

I.1. Introduction :

Les antennes microrubans (imprimées, à élément rayonnant, plaquées, ou même patch ou microstrip en anglais) sont apparus dans les années cinquante et ont été développées au cours des années soixante-dix [1].

Cependant plusieurs recherches ont été menées pour arriver à une antenne microruban optimale pouvant répondre aux exigences de l'industrie des télécommunications pour des applications aéronautiques, aérospatiales et militaires.

Ce type d'antennes s'adapte facilement aux surfaces planes et non planes et présentent une grande robustesse et flexibilité lorsqu'ils sont montées sur des surfaces rigides. Les antennes microrubans sont également très performantes en termes de résonance, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement. Les inconvénients majeurs des antennes Microrubans résident dans et une bande passante étroite [1].

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

I.2. Historique :

L'utilisation du câble coaxial ou les deux fils parallèles comme des lignes de transmission remonte au 19^{ème} siècle. La réalisation des composants en radiofréquences ou en micro-ondes, en utilisant ces lignes de transmission nécessite des efforts mécaniques considérables [2].

L'apparition des techniques des circuits imprimés dans le milieu du 20^{ème} siècle a conduit à la réalisation de la version imprimée de ces lignes de transmission qui pouvait être élaborée et permettre une production beaucoup plus simple de la masse des composants micro-ondes. Avec l'image du plan de masse offrant un second conducteur, le circuit équivalent de la ligne de transmission bifilaire est connu sous le nom de microruban [2].

La géométrie microruban, qui rayonne des ondes électromagnétiques, a été envisagée initialement dans les années 1950. La réalisation des résonateurs compatibles avec les lignes de transmission microruban date des années 1952 (Grieg et Englemann). La première réalisation des microrubans sous forme d'une antenne imprimée, liée à la

ligne microruban de transmission, a été développée en 1953 par Deschamps, et en 1955 Gutton et Baissinot ont proposé la conception du résonateur microruban [2].

I.3. Définition générale d'une antenne :

Une antenne est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement. Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un dispositif qui permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques. Elle transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception [3].

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants [3] :

- ✓ Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation
- ✓ Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- ✓ Transmettre le plus fidèlement possible une information.

I.4. Applications :

Pour de nombreuses applications, les avantages des résonateurs microrubans l'emportent largement face à leurs limitations. initialement, cette technologie du résonateur s'est trouvée fortement répandue dans les systèmes militaires de haute technologie, tels que missiles, roquettes, fusées, avions et satellites...etc [4].

Cependant, les résonateurs microrubans sont aujourd'hui de plus en plus répandus dans Le secteur commercial en raison de la réduction des coûts en matière de substrat diélectrique et de maturité des technologies de résonateurs imprimés. En'effet, dans les satellites de communication, des polarisations circulaires sont requises et peuvent être réalisées à partir de plaque rayonnante de forme carrée ou bien circulaire en utilisant 1 à 2

Points d'alimentation. Les systèmes mobiles utilisant ces résonateurs sont les véhicules, aussi les équipements de petite taille (les téléphones portables) [4].

I.5. Présentation de la structure de l'antenne microruban :

Dans sa forme la plus simple, une antenne microruban est constitué d'un élément conducteur appelé patch imprimé sur la face supérieure d'un substrat diélectrique, la face inférieure complètement métallisée constitue le plan de masse Figure (I-1). Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or et il peut prendre n'importe quelle forme possible. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photo gravée sur le substrat diélectrique [5].

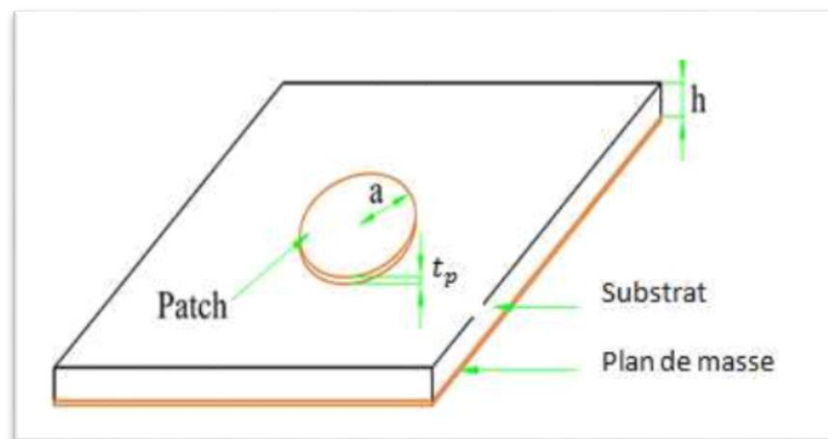


Figure (I-1) :Antenne patch micro-ruban circulaire.

