I.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 allons rappeler quelques définitions et historiques des antennes microbandes, ainsi que la technologie de ces antennes. Nous définirons les antennes plaquées et nous donnerons leurs caractéristiques, leurs domaines d'utilisation, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous examinerons ensuite les types et les endroits de l'alimentation qui jouent un rôle important. Enfin, nous allons présenter quelques méthodes d'analyse les plus utilisées.

I.2 Définition des Antennes et historique

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].**

Le concept des antennes micro rubans fut initialement proposé en 1953 par Deschamps aux états Unis d'Amérique et en France par Guttan et Baissimot en 1955. Un peu plus tard le phénomène de rayonnement provenant des discontinuités dans les strip-lines fût observé et étudié par Lewin en 1960. Au début des années 70, Byron décrit une piste rayonnante conductrice gravée sur un substrat diélectrique ($\varepsilon r < 10$) et repose sur un plan de masse **[4].**

I.3 L'antenne Microruban

I.3.1 Description d'une antenne microruban

Dans sa structure de base, une antenne microruban se compose d'une pièce métallique rayonnante (patch) sur un côté du substrat diélectrique, et un plan de masse de l'autre côté comme représenté sur la Figure I-1. Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or (à cause de leurs conductivités élevées) et il peut prendre n'importe quelle forme possible, mais on se donne des formes régulières (carré, circulaire) dans le but de simplifier l'analyse de la structure. Le patch rayonnant et les lignes d'alimentation sont habituellement photogravés sur le substrat diélectrique.

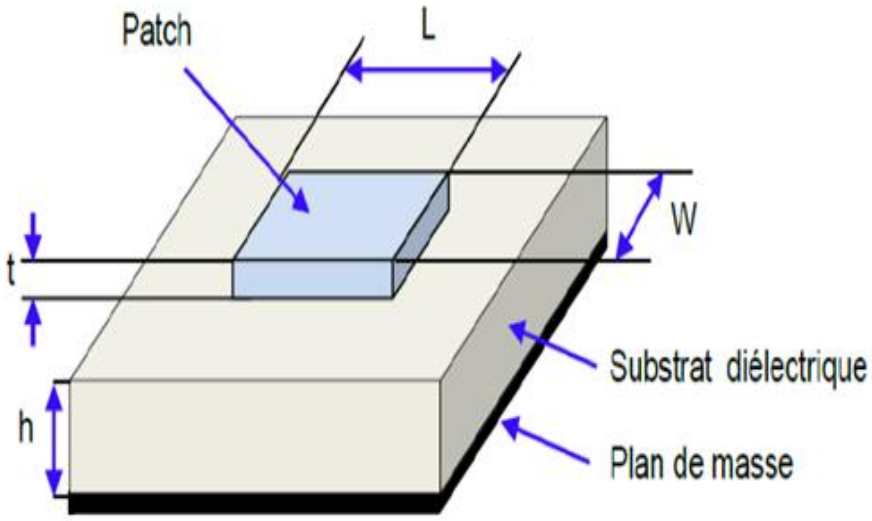

Figure I.1 Structure d'une antenne microruban

I.3.2 Caractéristiques de base

L'antenne microruban est conçue telle que le maximum de son diagramme de rayonnement est normal à l'élément rayonnant. Cet élément rayonnant peut être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle pour un patch rectangulaire, sa longueur L est généralement $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$, où λ_0 est la longueur d'onde dans l'espace libre. Le patch est sélectionné de façon qu'il soit très mince ($t << \lambda_0$, où t est l'épaisseur du patch). La taille h du substrat diélectrique est habituellement $0{,}003\ \lambda_0 \leq h \leq 0.05\ \lambda_0$. Le constant diélectrique du substrat εr est typiquement dans la gamme $2.2 \leq \varepsilon r \leq 12$ **[6].**

Les ondes dans une ligne microbande se propagent à la fois dans le milieu diélectrique et dans l'air. Du point de vue modélisation, les deux milieux sont remplacés par un seul milieu effectif caractérisé par une constante diélectrique.

La répartition des lignes de champs qui s'étendent autour et dans la structure dépend essentiellement:

- De la largeur W des circuits de métallisation.
- Des caractéristiques du substrat : à savoir sa constante diélectrique ε et son épaisseur.

Les différentes formes du patch présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant, car présentant une faible composante croisée. Les dipôles microrubans ont la particularité de présenter une large bande passante et d'occuper très peu d'espace, ce qui les rend particulièrement adaptés à la réalisation de réseaux d'antennes.

