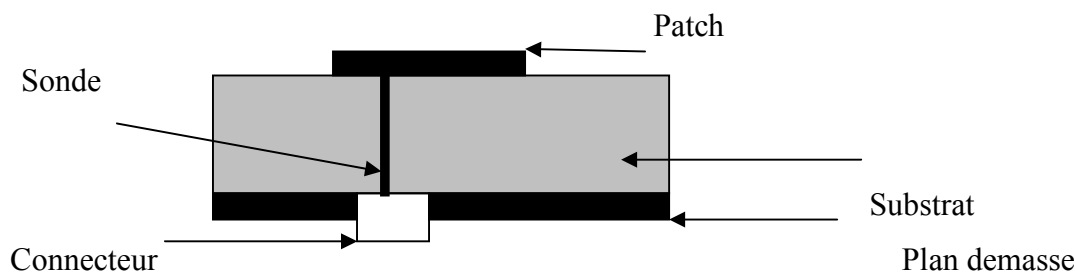


Figure II. 4 Antenne microruban alimenté par sonde

II. 4. 5. Alimentation couplée par ouverture

Ce type d'alimentation est représenté sur la Figure I. 6, deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du rayonnement parasite d'alimentation et l'obtention d'une bande passante plus large et ce par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne.

Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs.

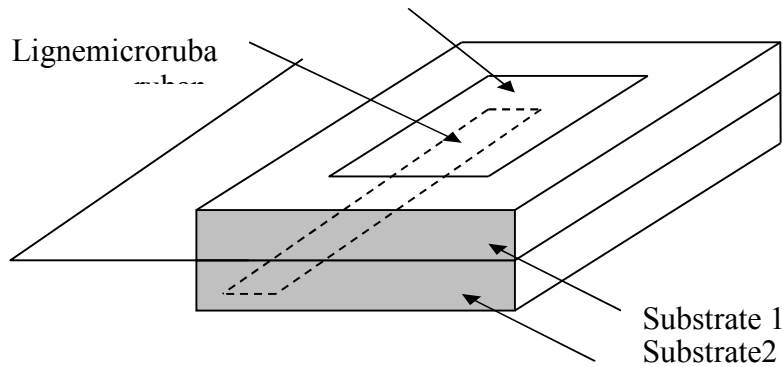


Figure II. 6 Alimentation couplée par proximité

II. 6. Méthodes d'analyses des antennes microrubans

II.6.1. Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques prennent en compte au départ la nature des phénomènes physiques, ce qui permet d'effectuer des approximations, permettant la modélisation du modèle en question. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- ✓ Le modèle de la ligne de transmission;
- ✓ Le modèle de la cavité.

II. 6. 2. Le modèle de la ligne de transmission

Le modèle de la ligne de transmission est considéré comme le plus simple. Ce modèle exploite l'analogie qui existe entre un patch d'une antenne imprimée et un tronçon d'une ligne de transmission ayant deux bords rayonnants. Ce modèle prend en compte au départ la nature des phénomènes physiques, ce qui permet d'effectuer des approximations, permettant la modélisation du modèle. Dans le modèle de la ligne de transmission, l'inconnu à déterminer est la constante de propagation. Les pertes par rayonnement sont incluses dans le coefficient d'atténuation de la constante de propagation. Cependant, cette technique ne rend pas compte des effets des modes d'ordre supérieur.

II. 6. 3. Le modèle de la cavité

Un autre modèle qui est le modèle de la cavité utilisant le courant d'alimentation uniforme donne de bons résultats seulement pour les épaisseurs du substrat inférieur à $0.001\lambda_0$ [20].

La structure imprimée peut être assimilée à une cavité limitée en haut par une plaque conductrice, en bas par un plan de masse et entourée par une surface latérale. Les deux plans conducteurs représentent des murs électriques et la surface latérale constitue le mur magnétique. Dans ce modèle l'inconnu est le système des modes propagatrice et leurs fréquences de résonance [21].

II.6.4. Méthodes rigoureuses

Ces méthodes sont les plus utilisées récemment. Elles sont basées sur la distribution du courant électrique sur le conducteur.

Parmi ces méthodes, on peut citer :

- La méthode des différences-finies;
- La méthode des éléments-finis;
- Le système d'équations intégrales couplées, discrétisées par la méthode des moments

II. 6. 4. 1. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis s'applique aux dispositifs microondes de formes quelconques. Elle est basée sur la résolution des équations de Maxwell et sur la description géométrique de la structure sous forme d'un maillage. Elle consiste à diviser l'espace en petits éléments homogènes mais de taille pratiquement très variable, ce qui constitue l'un des points forts de cette méthode [22].

Cette méthode permet de calculer, en chaque point des éléments divisant l'espace, les champs électriques qui minimisent la fonction d'énergie, cette dernière s'écrit sous forme matricielle : $[J] = [Y] \cdot [E]$.

Où $[J]$ représente les sources de courant et $[E]$ les champs électriques inconnus.

La matrice $[Y]$ qui décrit la géométrie et les contraintes de frontières, est généralement clairsemée car chaque élément n'interagit qu'avec ses voisins. Les autres grandeurs comme le champ magnétique et les courants induits sont calculés à partir des champs électriques.

L'avantage de la méthode des éléments finis est lié au fait que la forme tétraédrique et la variation des dimensions des cellules élémentaires caractérisant le volume discrétisé, donne au maillage une très grande souplesse.

Cette méthode permet de simuler des structures géométriques complexes mais avec des gros moyens informatiques.

II. 6. 4. 2. La méthode des différences finies

La méthode des différences finies dans le domaine temporel, notée F.D.T.D, est fondée sur le schéma explicite de Yee, présenté en 1966.

Elle permet de calculer à chaque instant discret de l'espace, les composantes du champ électromagnétique dans chaque cellule élémentaire du volume tridimensionnel.

On applique la transformée de Fourier à la réponse temporelle pour obtenir la réponse

fréquentielle du système.

L'avantage principal de cette méthode est la simplicité de sa formule, le calcul est alors fait dans le domaine temporel sur une large bande de fréquence. Le temps de calcul croît de façon linéaire en fonction des nombres d'inconnues (ce qui n'est pas le cas pour la méthode des éléments finis) [22], [23].

Mais son principal inconvénient est lié au fait que le maillage de la structure doit être uniforme et elle est donc peu adaptée au traitement des dispositifs comportant des éléments ayant des ordres de grandeurs très différents.

II. 6. 4. 3. La méthode TLM

La méthode de la matrice des lignes de transmission TLM permet de discrétiser les champs et les courants de la structure étudiée en petits éléments, chacun des ces éléments est considéré comme un ensemble de ligne de transmission et les calculs s'effectuent directement dans le domaine temporel.

L'un des points forts de cette méthode est la formulation simple qui ne dépend pas beaucoup de la géométrie de la structure étudiée (ce qui n'est pas le cas pour la méthode spectrale). Elle est facile pour traiter des structures complexes composées de plusieurs matériaux, et particulièrement appropriée pour l'analyse des structures planaires multicouches.

II.6. 4. 4. La méthode des moments

L'utilisation de la méthode des moments dans les problèmes électromagnétiques a été développée pour la première fois par Newman [24], est une manière de résolution d'équations intégrales qui permet de réduire celles-ci en un système d'équations linéaires appliqués aux structures planaires ou quasi-planaires sur les structures de 2-D [25]. Pour utiliser cette méthode, il faut décomposer la structure étudiée en plusieurs parties ou cellules.

La résolution numérique des équations de Maxwell de la structure étudiée, permet d'écrire les champs électriques ou magnétiques en fonction d'une somme des courants induits. Le calcul de la distribution de courant évalué sur chaque section par annulation des champs électriques tangentiels, permet d'obtenir les paramètres $[Z]$.

Dans la méthode des moments, l'équation intégrale est réduite à un ensemble d'équations algébriques linéaires de la forme suivante: $[Z] \cdot [I] = [V]$.

La matrice d'impédance $[Z]$ est calculée à partir des équations intégrales. On va exciter la structure avec le vecteur de tension $[V]$ et par la suite le vecteur de courant $[I]$ sera

calculé. Une fois le courant calculé pour chaque élément, les champs électrique et magnétique seront déterminés.

II.8. Applications

Avec les recherches continues et les développements et l'utilisation des antennes microrubans, il est attendu qu'elles remplacent les antennes classiques pour la plupart des applications [26]. Il existe différentes applications réussies :

- ✓ Telecommunication par satellites.
- ✓ Equipements portatifs.
- ✓ Des éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- ✓ Antenne d'émission utilisée en médecine.
- ✓ Comande et système.
- ✓ Récepteur satellite de navigation.
- ✓ Télémétries (télémessure) par missile.

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré le rôle et l'évolution technologique des antennes patches, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Nous avons montré également quelques techniques d'alimentation, ainsi que les méthodes d'analyses les plus utilisées pour les structures microrubans de forme quelconque. Aucune de ces méthodes numériques citées n'est parfaite, elles présentent toutes des avantages et des inconvénients.

Actuellement, beaucoup de ces méthodes rigoureuses sont implémentées dans des logiciels commerciaux. Il existe plusieurs simulateurs électromagnétiques comme le HFSS, CST et I3ED pour la conception et l'analyse des antennes microruban. Dans le chapitre suivant, on va voir quelques simulateurs; HFSS et CST pour comprendre mieux comment ils fonctionnent.