L'élément rayonnant peut prendre plusieurs formes, Comme le montre la Figure (I -2):

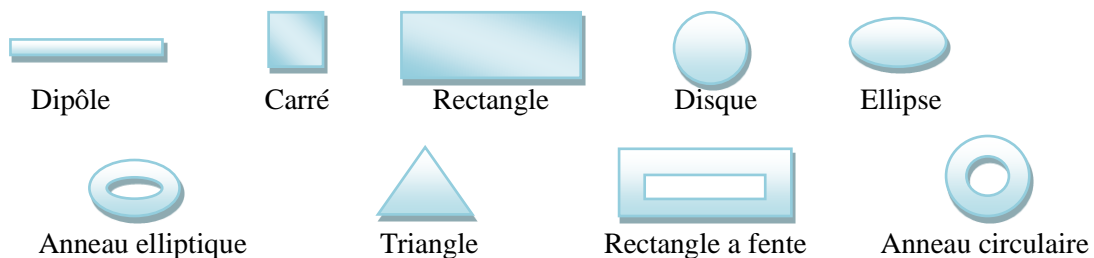


Figure (I-2) : Divers types d'éléments rayonnants.

Pour obtenir une antenne d'efficacité importante, il est souhaitable de choisir un substrat diélectrique suffisamment épais et dont la constante diélectrique est de faible valeur ce qui contribue à augmenter les effets de bords et donc à favoriser le champ rayonné [6].

I.6. Avantages et inconvénients des antennes microrubans :

Actuellement, les antennes micro-rubans sont largement utilisées, leurs applications couvrent un large domaine de fréquence (*MHz à 100 GHz*), leur configuration et dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (avion, voiture, missile,). Parmi les avantages de ces d'antennes, on peut citer:

- ✓ Profil plat;
- ✓ Faible poids;
- ✓ Volume réduit;
- ✓ La conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes ;
- ✓ Simplicité de leurs structures;
- ✓ Faible coût de fabrication donc la production en grandes quantités devient facile;
- ✓ Plusieurs éléments radiants peuvent être placés sur la même plaque avec le réseau d'alimentation ou avec d'autres circuits imprimés (déphaseurs, commutateurs, etc.).

Cependant, elles présentent les inconvénients suivants:

- ✓ Faible bande passante (1 à 5 %), le facteur de qualité Q , va d'environ 50 jusqu'à 75;
- ✓ Faible puissance;
- ✓ Impureté de la polarisation;
- ✓ Faible gain ;
- ✓ Donc, la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performances et de complexité de réalisation [7].

I.7. Principe de fonctionnement :

Pour comprendre le fonctionnement d'une antenne microruban, il est nécessaire de connaître les champs électromagnétiques en champ proche. Lorsque la ligne d'alimentation est excitée par une source radiofréquence, une onde électromagnétique guidée entre la ligne et le plan de masse va se propager jusqu'à l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner). Une distribution de charge va s'établir sous l'élément rayonnant, et sur le plan de masse.

Pour simplifier le problème, la structure de la figure I.3 peut être assimilée à une cavité bornée par deux murs électriques (plan de masse et élément rayonnant), et de mur latéral magnétique est accumulée selon un ensemble de fréquences modales (fréquences modales de résonance) auxquelles des configurations de répartition des champs sont permises, appelées modes. Ces cavités fonctionnent alors sur des modes TM_{mn} .

Pour une antenne microruban circulaire de rayon a , avec c la célérité de la lumière dans le vide et ϵ_r la permittivité relative du substrat diélectrique où $\tan \delta$ représente les pertes fréquences de résonance de chaque mode peuvent être calculées par [8] :

$$f_0 = \frac{\beta_{nm} c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r (1 - j \tan \delta)}} \dots \dots \dots (I - 1)$$

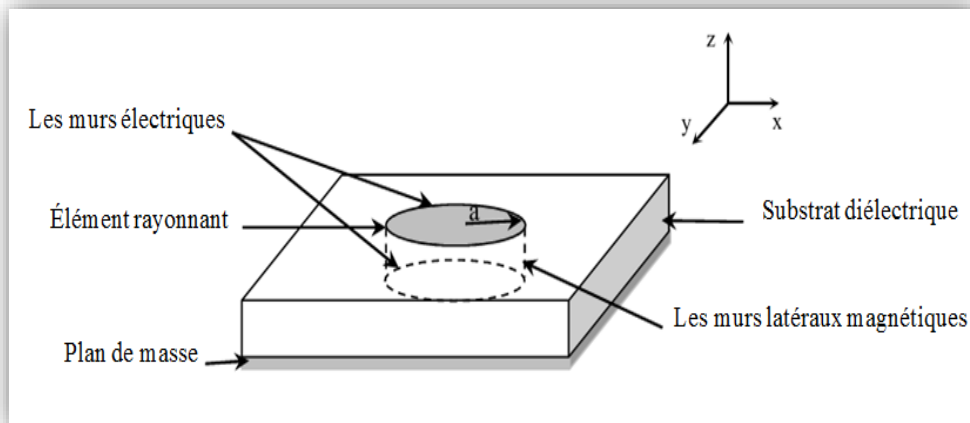


Figure (I-3) : Modèle d'une antenne microruban.