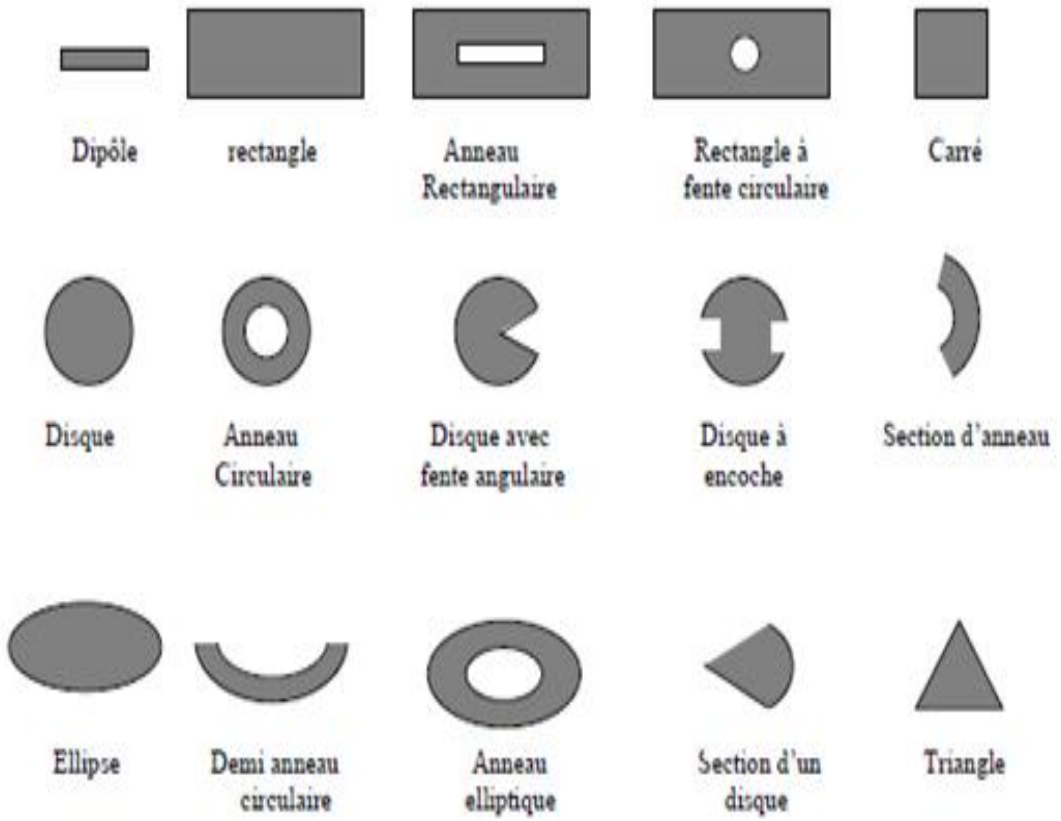

Figure I.2 Différentes formes d'antennes microruban [7]

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes microruban.

I.3.3 Les ondes existantes sur les antennes microruban

Pendant que l'antenne microruban fonctionne, on distingue trois types d'ondes susceptibles de se propager : Onde guidée (A), Onde rayonnée (B), Onde de surface (C) **[8].**

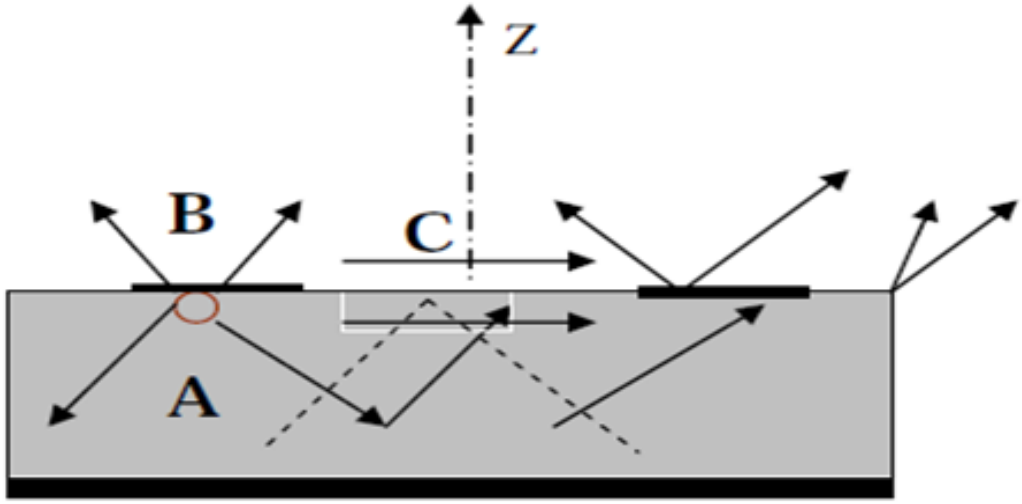

Figure I.3 Trajectoires des rayons dans une antenne microruban (coupe)