I.8. Caractéristiques des antennes :

Dans les communications sans fil, chaque application met en relief certaines caractéristiques des antennes. D'une manière générale, une antenne utilisée dans un type d'application ne peut pas l'être dans d'autres. Une antenne peut être caractérisée par [9]:

I.8.1. Représentation en quadripôles :

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle Figure (I-4) défini par les paramètres S :

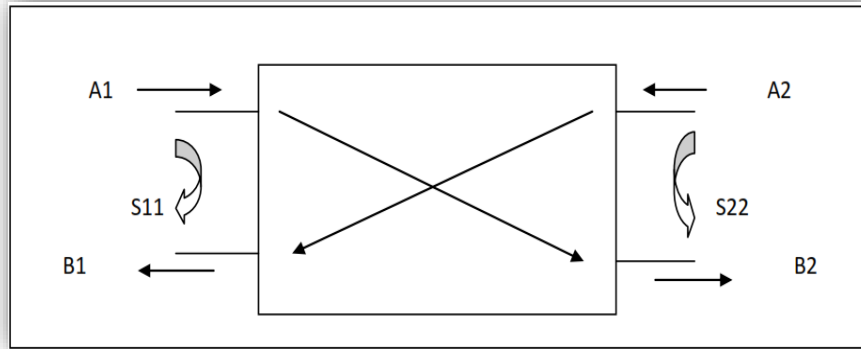


Figure (I-4) : Représentation en quadripôle

A_1, A_2, B_1 et B_2 sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

$$B_1 = S_{11} \times A_1 + S_{12} A_2 \dots \dots \dots (I - 2)$$

$$B_2 = S_{21} \times A_1 + S_{22} A_2 \dots \dots \dots (I - 3)$$

Le coefficient S_{11} correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $A_2 = 0$.

Le coefficient S_{12} représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque $A_1 = 0$.

Le coefficient S_{21} est le gain du quadripôle lorsque $A_2 = 0$.

Le coefficient S_{22} est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $A_1 = 0$ [9].

I.8.2. Coefficient de réflexion S_{11} :

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur ce paramètre que l'on se base lors de l'optimisation [9].

I.8.3. Directivité :

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. [10]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \dots \dots \dots (I - 4)$$

I.8.4. Rendement de l'antenne :

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \dots \dots \dots (I - 5)$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [9].

I.8.5. Gain :

Le gain est le résultat de deux effets : la directivité et la perte.

Si G est le gain, alors [9] :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \dots \dots \dots (I - 6)$$

I.8.6. Ouverture :

Si G_m est le gain maximal d'une antenne donnée dans un plan bien déterminé, alors son ouverture dans ce plan est l'angle qui se trouve entre deux directions de ce plan ayant la moitié du gain maximal (gain à -3 dB), soit $G_m/2$ [9]

I.8.7. Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne.

Cette impédance est donnée par la formule :

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \dots \dots \dots (I - 7)$$

Z_0 = Impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

N.B : Comme S_{11} est fonction de la fréquence, alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence [9].

I.8.8. Fréquence de résonance :

Une antenne s'utilise en général avec des signaux autour d'une fréquence donnée pour laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnant. La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés [11].

I.8.9. Adaptation et condition d'adaptation :

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c (en général, $Z_c = 50 \Omega$). Pour assurer un transfert maximal de puissance entre alimentation et l'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion Γ_{in} ou S_{11} en entrée de l'antenne [12].

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchie en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique [12].

$$P_A = P_s(1 - |\Gamma_{in}|^2) \dots \dots \dots (I - 8)$$

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \dots \dots \dots (I - 9)$$

Condition d'adaptation $\implies S_{11} = 0 \Leftrightarrow Z_{in} = Z_c$

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance ($P_{mismatch} = \Gamma^2 P_A$) est renvoyée vers la source (ou re-rayonnée par l'antenne dans le cas de la réception), appelée en anglais mismatch loss (pertes de désadaptation). En pratique, soit on cherchera à concevoir l'antenne de telle manière à ce qu'elle présente une impédance égale à Z_c à la fréquence de travail, soit on disposera en entrée de l'antenne un circuit de transformation d'impédance qui modifiera l'impédance d'entrée de l'antenne vue depuis la source et assurera l'adaptation d'impédance [12].

I.8.10. Bande passante et facteur de qualité :

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion.

Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante.

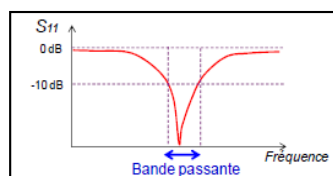


Figure (I-5) : Bande passante et coefficient de réflexion

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante BW (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance f_{Res} .

Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série équation [12]).

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \dots\dots\dots(I - 10)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} L_{ant}} \dots\dots\dots(I - 11)$$

R_{ant} =résistance d'antenne. Q =facteur de qualité du circuit RLC. BW =bande passante à 3 dB. f_{Res} =la fréquence de résonance. L_{ant} =longueur d'antenne.

I.8.11. Diagramme de rayonnement :

La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée par une antenne est caractérisée par son diagramme de rayonnement. On définit le diagramme de rayonnement d'une antenne par la représentation polaire du champ électrique de sa fonction caractéristique. Il est cependant, plus intéressant de considérer le carré de la puissance rayonnée, normalisée par rapport à son maximum: c'est le digramme de rayonnement en puissance de l'antenne [13].

Les digrammes de rayonnement sont généralement mesurés dans les plans de symétrie, s'il y en a, ou dans les plans principaux nommés *plan E* et *plan H*. Ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électrique et magnétique atteignent leurs valeurs maximales [13].

Avec une source polarisée parallèlement à l'axe (Ox), le plan E est caractérisé par $\varphi=0^\circ$ et θ variable tandis que pour une source polarisée parallèlement à l'axe (Oy), le plan H est caractérisé par $\varphi = 90^\circ$, θ variable. Les diagrammes de rayonnement sont représentés en coordonnées cartésiennes, en coordonnées polaires ou en coordonnées sphériques.

I.8.11.1. Lobe principal :

La quasi-totalité de la puissance est concentrée dans la direction du maximum de rayonnement, formant ce qu'on appelle le lobe principal. La caractéristique qu'on

associe à celui-ci est sa largeur à mi- puissance, également appelée ouverture à - 3dB. Il arrive parfois de mesurer la largeur à -10dB, lorsque l'antenne présente un lobe principal très étroit [13].

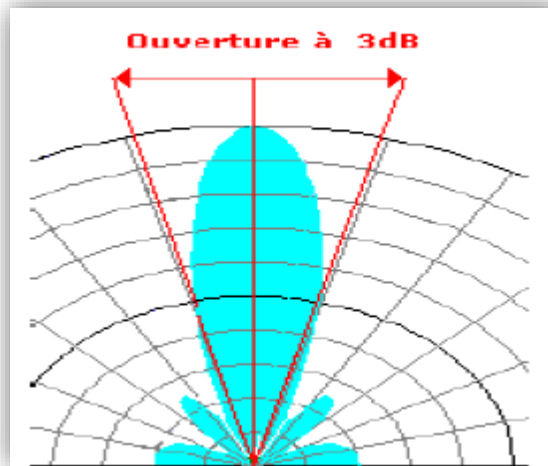


Figure (I-6) : Ouverture à -3 dB

I.8.11.2. Lobes secondaires :

En dehors du lobe principal, la puissance rayonnée est répartie dans l'espace, formant ce qu'on appelle les lobes secondaires ou latéraux Figure (I-7). Ces derniers sont caractérisés par leurs niveaux et leurs positions par rapport au maximum de rayonnement [13].

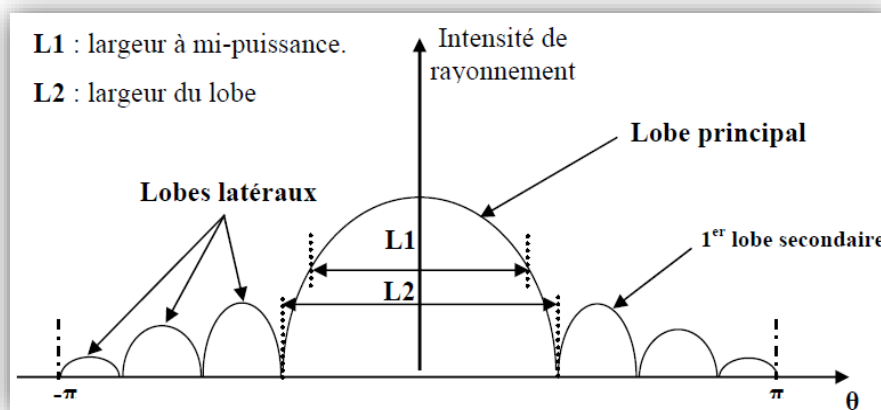


Figure (I-7) : Digramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes

I.9. Techniques d'alimentation :

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes microrubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne microruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture.

I.9.1. Alimentation par ligne microruban :

Dans le premier cas, une ligne microruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre la figure (I-8-a), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance.

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5% [14].

I.9.2. Alimentation par sonde coaxiale :

L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse Figure (I-8-b). L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais [14].

I.9.3. Alimentation par couplage par fente :

L'alimentation par ligne microruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite.

Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne microruban comme le montre la figure (I-8-c). Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite [14].

I.9.4. Alimentation par couplage de proximité :

La meilleure bande passante pouvant atteindre 13% est réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité illustrée par la figure (I-8-d). L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne.

Cependant elle est très difficile à mettre en œuvre [14].