A- Ondes guidées : Le champ électromagnétique s'accumule dans le substrat entre les deux plans conducteurs, cette propriété est très utile pour la propagation du signal le long d'une ligne microruban.

B- Ondes rayonnées : Dans l'air, au-dessus du substrat, le signal se disperse librement dans l'espace et contribue au rayonnement de l'antenne. Ce dernier paraît surtout être émis par le voisinage des arêtes, puisque les courants surfaciques circulent sur la face inférieure du patch (côté diélectrique). C'est pourquoi certains modèles considèrent le rayonnement d'un ensemble de fentes fictives situé sur le pourtour de l'antenne.

C- Ondes de surface : Certains rayons atteignent les surfaces de séparation avec une incidence rasant, et reste piégés à l'intérieur du diélectrique. Il s'agit du mécanisme de la réflexion totale, dont font usage les fibres optiques. Une onde de surface est alors guidée par le bord du diélectrique, ne contribuant pas directement au rayonnement vers le haut de l'antenne. Toutefois, quand cette ondes atteinte le bord du substrat (point C), elle est diffractée et génère un rayonnement parasite, et si on a un réseau de deux antennes côté à côté par exemple, l'onde du surface peut créer un couplage entre les éléments du réseau. Le diagramme de rayonnement de l'antenne peut être perturbé par la présence d'onde de surface, notamment au niveau des lobes secondaires **[8].**

I.3.4 Principe de fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement d'un résonateur microruban, il est nécessaire de connaître les champs électromagnétiques notamment le 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-4 peut être assimilée à une cavité bornée par des murs électriques (plan de masse et élément rayonnant), et un 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} **[5].**

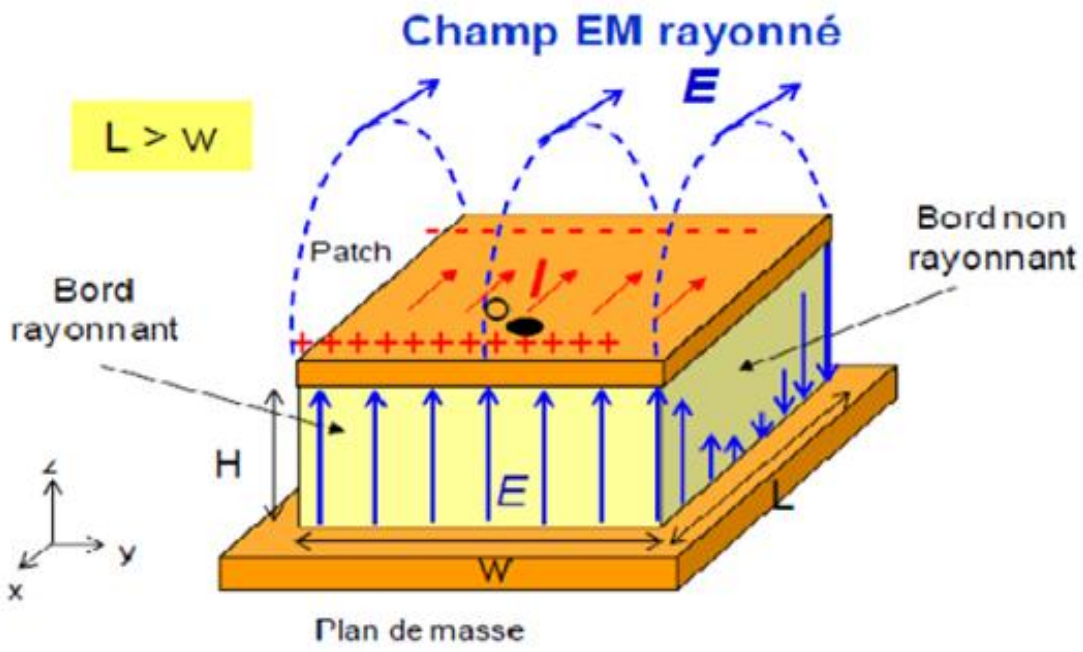

Figure I.4 Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire

Le champ présent entre les bords du patch et le plan de masse va déborder et contribuer à générer le champ électromagnétique rayonné : ceux généré par les bords séparés par L étant maximum et en opposition de phase vont avoir tendance à s'additionner de manière constructive et optimale, et générer un rayonnement inscrit dans le plan YZ. Ces 2 bords sont donc appelés bords rayonnants.