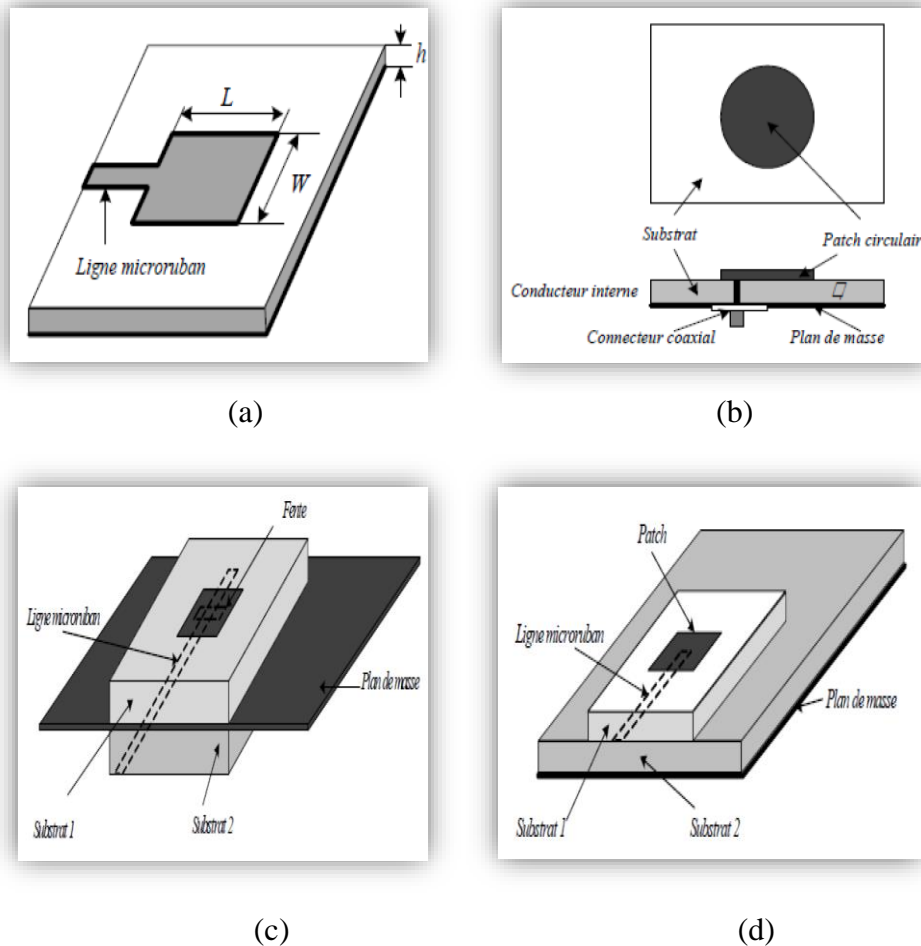


Figure (I-8) : Techniques d'alimentation

a) Par ligne microruban,
c) Par couplage par fente,

b) Par ligne coaxiale,
d) Par couplage par proximité.

I.10. Sélection du substrat :

Le substrat joue un rôle primordial dans la fabrication des résonateurs microrubans. Ces derniers possédant aussi des qualités en tant que métaux, leurs propriétés

électromagnétiques sont caractérisées essentiellement par trois grandeurs physiques: conductivité, constante diélectrique relative et angle de perte.

Il doit répondre à certaines exigences, en particulier :

- La conservation de la forme originale;
- La stabilité en température (pour soudure) et aux conditions atmosphérique;
- L'uniformité de la permittivité relative et de la hauteur (sur de grandes plaques);
- De faible pertes diélectriques ($\tan(\delta) \leq 3.10^{-3}$) pour une meilleure efficacité;
- Une résistance aux produits chimiques (pour la phase de photolithographie);
- Une faible rugosité;
- Une facilité d'usinage.

En effet, ce choix est très important car il affecte les différentes caractéristiques non négligeables des résonateurs microrubans. Il faut donc choisir un substrat diélectrique convenable d'épaisseur h et de permittivité relative ϵ_r appropriée. Généralement, on utilise des substrats de permittivité faible pour ainsi permettre un bon rayonnement du résonateur. Les substrats de permittivité relative inférieure à 3 sont privilégiés à moins qu'un résonateur de petite taille soit désiré. Une faible valeur de ϵ_r améliorera le rayonnement et la largeur de bande passante.

Le choix d'un épais substrat, en outre mécaniquement résistant, augmentera la puissance de rayonnement, la largeur de bande, la directivité et le gain, et réduira les pertes dans le conducteur. Cependant, cela présentera certains inconvénients, à savoir une augmentation du poids, des pertes dans le diélectrique et dans la surface d'onde.

I.10.1.Caractéristiques des matériaux diélectriques :

Un grand nombre de substrats diélectriques est disponible pour les différentes applications, et se divisent en différentes catégories [15, 16].

-Les matériaux ferromagnétiques :

Comprenant les substrats ferrites et Yttrium-IronGarnet (YIG). L'effet gyromagnétique est mis à profit pour concevoir des circulateurs, des isolateurs ou

encore des résonateurs microrubans rayonnants naturellement une onde en polarisation circulaire. Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectrique.

- Les matériaux céramiques :

Comme le Saphir, l'oxyde de Beryllium (BeO), le Rubile (TiO_2), ils sont couramment employés pour les circuits microrubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine (Al_2O_3) avec une permittivité relative entre 11 et 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et une bonne rigidité, mais ils sont cassables et donc fragiles et présentent de faibles pertes ($\tan\delta < 10^{-3}$). Leurs permittivités sont pour la plupart élevées ;

- Les matériaux semi-conducteurs :

Tels que: Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si) permettent couramment la fabrication des circuits M.M.I.C. La surface disponible, généralement réduite pour réaliser des résonateurs destinés à des applications dans le domaine millimétrique;

- Les matériaux synthétiques :

La plupart de ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés électriques, faible permittivité relative (2 à 3) avec de faibles pertes ($\tan\delta \approx 0,003$). Parmi eux, on trouve : le polyéthylène, le polyester, le polytétrafluorethylène (PTFE ou Verre Téflon), le polyméthilméthacrylate (PPMA ou plexiglass). Ses avantages et son coût modéré font que le Téflon (TLX et TLV) est beaucoup utilisé;

- Les matériaux photoniques :