I.3.5 Paramètres S

Une autre façon de quantifier la puissance réfléchie est l'utilisation des paramètres S. En effet, les paramètres S définissent les paramètres de réflexion et de transmission entre l'onde réfléchie et incidente aux bornes d'une composante. En fait, ils décrivent le comportement d'une composante dans le spectre micro-ondes. La Figure 1.5 permettra de définir les paramètres S **[9].**

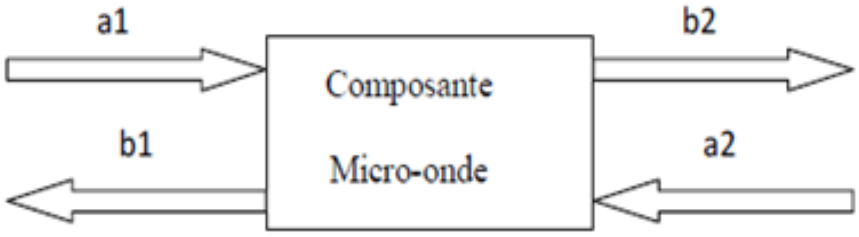

Figure I.5 Signaux aux bornes d'une composante micro-onde

al = Champs électriques de l'onde entrante à l'entrée de la composante
a2 = Champs électriques de l'onde entrante à la sortie de la composante
bl = Champs électriques de l'onde sortante à l'entrée de la composante
b2 = Champs électriques de l'onde sortante à la sortie de la composante
À partir de ces variables, on définit les paramètres S. L'entrée et la sortie sont adaptées à une impédance de Zo Ω. Le champ électrique de l'onde sortante à l'entrée de la composante sur le champ électrique de l'onde entrante à l'entrée de la composante est dit coefficient de réflexion (dB) à l'entrée.

I.3.6 Impédance d'entrée de l'antenne

En ce qui concerne l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe $Ze(f)=Re(f) + jXe(f)$ chargé à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne $Zs(f)=Rs(f) + jXs(f)$ (Figure I-6). Précisons que f est la fréquence de résonance de l'antenne **[10]**

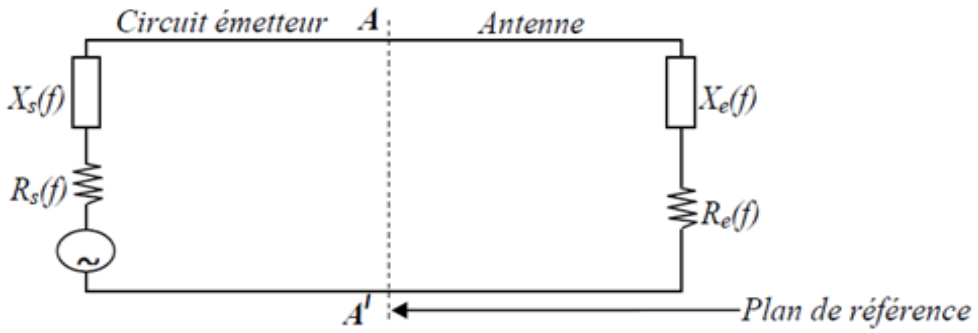

Figure I.6 Schéma équivalent du dispositif à l'émission.

I.3.7 Taux d'ondes stationnaire SWR (standing wave ratio)

Le SWR est l'expression mathématique de la non-uniformité d'un champ électromagnétique dans une ligne de transmission. Le SWR est donc le ratio entre les champs électriques maximaux et minimaux dans une ligne de transmission.