Depuis le début des années soixante, un nouveau type de matériaux, les cristaux photoniques (matériaux à permittivité périodique) ont fait l'objet d'une grande effervescence dans le monde scientifique. La grande majorité des recherches portant sur ces matériaux a été effectuée par des physiciens dans le cadre d'études de dispositifs optiques. Actuellement, les chercheurs s'intéressent à une application dans le domaine des microondes. Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface;

- Les matériaux chiraux:

Les propriétés de chiralité ou de bi-isotropie que possèdent certains matériaux, notamment dans le domaine des microondes et de l'optique, font depuis plusieurs années

l'objet d'intenses recherches. A. Bossavit prédit qu'on peut construire des matériaux chiraux en incluant périodiquement dans une matrice de matériau diélectrique des inclusions de matériau fortement conducteur. Le comportement souhaité s'obtient alors à la limite $\varepsilon_r \rightarrow 0$ où ε_r désigne la taille de la cellule de périodicité. Un des points clé pour aboutir au comportement chiral est que la conductivité des inclusions doit être telle que la profondeur de peau dans ces matériaux est de l'ordre de ε_r . A. Bossavit a proposé une loi de comportement équivalente à l'aide de techniques formelles à base de développement de Taylor locaux.

- **Les matériaux T.M.M :** (ThermosetMicrowaveMaterial):

Ces matériaux constitués de résines chargées de différents composants céramiques, génèrent une gamme de substrats TMM-3, TMM-4, TMM-6, TMM-10 de faibles pertes ($\text{tg}\delta < 0.0018$) pour des permittivités respectivement égales à 3.25 , 4.5 , 6.5 , 9.8. Rigides et moins cassants que les céramiques, ils conservent leurs dimensions et leurs permittivités à des températures élevées. - Les matériaux RO3000: Ces matériaux sont de permittivité relative stable en température et en fréquence. Ils sont fabriqués par ajout de poudre céramique au Téflon et peuvent être utilisés à haute fréquence (> 30 GHz);

- **Les matériaux composites :**

Obtenus en combinant les qualités radioélectriques et mécaniques d'un substrat. En ajoutant aux matériaux plastiques de la fibre de verre (cas du DUROID 5870, TLC et ARLON 320) ou de la poudre de céramique (ARLON 340), les propriétés mécaniques sont améliorées et l'on peut, suivant le dosage, ajuster la permittivité. Des produits comme le DUROID sont couramment utilisés pour réaliser des résonateurs microrubans ;

- **Les matériaux RO3000 :** (ajout de poudre de céramique au Téflon)

De permittivité relative stable en température et en fréquence, peuvent être utilisés pour des applications au-delà de 30 GHz ;

- **Les matériaux RO4000:**(ajout de poudre de céramique à des trames de verre),

Ont des propriétés électriques stables en température et sur une large bande de fréquences, et de faible coût de fabrication (sur la même base que le verre époxy);

- Les verres Téflon METCLAD :

Ont une surface cuivrée finement laminée: Ils conservent donc les avantages du verre Téflon. Des épaisseurs de métallisation variables (de 5 à 105 μm) sont disponibles. Ils bénéficient d'une amélioration de l'état de surface, ce qui permet l'avantage de réduire le phénomène de sous gravure qui apparaît lors de la réalisation de circuit imprimé et qui peut être pénalisant aux fréquences millimétriques (car les lignes microrubans ont une très faible largeur). La permittivité de ces matériaux varie de 2.17 à 3.2 et les pertes diélectriques de 0.0013 à 0.0025 (MY1, MY2...MX1, MX2...). Grâce à ces avantages, le MY2 tend de nos jours à remplacer le RT-DUROID 5880;

-Les mousses fabriquées par ROHACELL:

Ce sont des mousses synthétiques dont la valeur de leur constante diélectrique est très proche de celle de l'air ($\epsilon_r=1.07$); elles peuvent être utilisés comme substituant au matériau "air" pour rigidifier la structure.

I.10.2. Anisotropie du substrat :

L'anisotropie est définie comme étant la dépendance de la constante diélectrique du substrat sur l'orientation du champ électrique appliqué. Pour obtenir les propriétés électriques et mécaniques nécessaires, des matériaux de remplissage appropriés sont généralement ajoutés pendant le processus de la fabrication du substrat. Ces remplisseurs ont une tendance à supposer les orientations préférées. Ceci peut mener aux effets d'anisotropies à quelques substrats pratiques, comme le Saphir et le PTFE [15, 16].

Certaines substances présentent une anisotropie diélectrique en raison de leurs structures cristallines naturelles ou à la suite de leur processus de production. Les substances isotropes peuvent également présenter une anisotropie pour les hautes fréquences.

Dans la conception de circuits intégrés micro-ondes (composants et résonateurs microrubans) les substances anisotropes ont été de plus en plus populaires en raison de la disponibilité [17,18,19]: comme le saphir, le magnésium fluorure et epsilam-10.

Les caractéristiques des substrats précités sont issues des catalogues des fabricants dont les valeurs sont généralement fournies à 10 GHz. Il convient donc, pour des applications 40GHz, soit d'extrapoler ces valeurs de manière très approximative, soit de caractériser les matériaux pour une connaissance précise.

I.11.Méthodes d'analyse :

Les antennes microrubans, généralement constituées d'un élément rayonnant à deux dimensions imprimé sur un substrat de faible permittivité, sont principalement analysées par les méthodes dédiées aux circuits planaires.

Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories les méthodes analytiques simples, tels que le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité et les méthodes numériques rigoureuses telles que la méthode des moments, la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies. Depuis les années quatre-vingt dix de nouvelles méthodes dites d'optimisation basées sur les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes génétiques ont été introduites avec succès [14].

I.11.1.Méthode analytiques :

Ces méthodes sont basées sur la distribution du courant magnétique autour du patch, les principales méthodes de cette catégorie sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité [14].

I. 11.1.1.Modèle de la ligne de transmission :

Le traitement théorique basé sur le modèle de la ligne de transmission (MLT) était le premier et le plus simple modèle utilisé pour l'analyse et la synthèse des antennes microrubans. Dans ce modèle l'élément rayonnant est vu comme un prolongement d'une ligne de transmission. Malgré son caractère empirique, le modèle de la ligne de transmission peut être comparable en précision aux modèles les plus complexes surtout pour les substrats électriquement minces, il permet une bonne interprétation physique mais modélisé difficilement le couplage.

Développé en premier lieu pour les patches rectangulaires, ce modèle a été amélioré pour permettre la modélisation d'autres formes de patch, le couplage, les substrats multicouches et les surfaces non planaires telle que la surface cylindrique [20].

I.11.1.2.Modèle de la cavité :

Le modèle de la cavité offre la simplicité et la visibilité physique dans l'analyse des antennes microrubans. Une antenne imprimée peut être assimilée à une cavité fermée par deux murs électriques (le plan de masse et l'élément rayonnant) et quatre murs magnétiques verticaux. Une longueur et une largeur effective sont introduites pour prendre en compte les débordements des lignes des champs sur les bords de l'élément rayonnant.

Les champs à l'intérieur de la cavité peuvent être exprimés en fonction de modes discrets satisfaisant individuellement des conditions aux limites appropriées. Une fois ces champs connus, le champ rayonné, la puissance totale et l'impédance d'entrée seront alors déduits [20]. Ce modèle n'est valide que pour des substrats électriquement minces et modélise difficilement le couplage.

I.11.2.Méthodes numériques :

Les techniques numériques, basées sur la détermination de la distribution du courant sur la surface de l'élément conducteur et le plan de masse dans le domaine fréquentiel pour certaines et temporel pour d'autres, peuvent analyser les formes les plus arbitraires et les multicouches. Toutefois, elles nécessitent toutes un temps de calculs, un espace mémoire et un effort très considérables et ne permettent que très peu d'interprétations physiques [14].

I.11.2.1.Méthode des éléments finis :

La méthode aux éléments finis, très employée dans le domaine fréquentiel, consiste à discrétiser les équations de Maxwell en amont au niveau de la formulation aux dérivées partielles des équations de propagation [20]. La première étape consiste à mailler le domaine de calcul grâce à des éléments géométriques adaptés, les triangles pour les problèmes à deux dimensions et les tétraèdres dans les cas tridimensionnels. À chacun de ces éléments géométriques est associé un certain nombre de nœuds auxquelles sont attribuées des fonctions de base linéairement indépendantes les unes des autres et sont une approximation continue de la solution du problème.

La deuxième étape consiste à choisir une distribution de fonctions de test, respectant des conditions de dérivabilité et de continuité au bord du domaine de calcul. Ceci permet alors de reformuler l'équation d'onde et d'éliminer les dérivées à l'ordre un et d'aboutir ainsi à une formulation variationnelle. L'intérêt d'une telle formulation réside dans le fait qu'elle réunit en une seule expression, l'équation d'onde et les conditions aux limites tout en ne faisant intervenir que des dérivées d'ordre un. Le cas particulier où les fonctions de test et d'essai sont identiques est appelé procédure de Galerkin. L'avantage d'une telle technique réside dans la simplicité de traitement pour les géométries les plus complexes et les matériaux inhomogènes tout en tenant compte des dispersions. Cependant elle reste inefficace comparée à la méthode des moments pour le traitement des conducteurs rayonnants [14].

I.11.2.2.Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies dans le domaine temporel F.D.T.D (*Finite Difference Time Domain*) est une approche numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temporel dans une structure uniformément maillée. La méthode consiste à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées. Les composantes des champs électrique et magnétique sont décalées d'une demi-cellule spatiale et calculées d'une manière alternative et itérative, à des multiples pairs et impairs du demi- pas temporel.

Cette technique à l'avantage de permettre une caractérisation dans une large bande de fréquence d'une structure en une seule simulation, les paramètres de propagation et l'impédance caractéristique peuvent être déterminés en appliquant la transformée de Fourier [20].

I.11.2.3.Méthode des moments :

La méthode des moments utilisée essentiellement dans le domaine fréquentiel est une technique numérique qui permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales en le transformant en un système matriciel résolu par ordinateur. Elle est basée sur le critère de nullité d'une fonctionnelle constitué à partir d'une intégrale des résidus, due à la différence entre la solution approximative et la solution exacte, pondérée par des fonctions de test [20]. La fonction d'essai est exprimée sous forme de fonctions de bases dont les coefficients de pondération sont déterminés en résolvant le système linéaire. La procédure de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions de test identiques aux fonctions de base est applicable aussi dans cette méthode.