À partir du SWR, on peut définir le VSWR et ISWR qui font respectivement référence au voltage et au courant. Idéalement, on va rechercher un SWR de 1. Ce ratio est donc une autre manière de caractériser la quantité du signal qui est réfléchie aux bornes d'une composante micro-onde **[9].**

I.3.8 Diagramme de rayonnement

Le rayonnement d'une antenne patch rectangulaire est similaire à celui d'un dipôle orienté dans l'axe X. La polarisation du champ rayonnée est rectiligne. Le rayonnement est dépendant de θ et φ. Il est concentré dans un lobe principal orienté vers la verticale du patch ($\theta = 0°$). En raison du plan de masse, le rayonnement ne se fait que dans le demi-plan au dessus du plan de masse. La Figure I-7 illustre le diagramme de rayonnement de cette antenne **[5].**

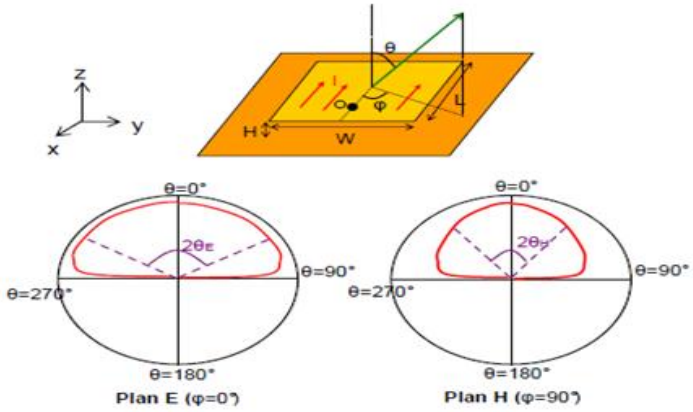

Figure I.7 Diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire

I.4 Techniques d'alimentation des antennes patches

L'alimentation des antennes microbandes, repose essentiellement sur deux classes d'excitation. Excitation avec contact et excitation sans contact. Dans les méthodes d'excitation avec contact, la puissance est acheminée aux patchs rayonnants en utilisant un élément de contact tels le câble coaxial et la ligne microbande. Dans la deuxième classe d'excitation, le couplage électromagnétique est utilisé pour transmettre la puissance de la ligne microbande au patch rayonnant. Les quatre techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne microbande, sonde coaxiale, couplage par ouverture et couplage de proximité **[11].**

I.4.1 Alimentation par sonde coaxiale

Un connecteur standard (SMA) est soudé au plan de masse. Ce dernier est perforé afin de permettre à l'âme centrale d'être reliée au patch en traversant le substrat diélectrique (figure I-8). Donc l'énergie est amenée par guide coaxiale. Ce genre d'antenne est facile à fabriquer, elle génère de faible rayonnement parasite et possède une faible bande passante mais comme inconvénient elle est difficile à modéliser **[11].**

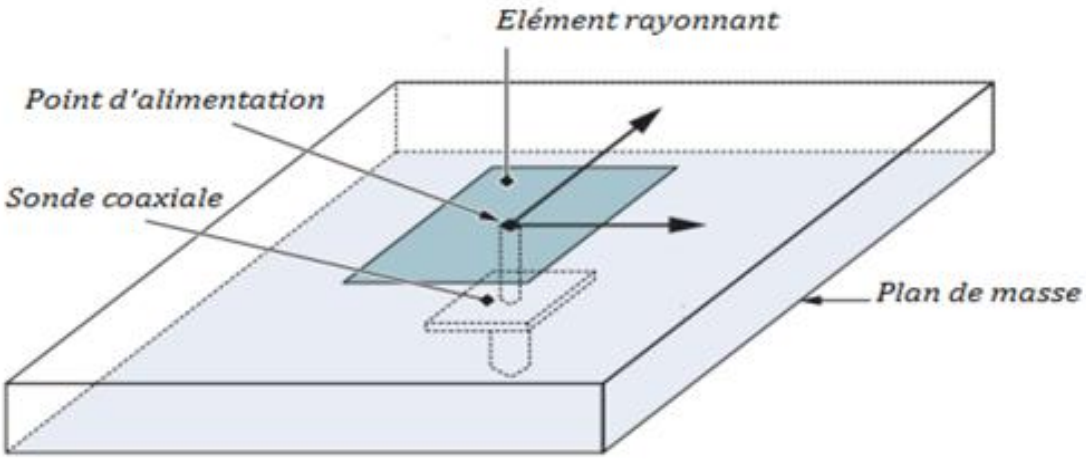

Figure I.8 Alimentation par sonde coaxiale

I.4.2 Alimentation par ligne microruban

Dans ce type d'alimentation, une bande de conduite est reliée directement au bord du patch de micro ruban. La bande de conduite est plus petite dans la largeur par rapport au patch

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. C'est l'une des techniques les plus utilisées dans les antennes imprimées, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite **[12].**

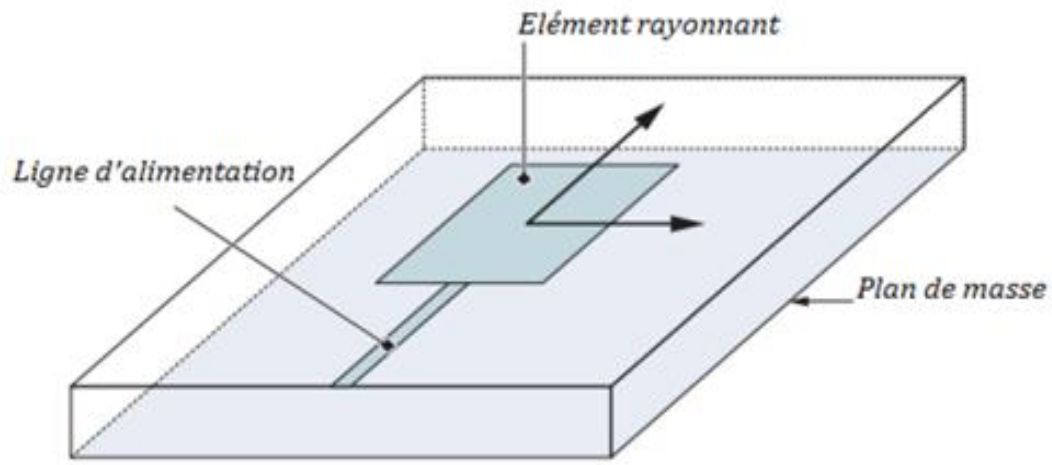

Figure I.9 Alimentation par ligne microbande

I.4.3 Ligne microbande en sandwich

Une antenne plaquée peut être aussi alimentée par couplage électromagnétique de la ligne Micro-ruban à l'élément rayonnant. Dans ce cas, le résonateur et la ligne d'alimentation sont situés du même côté du plan de masse (Figure I.10). L'antenne est formée de deux substrats, avec une ligne micro-ruban sur le substrat inférieur qui se termine en circuit ouvert sous le patch imprimé sur le substrat supérieur.

Le couplage électromagnétique a l'avantage de permettre la réalisation du patch rayonnant sur un substrat relativement épais, afin d'améliorer la bande passante, pendant que la ligne d'alimentation est imprimée sur un substrat plus mince, afin de réduire les rayonnements et les couplages parasites **[4].**

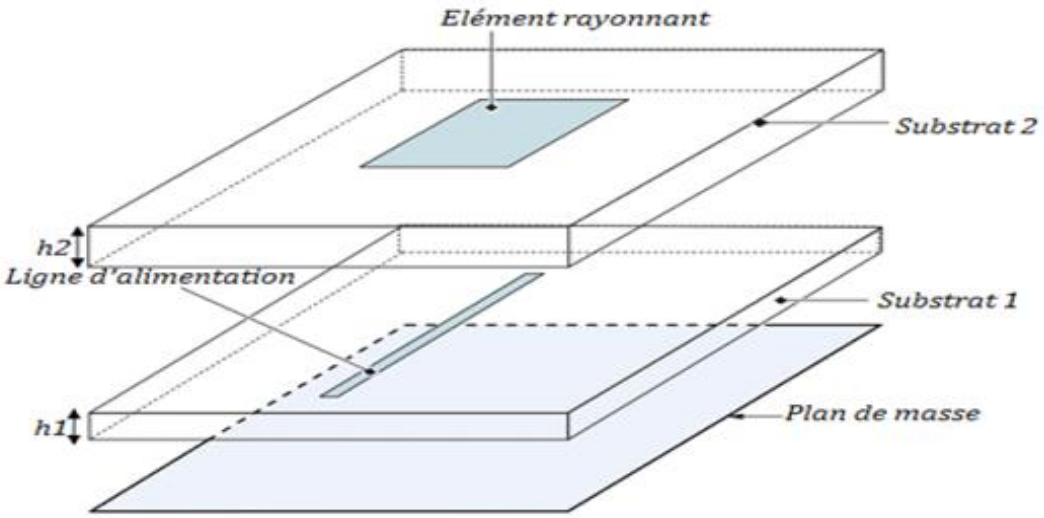

Figure I.10 Ligne microbande en sandwich

I.4.4 Alimentation couplée par ouverture

Dans la structure représentée par la figure (I-11) un plan de masse commun sépare la ligne microruban d'alimentation, située en dessous, de l'élément imprimé, située au-dessus. C'est par l'intermédiaire de la fente usinée dans le plan de masse que s'effectue le couplage électromagnétique entre l'élément rayonnant et la ligne microruban **[7].**

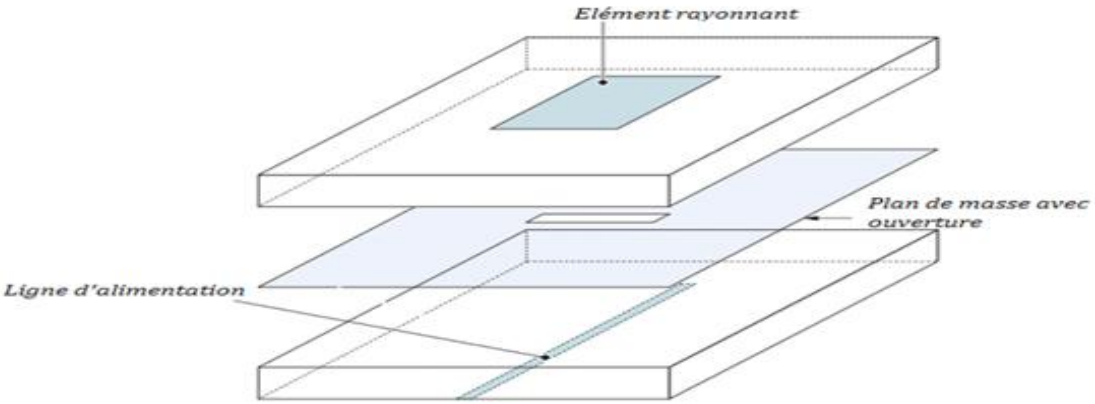

Figure I.11 Alimentation couplée par ouverture

I.4.5 Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

Caractéristiques	Alimentation par Ligne microruban	Alimentation par sonde coaxiale	Alimentation couplé par ouverture	Alimentation couplée par Proximité
Rayonnement parasite de l'alimentation	Plus	plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'Impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante (Réalisée avec adaptation d'impédance)	2-5%	2-5%	2-5%	2-5%

Tableau I.1 Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation

I.5 Méthodes d'analyse

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'analyse des antennes microbandes. La plupart de ces méthodes peuvent être classés dans une des deux catégories : **méthodes approximatives** et **méthodes rigoureuses** (Full-wave).

Les méthodes approximatives sont basées sur des hypothèses simplificatrices donc elles ont des limitations et elles fournissent des solutions moins précises. Elles sont généralement utilisées pour la modélisation des antennes à élément unique à cause de la difficulté rencontrée dans la modélisation du couplage entre les différents éléments. Cependant, elles offrent un bon aperçu physique avec un temps de calcul généralement très réduit.

Les méthodes rigoureuses tiennent compte de tous les mécanismes important de l'onde et s'appuient énormément sur l'utilisation d'algorithmes numériques efficaces. Lorsqu'elles sont appliquées convenablement, les méthodes rigoureuses sont très précises et peuvent être employées pour la modélisation d'une variété d'antennes y compris les antennes réseaux. Ces méthodes ont tendance à être plus complexes et fournissent moins d'aperçu physique. Souvent, elles nécessitent plus de calculs et donc un temps de calculs élevé **[13].**

I.5.1 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.

I.5.1.1 Le modèle de la ligne de transmission

Dans la solution de l'antenne microruban par le modèle de la ligne de transmission, les inconnues sont la constante de propagation et l'impédance caractéristique. Une fois déterminés, une ligne de transmission équivalente à l'antenne est obtenue. Le mode de propagation dominant est supposé être le mode TEM ou quasi TEM avec une variation négligeable dans la direction transverse. C'est une approximation valide si l'épaisseur du substrat est maintenue négligeable devant la longueur d'onde. Ce modèle ne prend pas en considération quelques effets physiques comme l'excitation des ondes du substrat, les variations du champ sur les bords rayonnants, le couplage mutuel entre les éléments voisins, les effets des modes d'ordre élevés,…etc **[2].**

I.5.1.2 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. Ce modèle n'est valide que pour des substrats électriquement minces et modélise difficilement le couplage **[14].**

I.5.2 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.
- La méthode spectrale, qui correspond à la transformée de Fourrier de la méthode de l'équation d'intégrale.

I.5.2.1 La méthode des différences finies

La méthode des différences finies dans le domaine temporel, permet la résolution d'équations différentielles spatio-temporelles sur calculateur.

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).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 **[12].**

I.5.2.2 La méthode des moments

La méthode des moments est une technique numérique qui permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales en le transformant en un système matriciel **[15].** Cette méthode opère dans le domaine spectral, et elle est qualifiée comme étant rigoureuse. Cette procédure de résolution consiste à trouver le zéro du déterminent de la matrice impédance. La caractéristique de cette méthode est son indépendance de la source d'excitation **[16]**.

Mais malgré ses avantages cette méthode soufre de quelque inconvénient :

- Le temps de calcul qui est important.
- La précision exigée pour déterminer les éléments de l matrice impédance.
- L'existence des solutions parasites.

I.5.2.3 La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode mathématique qui permet la résolution d'équations différentielles. Avec des équations différentielles, il est possible par exemple de décrire le comportement des structures. Ainsi, la résolution des équations de la théorie de l'élasticité permet d'obtenir le comportement de corps solide sous différentes charges, c'est à dire de calculer les contraintes et déformations. Les équations de Laplace permettent de décrire les champs de températures. La résolution des équations de Navier-Stokes nous donne le comportement des fluides et les équations de Maxwell sont une représentation mathématique des champs magnétiques **[7].**

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.

I.5.2.4 Méthode d'analyse spectrale

Ce modèle prend en considération l'équation intégrale du champ électrique, dans le domaine spectral. Elle permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales dans le domaine spatial. Son principe se base sur la connaissance des champs électromagnétiques dans chaque région. Ainsi, le système d'équations intégrales à résoudre peut s'écrire sous une forme matricielle. Le choix de la condition de continuité surfacique et le vecteur de courant sur le patch permet de déduire une relation entre les composantes tangentielles des champs électromagnétiques et les courants surfaciques. L'approche de

l'équation intégrale dans le domaine spectral est largement utilisée dans l'analyse et la conception de structures imprimées **[4].**

I.6 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.

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, mais aussi les équipements de petite taille, tels que les téléphones portables, radars etc.

On retrouve principalement ces résonateurs dans les systèmes de haute technologie suivants **[15]:**

- Les résonateurs spatiaux et radar embarqué.
- La liaison avec des mobiles (avions, fusées, missiles, navires, véhicules routiers…).
- Les systèmes portables de radiolocalisation par satellite (GPS).
- Les résonateurs pour la téléphonie mobile (stations de base).
- Les badges et étiquettes électroniques.
- Les applicateurs biomédicaux (hyperthermie) et capteurs pour contrôle non destructif.

Enfin, les réseaux d'éléments rayonnants imprimés sont fréquemment utilisés dans les satellites de communication et bien d'autres applications, telles que les radiocommunications avec les mobiles terrestres et aériens, les télécommunications, les radars, mais aussi les capteurs miniaturisés et les applicateurs médicaux. D'autre part, avec la recherche progressive, le développement et une utilisation plus fréquente, ces résonateurs microrubans finiront par remplacer les résonateurs conventionnels dans la plupart des applications.

I.7 Avantages et limitations des antennes patch

Les antennes Microstrip présentent de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et leurs applications couvrent le large domaine de fréquence : 100 MHz à 100 GHz. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.

- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles.
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

Toutefois, les antennes microruban ont également des limitations que ne présentent pas les antennes traditionnelles :

- Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances (géométriques et physiques) ; Généralement faible gain (6 dB).
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan.
- Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces.

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouche et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes. [**17**]

I.8 Conclusion

La technologie microbande en général, et les antennes microbandes en particulier connaissent un succès croissant auprès des industriels et des professionnels de télécommunication, qu'elle soit spatial ou terrestre. Il est nécessaires de bien définir l'intégralité des paramètres des antennes, afin de prévoir son comportement avant même la réalisation d'une part, et de s'assures qu'elle se conformera aux exigences des systèmes d'autre part.

Dans ce chapitre, on a présenté une description générale des antennes microbandes, ainsi que les différentes méthodes d'analyse utilisées dans ce domaine, les avantages, les inconvénients et leurs applications. Dans le chapitre suivant on va donner une description du logiciel HFSS et CST et son environnement de travail dans lequel on va implémenter les différentes structures à étudiées.