La méthode des moments est très précise, très souple, peut traiter un élément seul ou plusieurs éléments en réseau ou empilés, les formes arbitraires et le couplage. Cependant, elle est très complexe, permet moins l'interprétation physique et nécessite un temps de calculs considérable.

I.11.3.Méthodes d'optimisation :

L'optimisation est le processus qui consiste à minimiser ou à maximiser une fonction objective ou de coût. Dans le cas d'une antenne microruban, l'optimisation consiste à approximer d'une manière précise un de ces paramètres tels que la fréquence de résonance, l'impédance d'entrée ou le paramètre S11. Les principales méthodes de

cette catégorie sont les algorithmes génétiques pour l'optimisation globale et les réseaux de neurones pour l'optimisation locale [14].

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les antennes microrubans de forme circulaire, les différentes méthodes d'alimentation, ainsi que les différents matériaux et substrats utilisés. Nous avons également cité les avantages et les inconvénients, les principales contraintes imposées à la réalisation de ces structures d'alimentation et leurs applications. Ainsi nous avons présenté les méthodes d'analyse utilisées pour traiter ce genre de résonateur, en se basant sur les modèles électromagnétiques notamment par l'utilisation de la méthode des moments.

Bien que les antennes microrubans présentent des géométries simples, cependant ils exigent une étude approfondie, dont les différentes méthodes d'analyse bénéficient des développements théoriques importants de conception et de simulation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Aditi Sharma, Vivek K. Dwivedi, and G. Singh**, "*THz Rectangular Patch Microstrip Antenna Design Using PhotonicCrystal as Substrate*", Department of Electronics and Communication Engineering Jaypee University of Information Technology, Solan-173 215, India 2008.
- [2] **R. Bancroft**, "*Microstrip and Printed Antenna*", by SCITECH publishing, INC Design 2nd Edition, (2009).
- [3] **M. Hassad**, "*Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat à tenseurs de permittivités et de perméabilité diagonaux*", thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2009.
- [4] **F. Benmeddour**, "*Etude et réalisation d'un résonateur microruban de forme circulaire (Application au cas particulier de l'alimentation par couplage)*", thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Mars 2012.
- [5] **A.Tarek**, "*Etude des matériaux composites (Titanate oxyde): application pour la réalisation des substrats d'antennes miniatures*", thèse de Magister ,Institut d'électronique ,Universite Setif-1UFAS (Algerie), 2014.
- [6] **James, J. R., and P. S. Hall (Eds)**, "*Handbook of Microstrip Antennas, Peter Peregrinus*", London, UK, 1989.
- [7] **Chouti Leila**, "*Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage* ", thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [8] **M. Diblanc**, "*Développement du concept de l'antenne à résonateur bien pour la génération de la polarisation circulaire*", Thèse de doctorat, Université de Limoges, (2006).
- [9] **Dr Youssef Daher**, "*Antenne – Cours Universitaire*" Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche 1
- [10] **Rabih A Slim**, "*Conception Antenne WIFI –Microruban HFSS_ Méthodologie*" Recherche, Université Antonine Faculté des Ingénieurs en Télécommunications, Informatique.
- [11] **A. Kamil**, "*Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 Ghz-10.6 Ghz)*", thèse grade du Maître ès sciences (M.Sc), Institut National de la recherche scientifique, Université du Québec, 2011.
- [12] **A. Boyer**, "*Antennes support de cours énonce de travaux dirigés*", Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, Octobre 2011.
- [13] **C. A. Balanis**, "*Antenna Theory Analysis and Design*", Third Edition by John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

- [14] **Yamina Tighilt**, " *Identification des antennes microrubans multicouches par la méthode spectrale les réseaux de neurones* ", thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Setif. juin 2011.
- [15] **P. Bartia, K. V. S. Rao, R. S. Tomar**, "*Millimeter wave microstrip and printed circuit antennas*", Artech House, Boston, London, (1991).
- [16] **K. R. Carver, J. W. Mink**, "*Microstrip antenna technology*", IEEE transactions on antennas and propagation, vol.29, pp.2-24, (1981).
- [17] **Ç. S. Gürel, E. Yazgan**, "*Characteristics of a circular patch microstrip antenna on uniaxially anisotropic substrate*", IEEE transactions on antennas and propagation, vol.52, n°10, pp.2532-2537, (2004).
- [18] **R. M. Nelson, D. A. Rogers, A. G. D'Assunção**, "*Resonant frequency of a rectangular microstrip patch on several uniaxial substrates*", IEEE transactions on antennas and propagation, vol.38, pp.973-981, (1990).
- [19] **V. Losada, R. R. Boix, M. Horno**, "*Full wave analysis of circular microstrip resonators in multilayered media containing uniaxial anisotropic dielectrics, magnetized ferrites, and chiral materials*", IEEE transactions on microwave Theory and Techniques, vol.48, pp.1057-1064, (2000).
- [20] **Nazih Hamdiken**, "*Analyse d'une antenne microbande circulaire par la méthode neurospectrale*", mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna.