

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE**



## MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de  
**Master en Télécommunications**  
Option : Composants et Systèmes Electroniques  
pour les Télécommunications (CoSET)

### THEME

*Conception et modélisation d'une antenne  
microruban compacte pour une utilisation  
dans les terminaux mobile*

Réalisé par :

- BENABADJI Selma
- LALLAM Chafika

Soutenu en juillet 2012 devant le Jury:

Mr. KAMECHE. S  
Melle. DJELTI. H  
Melle. BENMOSTEFA. N  
Mr. ZERROUKI. H

M.C à l'Université de Tlemcen  
M.A à l'Université de Tlemcen  
M.A à l'Université de Tlemcen  
M.A à l'Université de Tlemcen

Président  
Examineur  
Examineur  
Encadreur

# Dédicace

*A peine nous venons de terminer la rédaction du mémoire de fin d'étude, je voudrais très vite le dédier avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :*

*A mes très chers «PARENTS» en signe de ma profonde et affectueuse reconnaissance pour leur amour sans mesure, tous les sacrifices, les soutiens, les tolérances et les encouragements qu'ils ont bien voulu consentir pour moi. Tous les mots restent faibles pour leur exprimer mes sentiments et qu'ils acceptent seulement ces lignes en guise de témoignage.*

*A mes frères SAMIR et ZAKARIA, que Dieu vous bénisse et vous garde.*

*A mes sœurs FAIZA, IMENE et le chouchou HANENE que Dieu vous protège et vous garde.*

*A mes nièces MAISSAA et BOUCHERA.*

*A mes belle sœurs LILA et NASSIMA.*

*A mes beaux frères FOUAD et FODIL.*

*A toute ma famille.*

*A mes amis(e)s et connaissances.*

*A toute la promotion M<sub>2</sub> CoSET 2012.*

*A tous ceux qui m'ont aidé à faire ce travail.*

CHAFIKA

# Dédicace

*Je dédie ce précieux projet à ma chère mère bien aimée qui m'a beaucoup aidée dans la réalisation de ce travail, mon très cher père ; jamais je ne saurais m'exprimer quant aux sacrifices et aux dévouements que vous avez consacrés à mon éducation, et à mes études.*

*Quelque soit les mots employés, restent toujours faibles pour vous prouver ma profonde gratitude.*

*Je le dédie aussi à mes deux chers frères, Sohayb et le petit chouchou Hichem, que DIEU me les garde.*

*A toute ma grande famille : oncles, tantes, cousins et cousines*

*A tous mes chers amis(es) et connaissances.*

*A mes camarades de promotion CoSET (2011-2012)*

*Sans omettre mes chers professeurs et tous ceux qui m'ont aidée à réaliser cette tâche.*

*B.selma*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions **DIEU** tous puissant de nous avoir donné la chance de goûter à la saveur du Savoir.*

*Ce travail de recherche a été effectuée au sein du Laboratoire des Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC), de la Faculté de technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd–Tlemcen sous la direction de Monsieur Mohammed FEHAM, professeur à l'université de Tlemcen.*

*Un grand merci à Monsieur Zerrouki EL HADJ de nous avoir honorés par son encadrement, pour sa sympathie, son soutien moral et les connaissances fructueuses qu'il nous a apportées tout au long de ce modeste travail.*

*Un merci particulier à notre grand professeur « Docteur Kameche », d'avoir l'amabilité d'accepter de présider le jury de cette thèse.*

*Nos sincères gratitude à tous nos professeurs pour nous avoir accompagnés tout le long de notre cursus universitaire avec tant de patience et de compréhension, y compris M<sup>elle</sup>Benmoustefa et M<sup>elle</sup>Djelti de faire parti des membres du jury.*

*Nous expriment également nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

## **Résumé**

**U**ne antenne imprimée micro ruban est constitué d'un substrat diélectrique sur un côté d'un patch, avec un plan de masse de l'autre côté. En raison de ses avantages tels qu'un faible poids et faible volume les coûts de fabrication faibles et la capacité à intégrer avec des Circuits Intégrés Microondes (CIM), l'antenne microruban est très bien adaptée pour des applications telles que les téléphones cellulaires, les téléavertisseurs, les systèmes de missiles et les systèmes de communications par satellite. L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne compacte pour une utilisation dans les appareils sans fil / cellulaires et l'incorporation dans un téléphone mobile à 1,9 GHz fonctionnant dans les réseaux cellulaires PCS-1900 ainsi que dans l'UMTS qui fonctionne à 2,04 GHz.

### **Mots-clés :**

Antenne imprimée, Micro ruban, bande passante, Réseaux cellulaires, PCS-1900, UMTS.

# **Table des matières**

Dédicace .....	i
Remerciement.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières .....	v
Liste des figures .....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : Introduction aux systèmes de communication cellulaire.</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Les méthodes d'accès .....	4
I.2.1 La technique FDMA .....	4
I.2.2 La technique TDMA.....	5
I.2.3 La technique CDMA.....	6
I.3 Le concept cellulaire .....	6
I.4 La réutilisation fréquentiel.....	8
I.5 Les systèmes radio cellulaires et leurs évolutions.....	8
I.5.1 Première génération .....	9
I.5.2 Deuxième génération.....	9
I.5.2.1 Le standard GSM.....	9
I.5.2.2 L'architecture du réseau GSM .....	10
I.5.3 Les 2,5 et 2,75 générations.....	14
I.5.4 La troisième génération.....	14
I.5.5 La quatrième génération .....	15
I.6 Le téléphone portable.....	16
I.6.1 L'histoire de la téléphonie mobile .....	16
I.6.2 La composition du téléphone portable.....	17
I.7 Conclusion.....	20

## **CHAPITRE II : Principes fondamental des antennes.**

II.1 Introduction.....	22
II.2 Le rôle des antennes.....	23
II.2.1 Antenne d'émission .....	23
II.2.2 Antenne de réception.....	23
II.2.3 Réciprocité .....	23
II.3 Comment rayonne une antenne.....	23
II.4 Rayonnement électromagnétique.....	25
II.4.1 Zone de Rayleigh.....	25
II.4.2 Zone de Fresnel .....	26
II.4.3 Zone de Fraunhofer .....	26
II.5 Les paramètres de l'antenne .....	27
II.5.1 Diagramme de rayonnement .....	27
II.5.2 La directivité.....	30
II.5.3 L'impédance d'entrée.....	31
II.5.4 VSWR : (l'adaptation).....	32
II.5.5 Le coefficient de réflexion .....	33
II.5.5 Rendement.....	34
II.5.6 La polarisation.....	34
II.5.7 Le gain.....	35
II.5.8 La bande passante (BP).....	36
II.6 Les différents types d'antenne.....	37
II.6.1 Antenne dipolaire .....	37
II.6.2 Antenne à boucle magnétique .....	38
II.6.3 Antenne cornet.....	39
II.6.4 Antenne à réseau de fentes.....	40
II.6.5 Antenne à réflecteur parabolique .....	41
II.6.6 Antennes de type Cassegrain .....	42
II.6.7 Antenne Imprimée .....	42
II.7 Conclusion .....	43

### **CHAPITRE III : Généralités sur les antennes imprimées.**

III.1 Introduction .....	44
III.2 Historique .....	44
III.3 Choix de la technologie des antennes imprimées.....	45
III.4 Description de l'antenne imprimée.....	46
III.4.1 Substrats.....	47
III.5 Alimentation des antennes plaquées.....	48
III.5.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban .....	48
III.5.2 Alimentation par câble coaxiale.....	49
III.5.3 Alimentation couplée par ouverture .....	50
III.5.4 Alimentation Couplée Par Proximité .....	51
III.6 Mécanisme de Base et Caractéristiques Electriques .....	52
III.6.1 Modèle de ligne de transmission .....	53
III.6.2 Modèle de cavité .....	58
III.6.3 Méthode des moments.....	61
III.7 Conclusion.....	61

### **CHAPITRE IV : Résultats des simulations et leurs interprétations.**

IV.1 Introduction .....	63
IV.2 Les paramètres essentiels pour la conception d'une antenne patch .....	63
IV.3 Les calculs des paramètres pour la conception d'une antenne patch.....	64
IV.3.1 Le calcul des paramètres de l'antenne patch pour le standard (PCS).....	64
IV.3.2 Le calcul des paramètres de l'antenne patch pour le standard(UMTS).....	66
IV.4 La détermination du point d'alimentation .....	67
IV.5 La conception de l'antenne patch.....	67
IV.6 La simulation de l'antenne patch rectangulaire et les résultats trouvés.....	68
IV.7 Simulation et Résultats de l'antenne patch conçue pour Le standard (PCS) .....	69
IV.7.1 Les résultats obtenus pour (x) fixe et leurs interprétations .....	69
IV.7.2 Les résultats obtenus pour (y) fixe et leurs interprétation .....	71
IV.7.3 Le résultat de simulation de l'antenne patch au point optimal .....	72
IV.8 Résultats de simulation de l'antenne patch pour le standard (UMTS).....	73

IV.8.1 Les résultats obtenus pour différents points (x,y) et leurs interprétations .....	73
IV.8.2 Les résultats obtenus pour (Y) fixe et leurs interprétations.....	75
IV.8.3 Le résultat de simulation de l'antenne patch au point optimale .....	76
IV.9 L'optimisation de la bande passante de l'antenne patch du standard (PCS) .....	76
IV.10 L'optimisation de la bande passante de l'antenne patch du standard (UMTS) .....	78
IV.11 Le diagramme de rayonnement en 3D .....	80
IV.12 Conclusion .....	82
Conclusion générale .....	83
Bibliographie.....	84
Annexe .....	87

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Le FDMA .....	5
<b>Figure I.2</b> : Le TDMA .....	5
<b>Figure I.3</b> : Le CDMA .....	6
<b>Figure I.4</b> : Exemple de réseau cellulaire .....	7
<b>Figure I.5</b> : Structure d'une cellule.....	8
<b>Figure I.6</b> : Architecture du réseau GSM.....	11
<b>Figure I.7</b> : Téléphone portable.....	17
<b>Figure I.8</b> : Carte SIM .....	17
<b>Figure I.9</b> : Ecran tactile .....	18
<b>Figure I.10</b> : Boitier et Clavier d'un téléphone.....	19
<b>Figure I.11</b> : Batterie .....	19
<b>Figure I.12</b> : Antenne patch .....	20
<hr style="width: 20%; margin: 10px auto;"/>	
<b>Figure II.1</b> : Rayonnement d'une antenne.....	24
<b>Figure II.2</b> : Lignes de champs produites par une antenne demi-onde .....	25
<b>Figure II.3</b> : La densité de puissance rayonnée par l'antenne .....	26
<b>Figure II.4</b> : Limite des 3 zones de rayonnement.....	27
<b>Figure II.5</b> : Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive .....	29
<b>Figure II.6</b> : Circuit équivalent d'antenne d'émission.....	32
<b>Figure II.7</b> : Polarisation du champ électromagnétique.....	35
<b>Figure II.8</b> : Mesure de la bande passante à partir du tracé du S11.....	37
<b>Figure II.9</b> : Antenne dipolaire .....	38
<b>Figure II.10</b> : Boucle magnétique .....	39
<b>Figure II.11</b> : Antenne cornet.....	40
<b>Figure II.12</b> : Réseau de fentes .....	40
<b>Figure II.13</b> : Antenne à réflecteur parabolique .....	41
<b>Figure II.14</b> : Antenne à réflecteur parabolique .....	42
<b>Figure II.15</b> : Antenne Imprimée.....	43

<b>Figure III.1</b> : Présentation d'une antenne imprimée .....	46
<b>Figure III.2</b> : Principales formes des antennes patches .....	47
<b>Figure III.3</b> : Alimentation par ligne micro ruban.....	49
<b>Figure III.4</b> : Alimentation par câble coaxiale ou sonde .....	50
<b>Figure III.5</b> : Alimentation couplée par ouverture .....	50
<b>Figure III.6</b> : Alimentation couplée par proximité.....	51
<b>Figure III.7</b> : Ligne Micro ruban .....	53
<b>Figure III.8</b> : Lignes de champ électrique.....	53
<b>Figure III.9</b> : Antenne plaquée « patch ».....	55
<b>Figure III.10</b> : Vue du haut de l'antenne .....	56
<b>Figure III.11</b> : Vue latérale de l'antenne .....	56
<b>Figure III.12</b> : Distribution de charge sur le Patch micro ruban.....	58

---

<b>Figure IV.1</b> : Point d'alimentation indiquer par les coordonnées (x,y) .....	67
<b>Figure IV.2</b> : Antenne patch rectangulaire en 3D .....	68
<b>Figure IV. 3</b> : Coefficient de réflexion pour (x) fixe .....	69
<b>Figure IV. 4</b> : Coefficient de réflexion pour (y) fixe .....	71
<b>Figure IV. 5</b> : Le coefficient de réflexion du point d'alimentation optimal.....	72
<b>Figure IV. 6</b> : Le coefficient de réflexion pour différents points.....	73
<b>Figure IV. 7</b> : Le coefficient de réflexion pour (y) fixe .....	75
<b>Figure IV. 8</b> : Le coefficient de réflexion du point d'alimentation optimal.....	76
<b>Figure IV. 9</b> : Le schématique de l'antenne .....	77
<b>Figure IV. 10</b> : La bande passante de l'antenne patch optimisé .....	77
<b>Figure IV. 11</b> : Le schématique de l'antenne .....	79
<b>Figure IV. 12</b> : La bande passante de l'antenne patch optimisé .....	79
<b>Figure IV. 13 : (a)</b> Le diagramme de rayonnement en 3D (X, Y, Z).....	80
<b>Figure IV. 13 : (b)</b> Le diagramme de rayonnement en 3D dans le plan (Y, X).....	81
<b>Figure IV. 13 : (c)</b> Le diagramme de rayonnement en 3D dans le plan (Z, X).....	81
<b>Figure IV. 13 : (d)</b> Le diagramme de rayonnement en 3D du téléphone portable sur le plan (Y, Z).....	81
<b>Figure IV. 13 : (e)</b> : Le diagramme de rayonnement en 3D du téléphone portable sur le plan (X, Z).....	81

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1</b> : L'évolution des standards de communication .....	16
<b>Tableau III.1</b> : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation.....	52
<b>Tableaux IV.1</b> : Les valeurs de $S(1,1)$ pour $(x=0)$ et $(x=1)$ .....	70
<b>Tableau IV.2</b> : Les valeurs de $S(1,1)$ pour $(y=1.5)$ .....	71
<b>Tableau IV.3</b> : Les valeurs de $S(1,1)$ pour différents points $(x,y)$ .....	74
<b>Tableau IV.4</b> : Les valeurs de $S(1,1)$ pour $(y=1)$ .....	75

## **Introduction générale**

Les recherches sur les moyens de communication comme, les mimiques, l'articulation, la correspondance etc, n'ont pas cessé depuis la naissance de l'être humain.

Pendant des siècles successifs, l'homme a fourni des efforts intellectuels énormes dans le but de concevoir des techniques adaptées à cela.

Le commencement de ses efforts à été consacré pour la première fois dans l'histoire des télécommunications, par la création du télégraphe optique (1<sup>er</sup> réseau de télécommunication). Dès l'invention de l'électricité, il a inventé le 1<sup>er</sup> téléphone.

En 1870, lors des études sur les ondes électromagnétiques, M<sup>r</sup> J.Maxwell démontre que celles-ci voyagent aussi bien dans le vide que dans la matière. Cela a permis de réaliser les premières expériences de la radio (transmission sans fil) en 1895 par le physicien Marconi.

Par la suite, les réseaux de téléphonies se sont beaucoup plus développés, qu'ils soient filaires ou hertziens. Ces dernières années un besoin s'est crée : celui d'être connecté en permanence à un réseau mobile pour cela ont a vu l'apparition de nouveaux réseaux sans fil pour la communication à distance.

Dés lors, On voit apparaître plusieurs types de réseaux : réseaux de téléphonie, de diffusions à hauts débits, etc.

Le développement de ces standards sans fil consiste à l'évolution des technologies tel que : la miniaturisation des composants, logiciels informatiques, des techniques de codages ou encore des antennes.

En conséquence, les antennes sont devenues nos yeux et nos oreilles dans notre monde, nos liens avec l'espace dans lequel nous vivons; elles constituent une partie essentielle et indispensable de notre civilisation.

L'antenne est un élément essentiel ayant deux rôles distincts : celui d'émission des rayons électromagnétiques et l'autre de leur réception; cette dernière se situe aussi bien

au niveau des standards que dans les téléphones portables ce qui fait d'elle un élément indispensable. Dans les téléphones cellulaires contrairement aux standards, l'antenne est imprimée.

La théorie et la technologie des antennes imprimées ont connu une croissance rapide, et elles ont été l'une des technologies les plus innovatrices dans leur conception. Elles ont trouvé rapidement une large application dans les systèmes microondes modernes.

Le travail présenté dans ce manuscrit a, pour objectif, de concevoir et modéliser une antenne Microruban « Patch » compacte dans les terminaux sans fil cellulaires.

**Chapitre I:** proposera un état de l'art sur l'évolution des standards de télécommunication sans fil.

Nous présenterons un bref historique du téléphone portable et ses différents composants.

**Chapitre II:** Ce chapitre sera entièrement consacré à l'étude des antennes qui ont pour principe, de transformer un signal guidé en un signal rayonné (ou réciproquement) et qui présentent une grande variété pour la diversité d'utilisation.

Nous décrivons les paramètres des antennes : gain, diagramme de rayonnement, directivité, polarisation, bande passante,... etc.

**Chapitre III:** Il sera consacré à l'étude d'une antenne microruban intégrée dans les terminaux mobiles, ainsi que les différents types de son alimentation, en plus d'une présentation sur les différentes méthodes de son analyse.

**Chapitre IV:** Cette partie présentera la conception et les simulations des antennes imprimées rectangulaires qui fonctionnent, l'une dans le standard PCS et l'autre dans l'UMTS.

Après les résultats obtenus une partie d'étude a été ajoutée pour l'optimisation.

Pour aider le lecteur à bien se servir de ce document, une annexe et une liste de références bibliographiques ont été ajoutés à la fin de ce manuscrit.

# Chapitre 1

## **I.1. Introduction:**

La communication mobile est le domaine le plus rapide en croissance dans l'industrie des télécommunications. Le réseau radio cellulaire est le système de communication mobile qui a le plus de succès. Il peut être utilisé pour transmettre la voix et les données. La transmission des données via un réseau cellulaire est un nouveau service, ce qui rend les réseaux de données accessible à partir de terminaux mobiles au moyen de téléphones cellulaires.

Les téléphones portables n'ont pourtant pas toujours été aussi populaires, et les terminaux que nous connaissons aujourd'hui sont le fruit d'une longue évolution, qui prend sa source plusieurs dizaines d'années en arrière.

L'idée première d'un téléphone mobile était de permettre à ses utilisateurs de passer et de recevoir des appels alors qu'ils se trouvaient en dehors de chez eux via un système de communication cellulaire.

Ce dernier a pour concept le passage de terminaux "fixes", à des terminaux mobiles transportés par l'utilisateur et connectables ; cette tendance a conduit au développement de réseaux d'accès mobiles suivant des générations.

Les premiers réseaux de ce type étaient basés sur le transport d'informations analogiques comme l'était, au départ, la téléphonie fixe. Ces premiers réseaux sont qualifiés de (1ère génération).

Ces réseaux ont laissé assez rapidement la place à une nouvelle génération (2ème génération) mettant en application les technologies numériques. Elles ont notamment donné naissance aux réseaux GSM (en Europe), PDC (au Japon) et PCS (aux Etats-Unis).

Une nouvelle famille de normes (UMTS) a conduit à une troisième génération (3G) de réseaux et de terminaux mobiles. En fait il existe aussi des générations intermédiaires (2,5 G) et le (2,75G) dont des représentants sont le GPRS et EDGE.

L'apparition d'une 4ème génération de réseaux mobile de norme (LTE), a pour origine tout à la fois la saturation des systèmes actuels et le besoin d'une couverture universelle.

Ces générations successives de téléphonie mobile, marquent pour chacune d'elle un saut quantitatif en matière de débit, ce qui induit de fait une avancée en termes de services proposés aux usagers.

## **I.2 Les méthodes d'accès :**

La fréquence radio est une ressource naturellement limitée, elle doit être alors judicieusement utilisée afin de permettre d'écouler le maximum de trafic. Ainsi, plusieurs méthodes d'accès multiple ont été définies, permettant le partage de la bande passante en plusieurs canaux. Ceux-ci seront alloués aux usagers afin de pouvoir communiquer avec le réseau. La définition d'un canal de communication dépend de la méthode d'accès choisie, il en existe principalement trois :

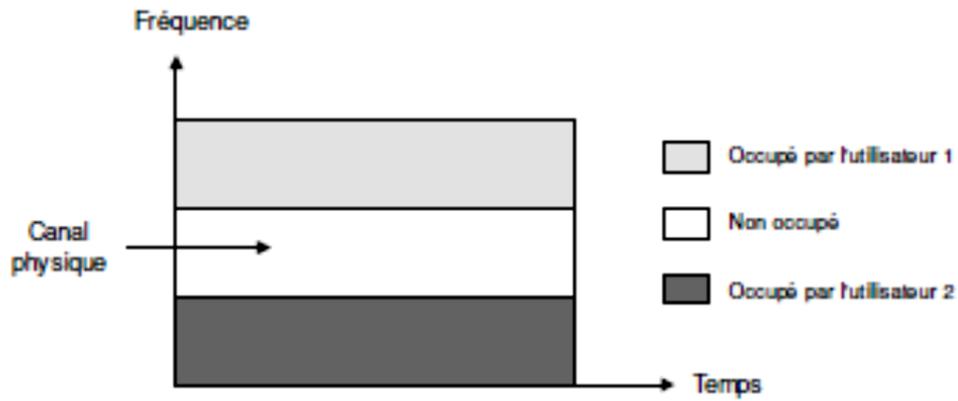
- ✚ Accès Multiple par Répartition dans les Fréquences (AMRF) ou Frequency-Division Multiple Access (FDMA).
- ✚ Accès Multiple par Répartition dans le Temps (AMRT) ou Time-Division Multiple Access (TDMA).
- ✚ Accès Multiple par Répartition par Code (AMRC) ou Code-Division Multiple Access (CDMA).

La combinaison des trois techniques d'accès (FDMA, TDMA et CDMA) est également envisagée.

### **I.2.1 La technique FDMA :**

La méthode d'accès FDMA [1, 2, 3, 4, 5], repose sur un multiplexage en fréquences et est essentiellement utilisée dans les réseaux analogiques. Le multiplexage fréquentiel divise la bande de fréquences en plusieurs sous-bandes. Chacune est placée sur une fréquence dite porteuse, ou carrier, qui est la fréquence spécifique du canal. Chaque porteuse ne peut transporter que le signal d'un seul utilisateur.

La Figure I.1 illustre un multiplexage FDMA de trois porteuses acceptant trois utilisateurs sur le même support. Cette méthode nécessite une séparation entre les porteuses pour éviter les interférences. Ce mode de partage est simple à mettre en œuvre et il ne nécessite pas de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. L'un des grands inconvénients de FDMA est la sous utilisation de la bande passante.

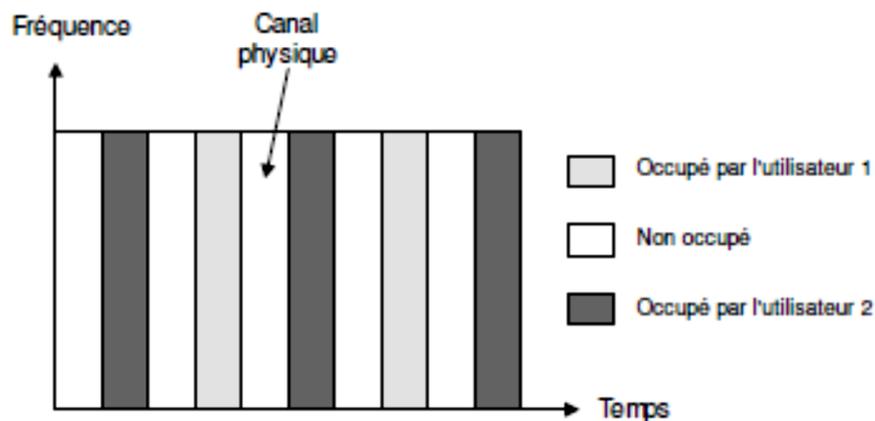


**Figure I.1 :** Le FDMA (Frequency-Division Multiple Access).

### I.2.2 La technique TDMA :

La méthode TDMA [1, 2, 3, 4, 5] offre la totalité de la bande de fréquences à chaque utilisateur pendant une fraction de temps donnée, appelée time slot (intervalle de temps). TDMA permet de transmettre un débit plus important que la solution FDMA. Pour communiquer, un abonné utilise un slot (Figure I.2). Ainsi, plusieurs terminaux peuvent se partager la même porteuse.

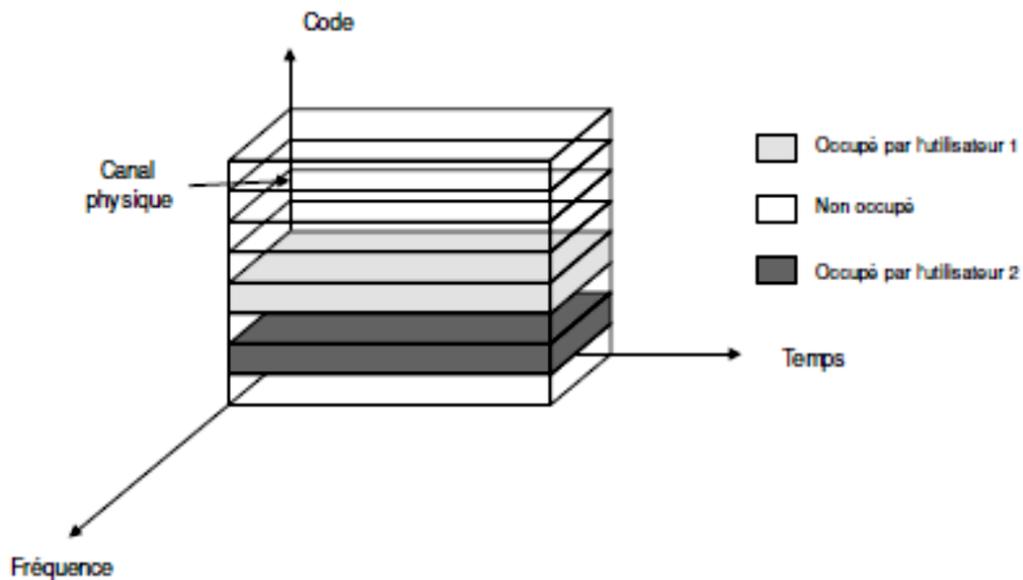
Pour permettre ce partage, les mobiles doivent être fortement synchronisés. Le TDMA s'applique principalement à la transmission de signaux numériques. Les accès combinés FDMA/TDMA montrent une efficacité spectrale importante.



**Figure I.2 :** Le TDMA (Time-Division Multiple Access).

### I.2.3 La technique CDMA :

La troisième méthode, le CDMA autorise l'allocation de la totalité de la bande de fréquences, de manière simultanée, à tous les utilisateurs d'une même cellule. Pour ce faire, un code binaire spécifique est octroyé à chaque utilisateur. L'utilisateur se sert de son code pour transmettre l'information qu'il désire communiquer en format binaire d'une manière orthogonale, c'est-à-dire sans interférence entre les signaux, ou autres communications. Le nombre de canaux avec CDMA [1, 2, 3, 4, 5] est théoriquement illimitée ; toute la difficulté, cependant, est de trouver des codes suffisamment différents pour éviter les interférences et permettre ainsi à la station de base de récupérer des émissions en parallèle. La combinaison FDMA/CDMA offre un bon niveau de résistance à l'interférence Co-canal.



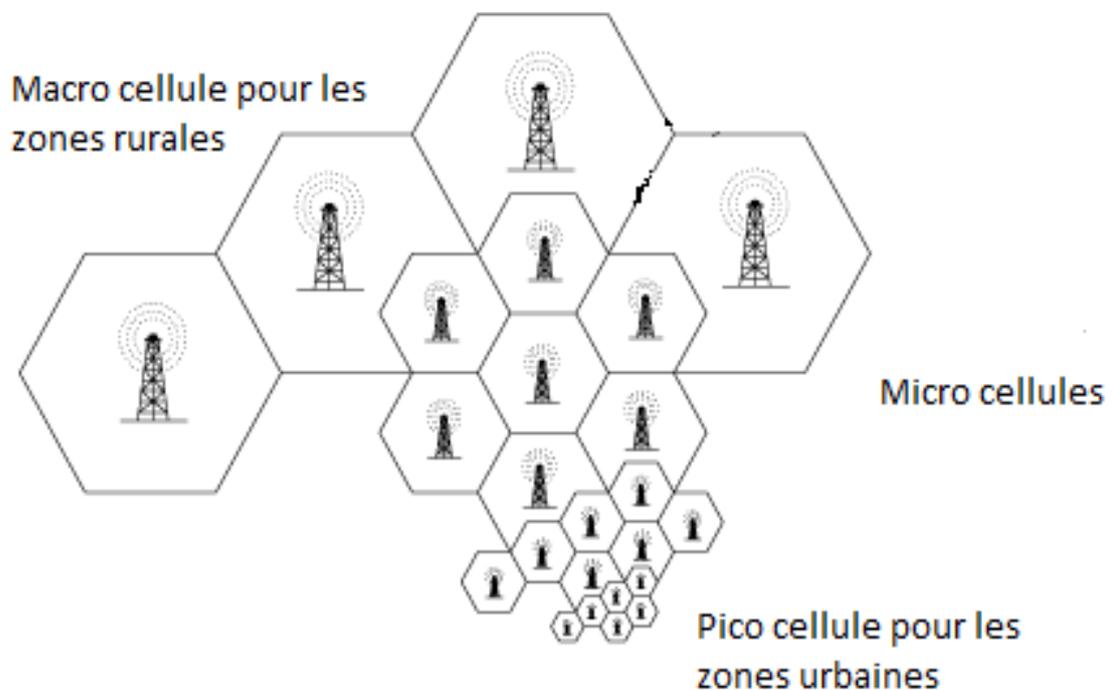
**Figure I.3 :** Le CDMA (Code-Division Multiple Access).

### I.3 Le concept cellulaire :

Les réseaux de téléphonie mobile sont basés sur la notion de cellules, qui sont des zones circulaires se chevauchant afin de couvrir une zone géographique. Dans un réseau cellulaire, chaque cellule est entourée de 6 cellules voisines (c'est la raison pour laquelle on représente généralement une cellule par un hexagone) (Figure I.4).

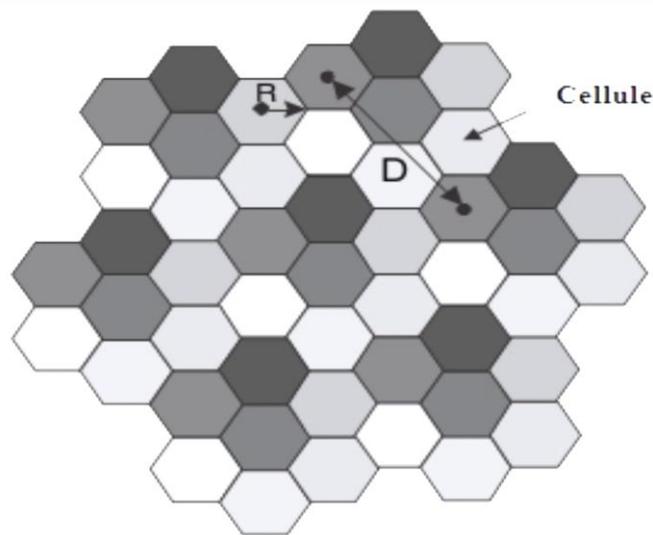
Les réseaux cellulaires reposent sur l'utilisation d'un émetteur-récepteur central au niveau de chaque cellule, appelé « station de base » (plus le rayon d'une cellule est petit, plus la bande passante disponible est élevée).

Dans des zones urbaines fortement peuplées, des cellules d'une taille pouvant avoisiner quelques centaines de mètres sont présentes pour couvrir des environnements dits pico cellulaire (“indoor” de rayon inférieur à 100 m) et micro-cellulaire (“Outdoor” de rayon inférieur à 1 Km), tandis que de vastes cellules « macro cellulaires » varie de 1 à 35 Km permettent de couvrir les zones rurales.



**Figure I.4** : Exemple de réseau cellulaire.

Afin d'éviter les interférences, les cellules adjacentes n'utilisent pas la même fréquence. En pratique, deux cellules possédant la même gamme de fréquences doivent être éloignées d'une distance représentant deux à trois fois le diamètre de la cellule [6].



**Figure I.5** : Structure d'une cellule.

#### **I.4 La réutilisation fréquentiel:**

Par rapport au système de première génération, les cellules étant de taille plus petite, la puissance d'émission est plus faible et le nombre d'utilisateurs limité. C'est grâce au principe de réutilisation de fréquence qu'un opérateur peut être augmenté la capacité de son réseau est donc augmenté le nombre d'utilisateurs. En effet il lui suffit de découper une cellule en plusieurs cellules plus petites et de gérer son plan de fréquence pour éviter toute infrastructure. Il y a ainsi toute une nomenclature spécifique pour classer les cellules en fonction de leur taille (macro, micro, pico, etc.). La capacité est le trafic maximum que peut écouler une cellule en fonction du nombre de fréquences qui lui sont attribuées, le trafic étant fonction du nombre moyen de personnes qui communiquent et de la durée moyenne d'une communication.

#### **I.5 Les systèmes radio cellulaires et leurs évolutions :**

Les radiocommunications à l'aide du téléphone mobile sont actuellement en très rapide évolution. Le principal objectif à atteindre est d'offrir de nouveaux services pour transmettre des signaux à très haut débit avec une meilleure qualité de service aux abonnés.

Les standards et leurs évolutions sont présentées ci-dessous [7, 8, 9] :

### **I.5.1 Première génération :**

Dans les années 1970-1980, la première génération de téléphone mobile noté (1G) fait son apparition. Elle possède un fonctionnement analogie et est constituée d'appareils relativement volumineux et a couverture limitée. Les principaux standards utilisaient sont :

✚ **AMPS** (Advanced Mobile Phone System) : apparu en 1976 aux Etats-Unis, constitue le premier standard de réseau cellulaire. Utilisé en Russie, en Asie et autres, ce réseau analogique de première génération possédait de faibles mécanismes de sécurité rendant possible le piratage de lignes téléphoniques.

✚ **TACS** (Total Access Communication System) : est la version européenne du modèle AMPS. Utilisant la bande de fréquence des 900 MHz, ce système fut également utilisé en Angleterre, puis en Asie (Hong-Kong et Japon).

✚ **ETACS** (Extended Total Access Communication System) : est une version améliorée du standard TACS qui fut développé au Royaume-Uni avec un nombre plus important de canaux de communication.

Ces réseaux ne permettent pas de garantir la confidentialité des communications et sont par ailleurs devenu très saturée.

### **I.5.2 Deuxième génération :**

#### I.5.2.1 Le standard GSM:

Contrairement à la 1G, les communications sont complètement numériques pour la deuxième génération de téléphonie mobile (2G), au début des années 90, la norme GSM (Global System for Mobile Communication) pour la communication sans fil est adoptée en Europe. La 2G permet de transmettre la voix ainsi que les données numérique de faibles volumes.

Le GSM est maintenant devenu un mot aussi classique que frigo ou fermeture éclair, avant de rentrer dans le vif du sujet il est important de connaître la définition exacte de GSM et surtout de souligner qu'il n'y a pas un GSM mais des GSM, représentés ci-dessous :

✚ GSM 900 : Système radio mobile basé sur la norme **GSM** à vocation urbaine et rurale (macro cellules) et utilisant 2 bandes de fréquences de 25 MHz autour des 900 MHz, les bandes fréquentielles sont : (890-915) MHz et (935-960) MHz. Ce fut le premier système numérique implémenté en France et a des cellules de tailles jusqu'à 35 Km.

✚ DCS 1800 : Digital Cellular System

Système radio mobile dérivé du GSM 900 à vocation urbaine (micro cellule) et utilisant actuellement 2 bandes de fréquences de 75 MHz autour des 1800 MHz, la 1<sup>ère</sup> bande est de (1710-1785) MHz et la 2<sup>ème</sup> (1805-1880) MHz. Ce sont les anglais qui ont demandé l'évolution de la norme GSM la bande 900 étant déjà partiellement occupée chez eux.

✚ PCS 1900 : Personne Communication Service

Variante du DCS 1800 elle est présentée pour l'instant uniquement en Amérique du Nord et du Sud, elle utilise 2 bandes de fréquences autour de 1900 MHz.

La 1<sup>ère</sup> bande est de (1850-1910) MHz et la 2<sup>ème</sup> (1930-1990) MHz

#### 1.5.2.2 L'architecture du réseau GSM [10, 11] :

Le réseau GSM a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC - réseau fixe). Le réseau GSM se distingue par un accès spécifique : la liaison radio. Le réseau GSM est composé de quatre sous ensembles :

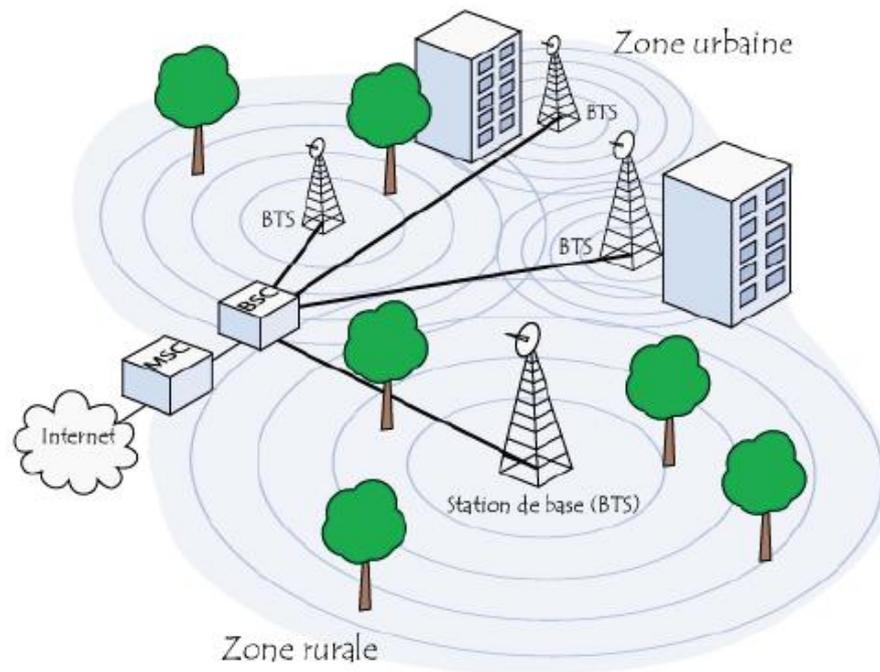
✚ **La station mobile (MS)** : c'est le téléphone portable qui est transporté par l'utilisateur.

✚ **Le sous système radio (BSS)** : assure et gère la transmission radio.

✚ **Le sous système d'acheminement (NSS)** : comprend l'ensemble des fonctions nécessaires pour les appels et la gestion de la mobilité.

✚ **Le sous-système d'exploitation et de maintenance (OSS)** : permet à l'opérateur d'exploiter son réseau.

Les éléments de l'architecture du réseau GSM sont repris sur le schéma de la figure I.6.



**Figure I.6** : Architecture du réseau GSM.

*a) La station mobile (Mobile Station) :*

La station mobile MS (Mobile Station) permet à l'abonné d'accéder aux services GSM au travers du système cellulaire. La station mobile est composée d'un équipement qui contient son identité internationale IEMI (International Mobile Equipment Identity) et d'une carte SIM (Subscriber Identity Mobile) qui contient l'identité de l'abonné IMSI (International Mobile Subscriber Identity) et la clé  $K_i$  (Individual Subscriber Authentication Key) servant à l'authentification et au chiffrement de la liaison radio.

*b) Le sous système radio BSS (Base Station Subsystem) :*

Le BSS est un ensemble regroupant le BSC et les BTS qui lui sont associés. C'est la BSS qui assure la gestion du canal radio, c'est à dire la configuration des canaux, l'affectation de ces canaux, la supervision de la communication, le timing des messages, le contrôle de la puissance, les sauts de fréquence, le codage du canal, le transcoding de la parole, le handover entre BTS, le processus d'émissions discontinues.

- **BTS : Base Transceiver Station** : la station de base est l'élément central, que l'on pourrait définir comme un ensemble émetteur /récepteur pilotant une ou plusieurs cellules. Dans le réseau GSM, chaque cellule principale au centre de laquelle se situe une station de base peut être divisée, grâce à des antennes directionnelles, en plus petites cellules qui sont des portions de celle de départ et qui utilise des fréquences porteuses différentes.

C'est la station de base qui fait le relais entre le mobile et le sous-système réseau. Comme le multiplexage temporel est limité à 8 intervalles de temps, une station de base peut gérer tout au plus huit connections simultanées par cellule. Elle réalise les fonctions de la couche physique et de la couche liaison de données.

En cas de besoin, on peut exploiter une station de base localement ou par télécommande à travers son contrôleur de station de base.

- **BSC : Base Station Controller** : Le contrôleur de stations de base BSC administre un ensemble de stations de base BTS. Il est l'organe intelligent du sous-système radio. Le BSC effectue la gestion du trafic des BTS. Il assure l'allocation de canaux, la gestion du saut de fréquence, le transfert intercellulaire des communications, la gestion de la signalisation sur voie radio. Il assure aussi des fonctions de liaison avec le centre d'exploitation et de maintenance.

*c) Le NSS (Network Switching Subsystem) :*

Le sous-système réseau NSS prend en charge les fonctions de commutation et de routage. Il est composé des éléments suivants :

- **MSC (Mobile-services Switching Center)** :C'est le centre de commutation des appels mobiles (routage des communications). Il gère les procédures de contrôle d'appel ainsi que les procédures de gestion de la mobilité des abonnés (avec le VLR). Il gère l'établissement des communications entre un mobile et un autre MSC, la transmission des messages courts et l'exécution des handover lorsqu'il est impliqué.

- **HLR (Home Location Register)** : Le HLR est la base de données centrale contenant toutes les informations administratives relatives aux abonnés d'un réseau donné utilisant deux clés d'entrée :

- ✓ IMSI (International Mobile Subscriber Identity) : C'est un numéro unique alloué à chaque abonné stocké dans la carte SIM et utilisé par le réseau pour la transmission des données de l'abonné.

- ✓ MSISDN (Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network): C'est le numéro d'appel de l'abonné lié à l'IMSI dans le HLR; les appels destinés à l'abonné sont transcrits en numéro d'IMSI ce qui permet sa recherche et l'établissement de la communication.

- **VLR (Visitor Location Register)** : Le VLR est une base de données reliée à un MSC qui stocke temporairement les informations concernant chaque mobile dans la zone de travail du MSC, (identité de l'abonné, sa dernière zone de localisation, les services complémentaires souscrits par celui-ci, les éventuelles restrictions ou interdictions d'établissement de la communication).

- ✓ Le centre d'authentification AuC (Authentication Center) : Le AuC est une base de données protégée qui contient une copie de la clé secrète inscrite sur la SIM de chaque abonné. Cette clé est utilisée pour vérifier l'authenticité de l'abonné et pour le cryptage des données envoyées.

- ✓ EIR (Equipment Identification Register) : L'EIR est une base de données annexe contenant les identités des terminaux (IMEI). Elle peut être consultée lors des demandes de services d'un abonné pour vérifier si un Mobile Equipment (ME) a ou il n'a pas le droit d'accès au système.

#### d) Sous Système d'Exploitation et de Maintenance :

Ce sous système est composé généralement d'un sous système d'exploitation et de maintenance du BSS, appelé OMC-R et d'un sous système d'exploitation et de maintenance du NSS, appelé OMC-NSS :

- ✓ L'OMC-R : assure les fonctions d'exploitation et de gestion du BSS, à savoir la gestion des cellules, l'affichage des performances du BSS, la visualisation des alarmes... L'OMC\_R permet également le paramétrage et l'intégration des nouveaux équipements dans le BSS (déclaration des nouvelles cellules, nouveaux BSC...).

✓ L'OMC-NSS : permet la centralisation de l'exploitation technique du sous système réseau. Parmi les principales fonctions de l'OMC-NSS est la visualisation des états de différents organes (software et hardware) composant le sous système réseau.

### **I.5.3 Les 2,5 et 2,75 générations : (Extension du GSM vers le GPRS et EDGE)**

Des améliorations de la norme GSM sont mise au point afin d'en améliorer le débit. C'est le cas notamment des standards GPRS (General Packet Radio Service « 2,5 G ») et EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution « 2,75 G »). Ces deux standards continuent à profiter de l'infrastructure existante du GSM [1, 2, 3].

Le GPRS fait son apparition en 2001. Il permet d'étendre l'architecture du standard GSM, afin d'autoriser le transfert de donnée par paquets avec des débits 3 fois plus important que la 2G. Cette méthode est plus adaptée à la transmission des données. Grace au mode de transfert par paquets, les transmissions des données n'utilisent le réseau que lorsque cela est nécessaire. En effet, les ressources ne sont allouées que lorsque des données sont échangées, contrairement au mode « circuit » en GSM ou une connexion est établie pour toute la durée de la communication. Cela autorise à un accès plus confortable aux services WAP (Wireless Application Protocol) et à un internet allégé.

Tout comme la norme GPRS, le standard EDGE est utilisé comme transition vers la 3G. Une modification du type de modulation permet d'améliorer le taux de la transmission de données. Il quadruple les améliorations du débit de la norme GPRS, ouvrant ainsi la porte aux applications multimédias.

Le standards EDGE utilise la modulation 8-PSK qui est différente de celle de GSM, ce qui implique une modification des stations de base et des terminaux mobiles.

### **I.5.4 La troisième génération :**

La troisième génération (3G) [1, 2, 3] représente une évolution majeure par rapport à la 2G. Sur la base de communications « voix », se sont les services mobiles qui profitent de réseaux hauts débits largement supérieur. En 2002 la norme UMTS fait son apparition cette dernière propose d'atteindre un débit de donnée plus important, ouvrant ainsi la porte à des applications multimédia comme visiophonie, diffusion de con-

tenu vidéo et audio, MMS vidéo ou audio, l'accès à internet haut débit etc. il existe plusieurs formes de (3G) dans le monde, la norme UMTS employée en Europe repose sur la technologie W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) qui utilise une bande de fréquence de 5 MHz pour le transfert de la voix et de données avec des débits pouvant aller de 384 kbits/s à 2 Mbits/s. tandis que le CDMA 2000 est utilisé aux Etats Unis et le TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) en Chine. L'UMTS utilise les bandes (1885-2025) MHz et (2110-2200) MHz.

Cependant une nouvelle infrastructure de réseau doit être mise en place car l'UMTS ne peut fonctionner sur les réseaux GSM.

### **I.5.5 La quatrième génération :**

En 2010, le monde a connu une grosse évolution dans le domaine de la téléphonie mobile qui arrive à sa 4ème génération. La 4ème génération (ou 4G) succède à la 3G, et est une dénomination qui regroupe un ensemble de critères évolutifs et se traduit surtout par l'augmentation du débit et de la qualité des services (atténuation des problèmes de connexion, souplesse d'utilisation de la TV mobile).

De nombreux critères entrent en jeu, et si la 3G nous offre des débits maximums de 7 à 14 Mbit/s selon les pays, la 4G nous permettra d'atteindre des débits de l'ordre de 100 Mbit/s théoriques en mouvement, et jusqu'à 1Gbps en fixe. En 2010, la technologie 4G (ou LTE signifiant *Long Term Evolution*) s'est vue être mise en place dans plusieurs pays comme aux USA, en Norvège ou encore en Suède.

Le tableau ci-dessous représente un résumé de l'évolution des standards de communication :

<b>Génération</b>	<b>Standard</b>	<b>Bande de fréquence</b>	<b>Débit</b>
1G	ETACS	Analogique ; premier téléphone sans fil, voix uniquement	
2G	GSM	Permet le transfert de voix ou de données numériques de faible volume.	9,6 Kbits/s

2,5G	GPRS	Permet le transfert de voix ou de données numériques de volume modéré.	(21,4 - 171,2) Kbits/s
2,75G	EDGE	Permet le transfert simultané de voix et de données numériques.	(43,2 - 345,6) Kbits/s
3G	UMTS	Permet le transfert simultané de voix et de données numériques à haut débit.	(0.144 - 2)Mbits/s
4G	LTE	Permet aussi le transfert simultané de voix et de données numériques à haut débit en temps réel	100 Mbit/s

**Tableau I.1** : L'évolution des standards de communication.

## **I.6 Le téléphone portable :**

### **I.6.1 L'histoire de la téléphonie mobile :**

Le tout premier téléphone portable a été inventé par Dr Martin Cooper un directeur général de Motorola en Avril 1973. Lui même, d'ailleurs, a été la première personne à faire un appel depuis son téléphone portable, qui a été destinée à son rival Joël Engel, un grand chercheur. Ce fût un énorme pas dans la technologie. Grâce à son utilité, il a été bien vite commercialisé et ses ventes sont montées en flèche.

Cet appareil qui nous permet d'être joints presque n'importe où et à n'importe quel moment est devenu aujourd'hui indispensable et très utile. Son énorme succès a même touché presque toutes les générations. Il devient de plus en plus rare celui qui ne possède pas de téléphone portable.

Sa technologie s'est développée en moins de 100 ans à une vitesse surprenante. Aujourd'hui nous trouvons comme importantes marques : Sonny Ericsson, Motorola,

Samsung, Nokia, entre beaucoup d'autres. Le niveau de concurrence est très élevé, mais par contre la demande ne cesse elle aussi d'augmenter. L'évolution rapide de la technologie et des goûts incite les consommateurs à changer constamment leur téléphone et à ne plus utiliser leurs vieilles combines.

### I. 6.2 La composition du téléphone portable :



Un téléphone mobile seul ne permet ni d'effectuer ni de recevoir des appels.

En effet, c'est un concentré d'électronique compatible avec une norme de réseau donnée.

La structure du terminal mobile, répond à des exigences de taille, de poids, de Convivialité et d'autonomie, ainsi il est composé de plusieurs éléments pour son bon fonctionnement qui sont représentés ci-dessous :

**Figure I.7 :** Téléphone portable.

- **La carte SIM :** (Subscriber Identification Module)

C'est une carte à puce qui mémorise toutes les informations sur l'utilisateur, le réseau auquel il est abonné, le répertoire et les messages. Il en existe deux formats de celle-ci : ISO (taille d'une carte de crédit) et micro (pour les téléphones les plus petits).



**Figure I.8 :** Carte SIM.

- **L'écran pour ondes radio :**

Il s'agit d'un écran en aluminium qui sépare la carte supportant les circuits logiques internes du reste du téléphone. Cet écran est nécessaire afin d'éviter les pa-

parasites et les émissions de champs électromagnétiques. Il sert d'isolant par rapport à l'électricité statique.



**Figure I.9** : Ecran tactile.

- **Le clavier :**

Le clavier permet de composer les numéros de téléphone, mais également de taper des messages à envoyer, de configurer l'appareil,... La tendance est à la simplification de l'interface. Par exemple quelques marques proposent une « touche à tout faire » baptisée NAVI ; d'autres marques ont mis au point un système de commandes vocales avec lequel l'utilisateur n'a qu'à prononcer le numéro de téléphone à appeler ou le nom d'une personne répertoriée.

Certains claviers sont rétro éclairés, ce qui pose des problèmes de consommation d'énergie, de répartition égale de la lumière entre les touches, et de choix d'une matière translucide.

- **Boîtier :**

Il est nécessaire que le boîtier constitue un blindage performant contre les émissions extérieures. Les boîtiers sont moulés et blindés par métallisation. Afin de réduire leur poids, on utilise des matières en plastique rendant possible la réalisa-

tion de cloisons d'environ 1mm d'épaisseur, ce qui nécessite l'utilisation de produits présentant une très bonne aptitude au moulage.



**Figure I.10** : boîtier et clavier d'un téléphone.



- **Batterie :**

L'objectif pour les batteries est de maximiser l'énergie disponible dans un minimum de volume et de poids pour obtenir l'autonomie la plus longue. Les batteries comportent également un système de contrôle de surcharge, une sonde de température, un fusible ...

**Figure I.11** : Batterie.

- **Micro et haut-parleur :**

Le microphone est généralement de type électret. Les volets pliables permettent d'améliorer le rapport signal/bruit en réduisant le bruit ambiant.

Le haut-parleur fait parfois office de *buzzer* (sonnerie). Les modèles proposant un son « hi-fi » utilisent un haut-parleur à noyau magnétique indépendant du *buzzer*.

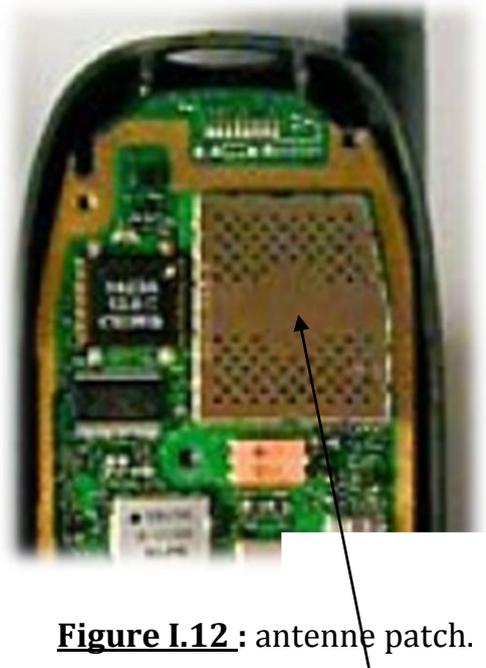
La sonnerie avise l'utilisateur de l'arrivée d'une communication. Elle peut être remplacée par un vibreur, plus discret mais plus gourmand en énergie.

- **L'antenne :**

Ce conducteur aérien, particulièrement utile en limite de couverture, favorise l'émission et la réception (sur deux fréquences différentes). Il en existe plusieurs modèles : antennes fixes, antennes à déployer, antennes imprimées ...

Les constructeurs de ce morceau de métal choisissent de plus en plus de les intégrer au téléphone portable pour soigner au mieux le design.

Quand on compose le numéro, on active le système de contrôle ; les informations relatives à l'abonné contenues dans la carte SIM sont transformées en ondes radio et émises à travers l'antenne.



**Figure I.12 :** antenne patch.

## **I. 7 .conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de connaître les principaux standards de télécommunications mobiles et leurs évolutions, de la première génération jusqu'à la quatrième génération, Ainsi que les techniques d'accès. Nous avons pu voir l'histoire du téléphone portable et leurs compositions qui sont composé de l'élément essentiel de communication qui est « l'antenne ».

Dans le chapitre suivant, nous présentons les antennes qui sont l'élément essentiel pour la transmission et la réception, on va donner un aperçu sur le rayonnement de l'antenne : comment il rayonne, a quel distance il rayonne. Ainsi on va exposer les caractéristiques de l'antenne tel que le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité, etc.

Et enfin on va citer les types d'antenne, parmi eux la pièce qui compose le téléphone portable qui est l'antenne Patch.

# Chapitre 2

## **II.1 Introduction :**

Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord, grâce aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme, plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés. L'essor actuel des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes aujourd'hui très diverses varient beaucoup selon les utilisations : télécommunications mobiles, satellites, télévision, radio, identification, objets communicants, etc.

Malgré cette grande diversité, toutes les antennes ont en commun de transformer un signal guidé en un signal rayonnant (ou réciproquement), dans un spectre électromagnétique relativement large allant des ondes radio aux hyperfréquences.

Actuellement, la course à l'innovation concernant les systèmes de communication entraîne des études poussées dans le domaine des antennes.

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Comme nous le verrons dans ce chapitre, il existe de nombreux types d'antennes.

Il est important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, d'une part à utiliser l'antenne au mieux de ses performances et d'autre part, à en réaliser une conception optimale.

Les techniques de conception et de réalisation d'antennes se sont affinées au fur et à mesure que le domaine de l'électromagnétisme s'est développé. C'est un domaine relativement récent, puisque c'est en s'appuyant sur les équations de Maxwell que tous les développements théoriques et techniques ont pu progresser. Les avancées dans ce domaine ont été rapides car touchant aux transmissions radioélectriques dont le nombre d'applications est considérable.

## **II.2 Le rôle des antennes [12] :**

### **II.2.1 Antenne d'émission :**

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée.

Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur.

### **II.2.2 Antenne de réception :**

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme.

### **II.2.3 Réciprocité :**

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas.

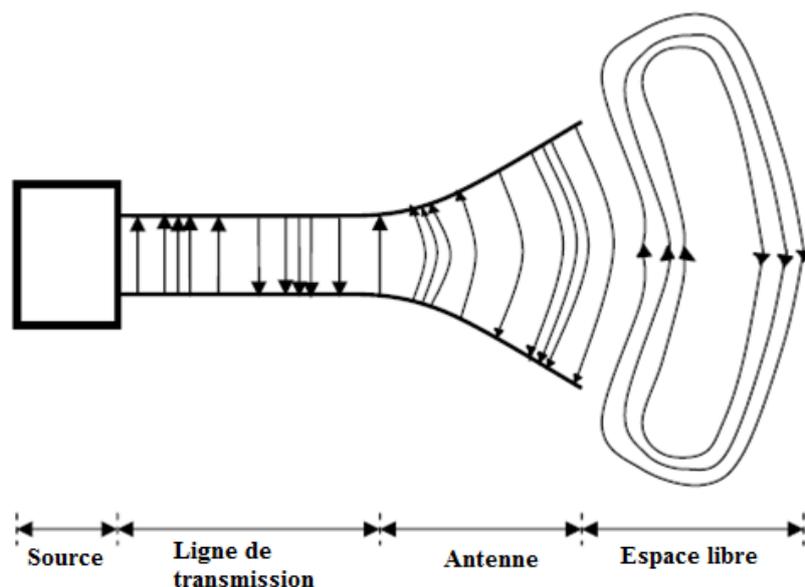
## **II.3 Comment rayonne une antenne :**

Afin de savoir comment une antenne rayonne, voyons d'abord comment le rayonnement se produit. Un fil conducteur rayonne principalement en raison d'une variation temporelle du courant ou une accélération (ou décélération) de la charge. S'il n'y a pas de déplacement de charges dans le fil y'aura pas de rayonnement, car aucun flux de courant ne se produit. Le rayonnement ne se produira pas même si les charges sont en mouvement avec une vitesse uniforme dans un fil rectiligne. Mais dans un fil courbé ou

plié le mouvement des charges avec une vitesse uniforme produira des rayonnements. Si la charge oscille dans le temps, le rayonnement se produit même dans d'un fil rectiligne comme l'a expliqué Balanis [13].

Le rayonnement d'une antenne peut être expliqué comme montré la Figure II.1 qui présente une source de tension connecté à une ligne de transmission à deux conducteurs. Quand une tension sinusoïdale est appliquée à travers la ligne de transmission, un champ électrique est créé qui est sinusoïdal dans la nature et il en résulte la création de lignes de force électriques qui sont tangentielle du champ électrique. L'amplitude du champ électrique est indiquée par la concentration des lignes de force électriques.

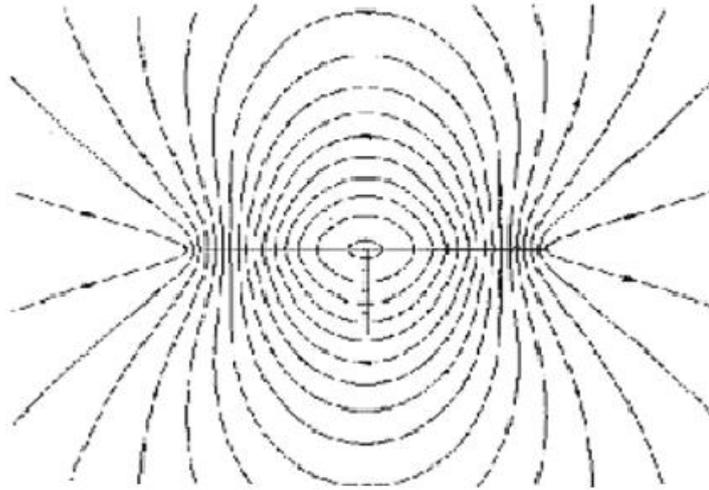
Les électrons libres sur les conducteurs sont déplacés par les lignes électriques de force et le mouvement de ces charges provoque la circulation du courant qui à son tour conduit à la création d'un champ magnétique.



**Figure II.1 :** Rayonnement d'une antenne.

#### **II.4 Rayonnement électromagnétique : (champ proche et champ lointain) :**

Les champs dans la proximité de l'antenne sont extrêmement complexes à analyser. La Figure II.2 montre un exemple des lignes de champ produites par une antenne demi-onde [14,15, 16].



**Figure II.2:** Lignes de champs produites par une antenne demi-onde.

$D_{se}$  est le diamètre de la surface équivalente de l'antenne et  $r$  la distance à l'antenne. Les physiciens ont défini plusieurs zones autour de l'antenne (voir Figure II.3).

#### II.4.1 Zone de Rayleigh :

Dans cette zone de champ proche (ou zone de Rayleigh), il y a échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu extérieur. A courte distance (par rapport à la longueur d'onde) pour  $r < D_{se}^2/2\lambda$ , la densité de puissance est quasi constante (tube d'énergie).

Les champs varient peu en fonction de la distance mais ils sont très complexes à analyser.

#### II.4.2 Zone de Fresnel :

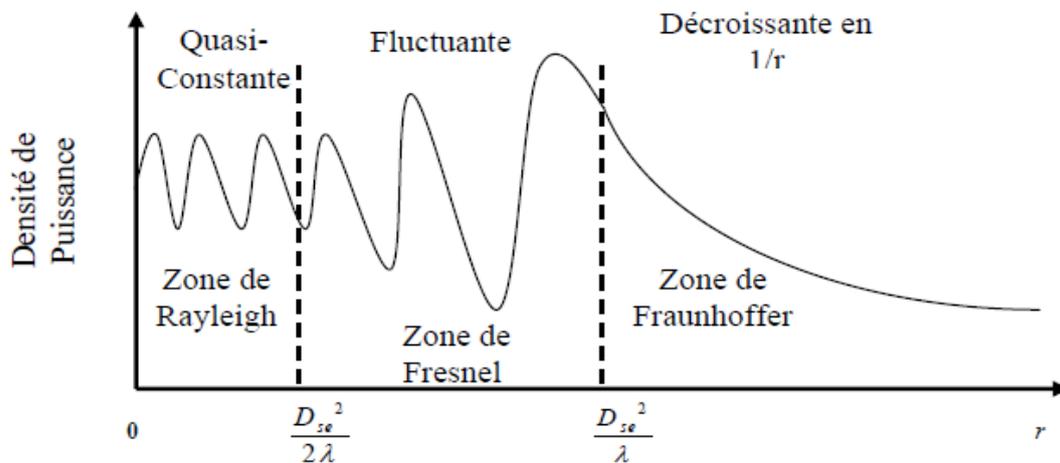
Elle se situe entre les deux extrêmes. Ici les champs varient avec de fortes oscillations. Dans cette zone  $D_{se}^2/2\lambda < r < 2 D_{se}^2/\lambda$  : la densité de puissance est fluctuante.

#### II.4.3 Zone de Fraunhofer :

Dans la zone du champ lointain (ou de Fraunhofer), à grande distance par rapport à la longueur d'onde, les champs sont rayonnés sous la forme d'une onde quasiment plane. Dans cette zone,  $r > 2 D_{se}^2/\lambda$ , la densité de puissance décroît en  $1/r$ .

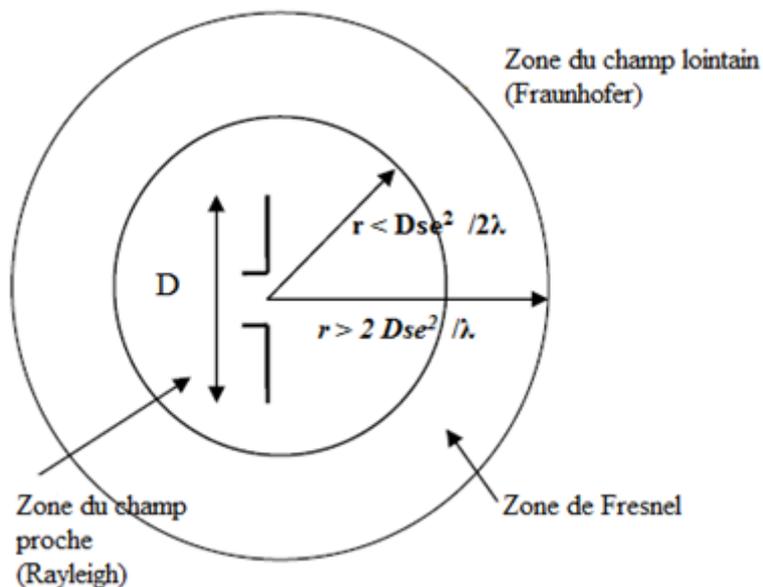
Quel que soit le type d'antenne, on obtient invariablement des champs dont les expressions mathématiques indiquent des variations en  $1/r$ ,  $1/r^2$  et  $1/r^3$ . On interprète ces variations des champs selon la distance comme ceci :

- les termes en  $1/r$  correspondent au rayonnement.
- les termes en  $1/r^2$  de E sont reliés à l'induction.
- les termes en  $1/r^3$  de E et en  $1/r^2$  de H proviennent de l'électrostatique.



**Figure II.3 :** La densité de puissance rayonnée par l'antenne.

Donc l'espace environnant d'une antenne est divisé en trois parties qui sont présentées dans la (figure II.4) suivante :



**Figure II.4:** Limite des 3 zones de rayonnement.

## II.5 Les paramètres de l'antenne :

Les caractéristiques des antennes sont utiles pour le dimensionnement des systèmes d'émission réception. Ces derniers sont essentiellement liés à la forme du rayonnement dans l'espace.

Le fonctionnement normal d'une antenne est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance.

Un grand nombre de paramètres permettent de classer les antennes tels que la directivité, le diagramme de rayonnement, la bande passante, la polarisation, etc.

Alors la performance d'une antenne peut être évaluée à partir de ses paramètres qui sont présentées ci-dessous.

### II.5.1. Diagramme de rayonnement : [16]

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « *diagramme de rayonnement* ». C'est une représentation du rayonnement en 2-D ou 3-D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné à grande distance qui est en fonction de  $\theta$  (angle de Site : plan vertical) et  $\varphi$  (angle d'Azimut : plan horizontal).

Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : **le plan E** et **le plan H**. Le plan E (plan vertical) est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique. Le plan H (plan Horizontal) est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique.

C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace.

Prenons le cas d'une antenne isotrope, c'est à dire rayonnant de la même façon dans toutes les directions, soit  $P$  la puissance totale rayonnée par l'antenne isotrope, la puissance rayonnée par unité de surface à la distance  $r$ , ou la densité de puissance  $S$  à cette distance dans n'importe quelle direction est donnée par :

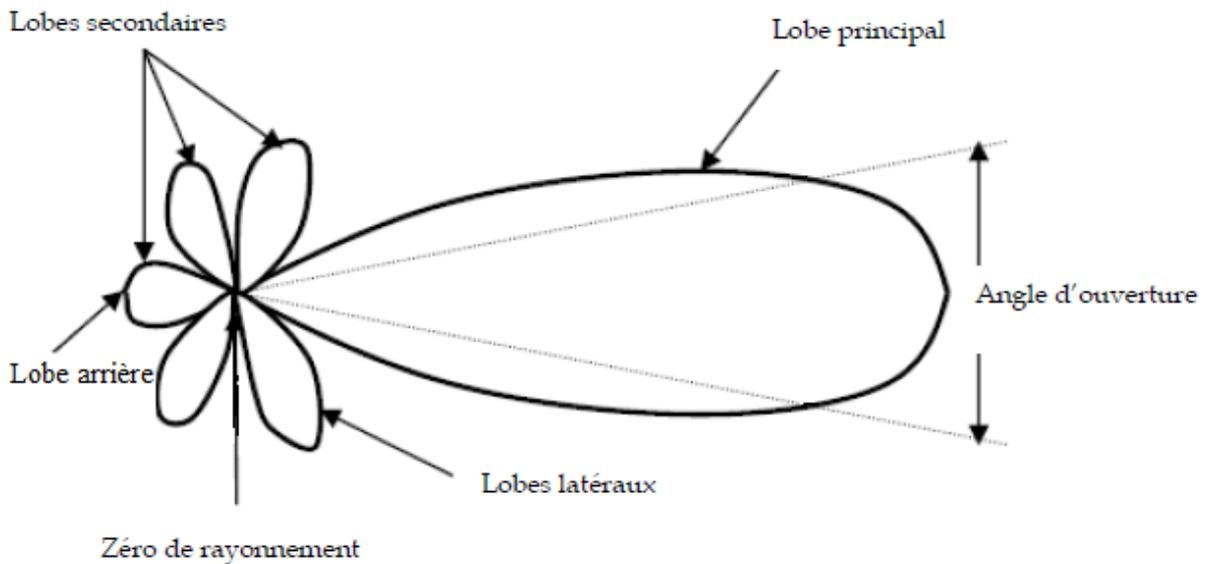
$$S = \frac{P}{\text{area}} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{II.1})$$

Alors l'intensité de rayonnement de l'antenne isotrope  $U_i$  peut être écrite comme :

$$U_i = r^2 S = \frac{P}{4\pi} \quad (\text{II.2})$$

L'antenne isotrope n'existe pas et n'est pas réalisable. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions sont privilégiées : ce sont les **lobes de rayonnement**.

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Un cas particulier de l'antenne directionnelle est l'antenne omnidirectionnelle, dont le diagramme de rayonnement peut être constant dans un seul plan (plan E), et varie dans le plan orthogonal (horizontal) (plan H). Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est montré dans la (figure II.5) ci-dessous :



**Figure II.5** : Diagramme de rayonnement classique d'une antenne directive.

- ✚ **Un lobe principal:** C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- ✚ **Un angle d'ouverture:** L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable.

Il est donc représentatif de la directivité de l'antenne. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.

✚ **Des lobes secondaires:** Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau du lobe secondaire est en général exprime sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobes secondaires et il est exprime en dB.

✚ **Un lobe arrière (rayonnement arrière):** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à 180° du lobe principal. Le rapport avant/arrière est le rapport en dB de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport a celle rayonnée dans la direction opposée.

Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les lobes secondaires.

### II.5.2. La directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité été définie comme [13] : le quotient de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par la valeur moyenne de cette intensité de rayonnement pour toutes les directions de l'espace.

Une antenne isotrope rayonne uniformément la même densité de puissance quelque soit la direction.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P} \quad (\text{II.3})$$

Ou

$D$  : est la directivité de l'antenne.

$U$  : est l'intensité de rayonnement de l'antenne.

$U_i$  : est l'intensité de rayonnement d'une source isotrope.

$P$  : est la puissance totale rayonnée.

Parfois, la direction de la directivité n'est pas spécifiée. Dans ce cas, la direction de l'intensité de rayonnement maximale est implicite et la directivité maximale est donnée par:[13]

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{max}}{P} \quad (II.4)$$

Ou ;  $D_{max}$  : est la directivité maximale.

$U_{max}$  : est l'intensité de rayonnement maximal.

La directivité est une grandeur sans dimension, puisque c'est le rapport de deux intensités de rayonnement. Par conséquent, il est généralement exprimé en *dBi*. La directivité d'une antenne peut être facilement estimée à partir du diagramme de rayonnement de l'antenne. Une antenne qui a un lobe principal étroit aurait une meilleure directivité, puis celui qui a un lobe principal large, par conséquent elle est plus directive.

### II.5.3. L'impédance d'entrée :

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on assume une antenne en émission. L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existent un courant  $I_{in}$  et une tension  $V_{in}$ . Le rapport [16] de ces deux quantités fournit l'impédance  $Z_{in}$  (ou mieux encore,  $Z_a$ ).

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a \quad (II.5)$$

On considère simplement l'antenne comme un circuit électrique ayant cette même impédance lors des calculs de transfert de puissance.

Cela semble facile mais l'impédance que présentent les antennes est une fonction complexe et ce même pour les structures les plus simples. Comme toute impédance, celle de l'antenne comprend une partie réelle  $R_a$  (active) et une partie imaginaire  $X_a$  (réactive) telle que :

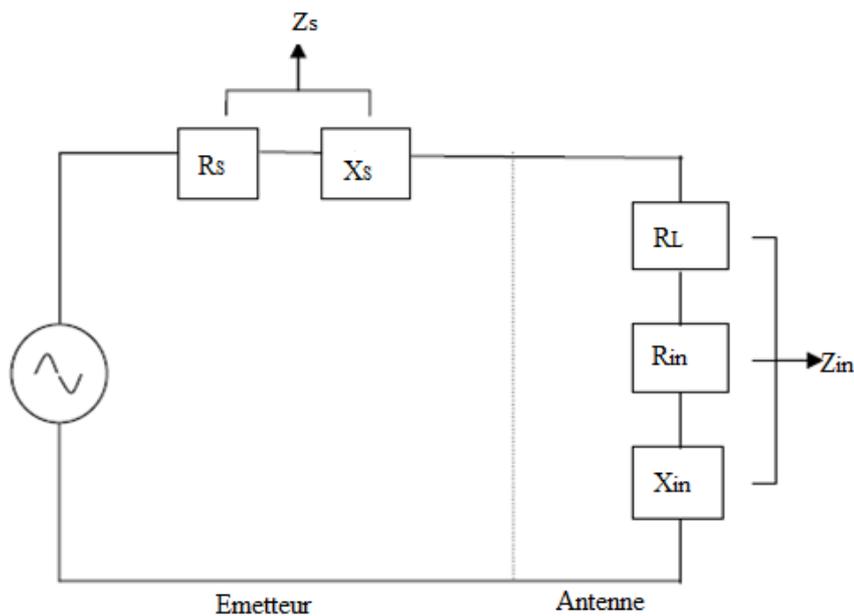
- ✚ la partie réactive (réactance) : est due aux champs d'induction au voisinage de l'antenne ; elle est capacitive pour les antennes électriquement courtes (un peu comme l'impédance vue près d'un circuit ouvert en régime sinusoïdale permanent) autrement, elle est inductive ou capacitive. Autrement dit elle est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

- ✚ la partie active est reliée aux champs (ou puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules, elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement  $R_r$  et une résistance de perte  $R_L$ .

La puissance associée à la résistance  $R_r$  est la responsable du rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance de perte  $R_L$  est perdu en chaleur dans l'antenne.

#### II.5.4. Le VSWR : (adaptation) :

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas que s'il y'a adaptation entre l'impédance de l'antenne ( $Z_{in}$ ) et celle de l'émetteur ( $Z_s$ ). Selon le théorème de transfert de puissance maximale, cette dernière peut être transféré que si l'impédance de l'émetteur est un conjugué complexe de l'impédance de l'antenne et vice-versa.



**Figure II.6:** Circuit équivalent d'antenne d'émission.

Ainsi, la condition pour la correspondance est la suivante:

$$Z_{in} = Z_s^* \quad (II.5)$$

Ou ;

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (II.6)$$

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (II.7)$$

Comme montré dans la figure (II.6).

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchi, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires de tension (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR).

Le VSWR est donné par Makarov [17] par:

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (II.8)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in}-Z_s}{Z_{in}+Z_s} \quad (II.9)$$

Où ;  $\Gamma$  : est appelé le coefficient de réflexion.

$V_r$ : est l'amplitude d'onde réfléchi.

$V_i$ : est l'amplitude d'onde incidente.

Le VSWR est essentiellement une mesure de la différence d'impédance entre l'émetteur et l'antenne. Plus le VSWR est grand plus la différence d'impédance est grande.

Le VSWR minimale correspond à une adaptation parfaite. Une conception pratique de l'antenne doit avoir une impédance d'entrée égale à 50  $\Omega$  ou 75  $\Omega$ , la plupart des équipements radio sont construit pour cette impédance.

### II.5.5. le coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion (Return Loss : RL) est un paramètre qui indique la quantité d'énergie perdu à la charge, et qui n'est pas réfléchi. Comme il est expliqué dans le paragraphe précédent, les ondes réfléchies entraînent la formation d'ondes stationnaires, lorsque l'impédance de l'émetteur et de l'antenne ne sont pas égaux. D'où le coefficient de réflexion est un paramètre semblable à la VSWR pour indiquer la correspondance entre l'émetteur et l'antenne.

Le coefficient de réflexion est donnée que par [17] que:

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (dB) \quad (II.10)$$

Pour une correspondance parfaite entre l'émetteur et l'antenne,  $\Gamma = 0$  et  $R_L = \infty$  signifie qu'il n'aura aucune énergie réfléchie, tandis qu'une  $\Gamma = 1$  a une  $R_L = 0$  dB, ce qui implique que toute la puissance incidente est réfléchie. Pour les cas pratiques, un VSWR de 2 est acceptable, qui correspond à un  $R_L$  de -9,54 dB.

### II.5.5. Rendement :

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation. Elle est exprimée par:

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (\text{II.11})$$

Ou ;  $R_r$  : Résistance liée à son rayonnement.

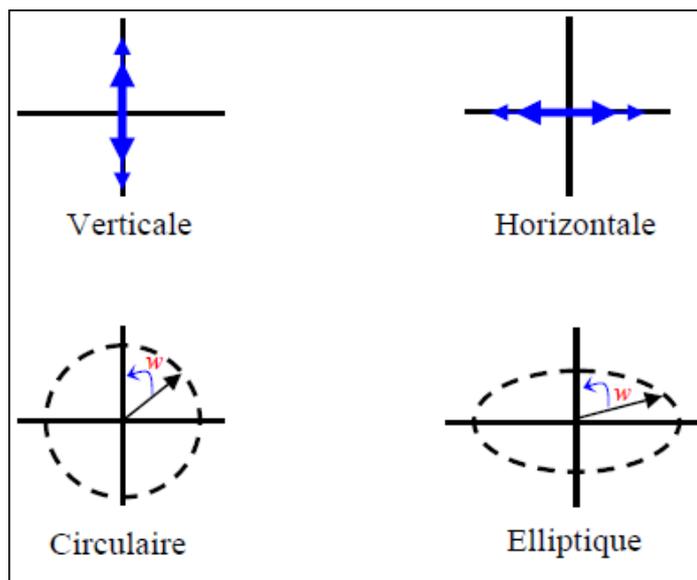
$R_L$  : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

### II.5.6. La polarisation :

La polarisation est définie comme étant l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique.

La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. En effet selon la constitution de l'antenne, elle ne recevra qu'une certaine forme de polarisation.

La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction du champ électrique  $E$ . Si  $E$  garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne (voir la Figure II.7). Si la direction varie avec le temps de telle sorte que si, en un point donné, on schématise les positions successives de  $E$ , l'extrémité du vecteur représentatif décrit un cercle ou une ellipse. On dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique.



**Figure II.7 :** Polarisation du champ électromagnétique.

### II.5.7. Le gain :

Le *gain* n'est pas une quantité qui peut être définie en termes de quantité physique tel que le Watt ou l'Ohm, c'est plutôt un rapport sans dimensions.

C'est une quantité descriptive de la performance d'une antenne. Le gain est donné en référence à une antenne standard, qui est l'antenne isotrope. L'antenne isotrope est prise rayonne aussi bien dans toutes les directions. Les vraies antennes isotropes n'existent pas mais elles fournissent des modèles théoriques utiles et simples d'antenne et nous servent d'outil de comparaison pour les vraies antennes. En théorie, toute antenne rayonnera plus d'énergie dans une direction que dans une d'autre.

Puisque les antennes ne peuvent pas créer d'énergie, la puissance totale rayonnée est identique à celle d'une antenne isotrope. N'importe quelle énergie additionnelle rayonnée dans les directions favorisées est également compensée par moins d'énergie rayonnée dans toutes les autres directions.

Le gain d'une antenne dans une direction donnée [18] est « la quantité d'énergie rayonnée dans cette direction comparée à l'énergie qu'une antenne isotrope rayonnerait dans la même direction avec la même puissance d'entrée ». Habituellement nous sommes uniquement intéressés par le gain maximum, qui est le gain dans la direction dans laquelle l'antenne rayonne la majeure partie de la puissance.

Le rapport de **gain** est donné par :

$$G(\theta, \phi) = e_{ca} D(\theta, \phi) \quad (dBi) \quad (II.12)$$

### II.5.8. La bande passante (BP) :

La largeur de bande, appelée aussi bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Elle peut être considérée comme la plage de fréquences qui se situent de part et d'autres d'une fréquence centrale et où les caractéristiques de l'antenne (Impédance d'entrée, diagramme de rayonnement, angle d'ouverture, polarisation, niveau du lobe mineur, gain, direction du faisceau) sont acceptables par rapport à celles obtenues avec la fréquence centrale (fréquence de référence)

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale  $f_{min}$  et une valeur maximale  $f_{max}$ . La bande passante [16] est donnée par :

$$BP_{LB} = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (II.13)$$

$$BP_{BE} (\%) = \left[ \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \right] 100 \quad (II.14)$$

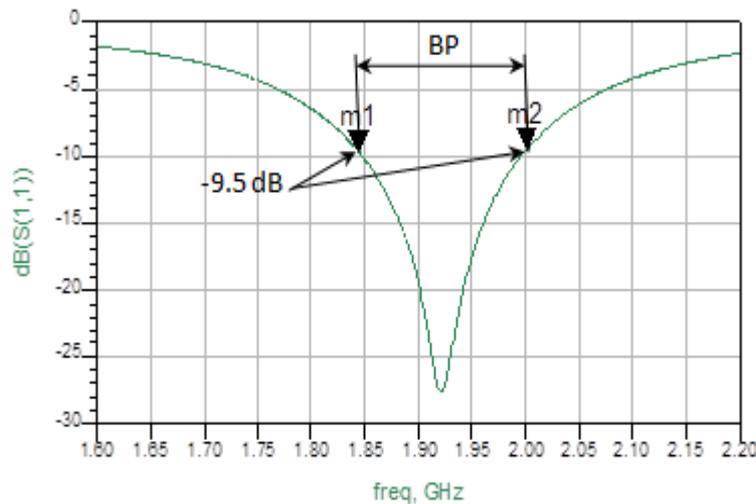
Où ;

$f_{max}$  : la fréquence maximale.

$f_{min}$  : la fréquence minimale.

$f_c$  : la fréquence centrale.

Une antenne est dite à large bande si  $f_{max} / f_{min} = 2$ . Une méthode pour juger l'efficacité de l'antenne qui fonctionne sur toute la gamme de fréquence est la mesure du VSWR. Un  $VSWR < 2$  (RL > - 9,5 dB) assure une bonne performance.



**Figure II.8 :** Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.

## II.6 Les différents types d'antenne [12] :

Afin de comprendre comment s'effectue cette transformation entre la puissance guidée et la puissance rayonnée, nous allons présenter un certain nombre d'antennes. Elles sont classées ici selon un ordre qui suit approximativement leur chronologie d'apparition. Il n'est pas question dans ce paragraphe de présenter tous les types d'antennes, mais d'en introduire certains des plus utilisés.

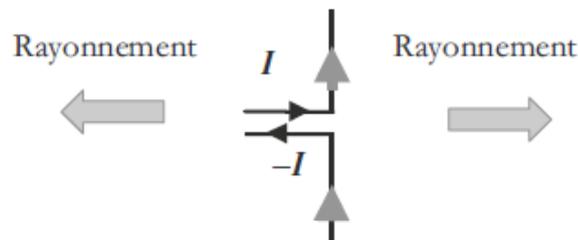
En conclusion, nous aboutirons à un classement des antennes selon le type de la source rayonnante qui apparaîtra soit comme un courant électrique, soit comme une surface caractérisée par un champ électrique.

### II.6.1. Antenne dipolaire :

L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, très courts et reliés chacun à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire (Figure II.9). En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur.

Dans la ligne bifilaire, les courants sont de sens contraire, alors que dans le dipôle les courants sont dans le même sens. L'influence de ces deux courants s'annule dans la ligne bifilaire. Ce sont les courants variables, de même sens, qui rayonnent et créent

l'onde électromagnétique dans l'espace. Étant donnée la symétrie du dipôle, le rayonnement s'effectue autour de l'axe, matérialisé par le fil. Il est isotrope dans un plan perpendiculaire à cet axe. Le rayonnement est nul dans la direction du fil. On ne peut donc pas parler d'un rayonnement isotrope.



**Figure II.9:** Antenne dipolaire.

À l'extrémité de chaque fil apparaissent des charges de signes opposées dont l'existence s'explique par la conservation de la charge. En effet, la relation de conservation suivante lie les charges au courant :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (\text{II.15})$$

D'autres antennes de même type sont obtenues avec des fils rayonnants plus longs. Ces antennes de type filaires ont de nombreuses applications. Citons rapidement les antennes pour récepteurs radio, les antennes des talkies-walkies, etc.

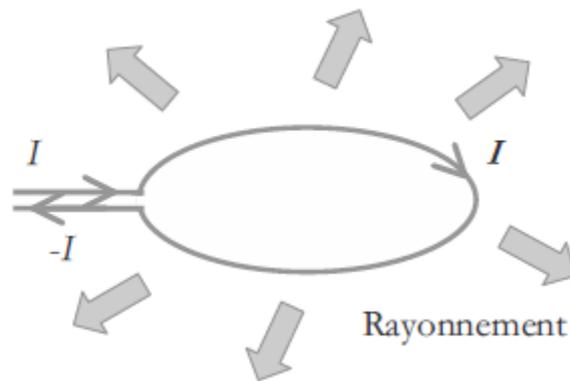
### II.6.2. Antenne à boucle magnétique :

La boucle magnétique est constituée d'un fil conducteur ayant une forme qui permet le retour du fil sur lui-même (Figure II.10). La boucle est ainsi branchée sur une ligne bifilaire reliée au générateur.

Le rayonnement, à grande distance, est maximal dans le plan de la boucle et s'effectue de façon radiale. Le courant circulant dans le fil crée un champ magnétique qui se propage. Sa variation engendre le champ électrique associé, d'où le rayonnement électromagnétique associé.

En champ lointain, les boucles magnétiques ont été très utilisées pour les récepteurs de grandes ondes radio sous forme d'un cadre sur lequel étaient enroulées plusieurs spires de fil. En champ proche, on les utilise dans tous les dispositifs RFID (identification radio fréquence). Les cartes à puce sans contact sont munies de ce type d'antenne, in-

cluse dans le support plastique. Les détecteurs d'objets métalliques sont aussi des boucles magnétiques sensibles au champ magnétique.



**Figure II.10** : Boucle magnétique.

### II.6.3. Antenne cornet :

Un dispositif très utilisé pour la propagation d'ondes guidées est le guide d'onde rectangulaire. Sa qualité de transmission est excellente, pour cette raison son utilisation est très répandue en hyperfréquences. Le transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée est l'antenne cornet (Figure II.11). Sa forme permet de passer graduellement des dimensions du guide d'onde à l'espace libre. L'onde est ainsi naturellement projetée dans l'espace libre. C'est le même principe que le cornet acoustique.

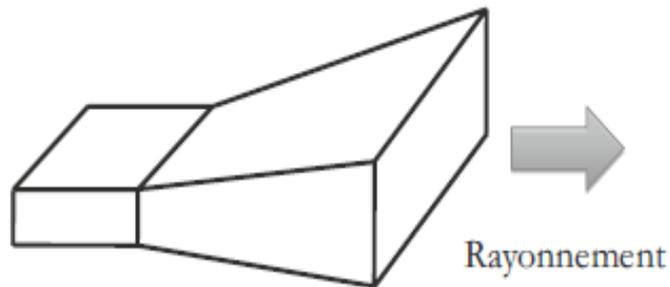
Les transitions présentent des formes variées : linéaires, exponentielles.etc

Le cornet sert de dispositif d'adaptation entre l'impédance du cornet et celle du vide.

De façon très naturelle, le rayonnement a lieu dans l'axe du guide d'onde. Cette antenne est plus directive que les précédentes, dans la mesure où la puissance n'est émise que dans une région de l'espace limitée.

Le guide d'onde est un dispositif hyperfréquence très utilisé du fait des pertes très faibles engendrées par la propagation dans celui-ci, même à hautes fréquences et de sa capacité à supporter de la puissance. Les antennes cornets qui lui sont associées sont donc aussi très utilisées comme moyen de transformation de l'onde guidée en onde

rayonnée. On les retrouve, dans toutes les bandes de fréquences, dans de nombreux systèmes tels que les radars, les antennes satellites.etc



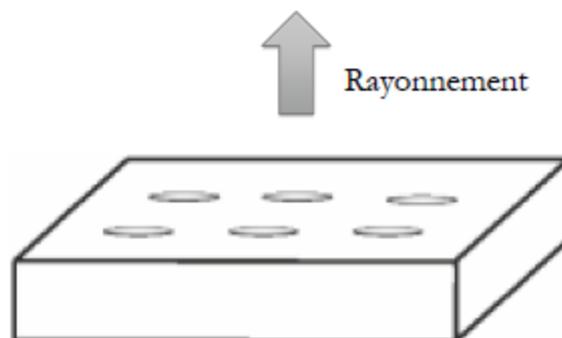
**Figure II.11:** Antenne cornet.

#### II.6.4. Antenne à réseau de fentes :

Toujours en utilisant le guide d'onde comme dispositif de transmission, il est possible d'envisager un rayonnement dans une direction différente de l'axe du guide, en utilisant des fentes dans le corps du guide (Figure II.12)

Le rayonnement s'effectue alors perpendiculairement au plan troué du guide.

Ce type de dispositif est utilisé lorsque le rayonnement doit être localisé. Par exemple, dans des tunnels, où la transmission des ondes s'effectue mal, on peut placer un réseau de fentes rayonnantes. En général la ligne est en haut du tunnel avec émission vers le bas.



**Figure II.12 :** Réseau de fentes.

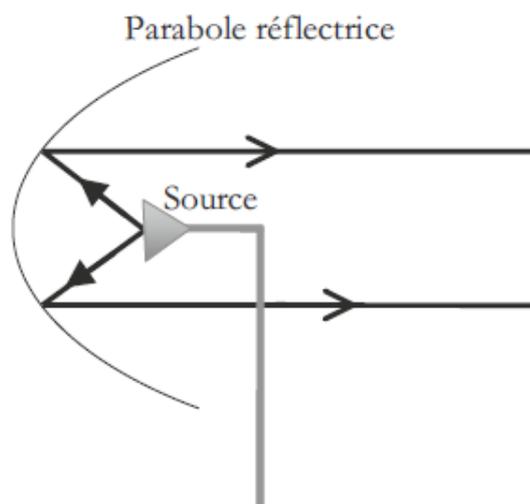
### II.6.5. Antenne à réflecteur parabolique :

L'antenne à réflecteur est constituée de la source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique (Figure II.13)

La source, placée au foyer de la parabole envoie l'onde vers le réflecteur parabolique. Selon la propriété bien connue de la parabole, tous les rayons sont réfléchis parallèlement. Ce type d'antenne est utilisé pour viser dans une direction très précise, puisque tous les rayons passant par le foyer sortent parallèles. Par décalage de la source dans le plan focal, les rayons parallèles à la sortie du réflecteur, peuvent présenter une inclinaison par rapport à l'axe de la parabole.

Ces antennes permettent de recevoir un signal d'un satellite, placé à très grande distance. Les antennes de ce type sont très répandues pour la réception de la télévision. Leur orientation est choisie de façon à viser un satellite particulier.

Afin d'éviter les perturbations par la pluie ou la neige, ces antennes sont souvent recouvertes d'un radôme. C'est le cas des antennes très exposées aux conditions climatiques, utilisées pour les transmissions hertziennes. Elles sont reconnaissables par leur forme, parabolique à l'arrière et conique à l'avant du fait de la forme du radôme qui protège la source, placée au foyer.



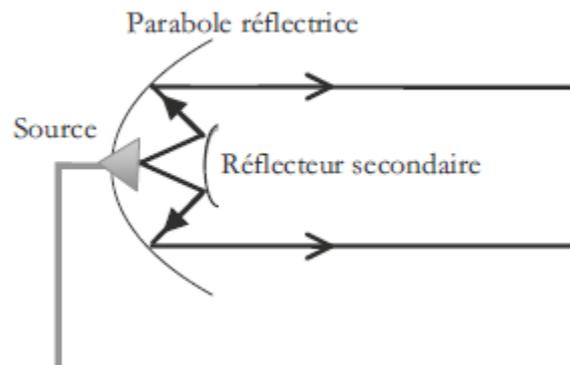
**Figure II.13** : Antenne à réflecteur parabolique.

### II.6.6. Antennes de type Cassegrain :

Une variante des antennes précédentes consiste à utiliser un réflecteur principal et un réflecteur secondaire, comme dans le montage Cassegrain (Figure II.14).

Ce nom provient du télescope du même nom reposant sur le même principe.

Les rayons issus de la source se réfléchissent sur un premier réflecteur de forme hyperbolique, puis sur le réflecteur principal de forme parabolique. Les rayons ressortent parallèlement. La propriété de l'antenne parabolique est ainsi conservée. L'intérêt de ce type d'antenne est d'être moins sensible aux parasites provenant de l'extérieur de la parabole. De plus, les câbles reliant la source à l'électronique sont plus courts que dans les systèmes d'alimentation d'une antenne parabolique. La qualité du signal s'en trouve améliorée.

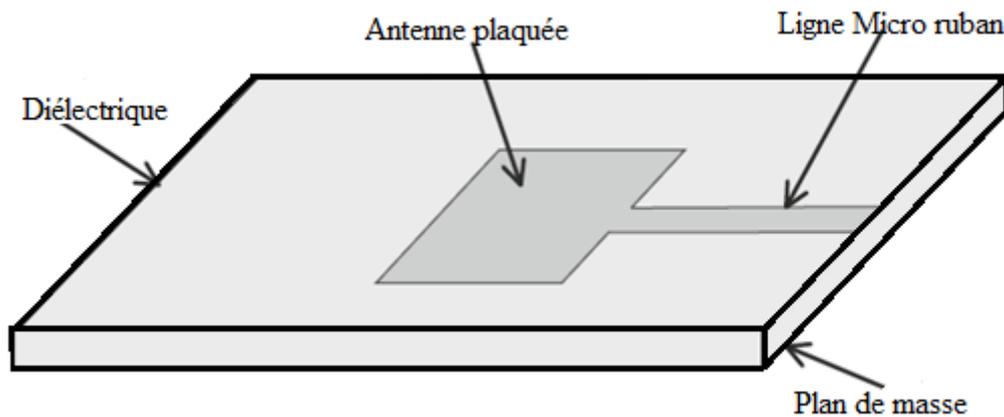


**Figure II.14 :** Antenne à réflecteur parabolique.

### II.6.7. Antenne Imprimée :

L'antenne imprimée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique, possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique (Figure II.15). Les courants sont amenés du générateur à l'antenne par une ligne micro ruban.

Elle présente l'avantage du poids sur certaines antennes décrites précédemment. Les gravures des parties métalliques peuvent prendre des formes très variées en fonction des objectifs fixés pour la répartition du rayonnement dans l'espace. Ceci donne une grande souplesse de conception.



**Figure II.15:** Antenne Imprimée.

## II.7. Conclusion :

La variété de types des antennes on la grande possibilité de les utilisés dans des nombreuses technologies. Ainsi que ses caractéristiques permis le bon choix de l'antenne étudié.

Dans ce chapitre nous avons dressé un état de l'art sur les antennes : le rôle des antennes, le rayonnement des antennes. Puis on a présenté les différents paramètres des antennes en suite les différents types d'antennes.

Après ce passage, on présente l'antenne imprimé ; qu'on détaillera dans le chapitre suivant.

# Chapitre 3

### III.1. Introduction :

De nos jours, l'industrie des télécommunications porte un grand intérêt à la miniaturisation des circuits et composants électroniques. En ce qui concerne les objets communicants, cet effort se concentre notamment sur l'antenne qui est généralement l'un des éléments les plus encombrants du système. Les terminaux actuels doivent ainsi être capables de fonctionner dans les bandes traditionnelles utilisées en téléphonie mobile (GSM 850- 900, DCS1800, PCS1900.....)

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.

Le concept **d'antennes imprimées** est apparu dans les années 1950, mais il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître les premières réalisations qui seront essentiellement réservées à des applications militaires, et les années 1990 pour un véritable passage au stade industriel.

Deux atouts majeurs vont entraîner un développement très important de ce type d'antenne : leur faible coût de réalisation, et leur capacité d'intégration. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs électroniques et constituent le type d'antenne privilégié aux fréquences microondes dans les systèmes de communication intégrés modernes.

### III.2. Historique [19, 20, 21,22] :

L'idée d'un élément rayonnant à **micro ruban** date de 1950 et le concept a été proposé par **Deschamps** à l'USA. Quelques années plus tard **Gutton** et **Baissinot** ont breveté une antenne basée sur micro ruban. A cause du manque de bons substrats la recherche a stagné pour une période de 15 ans. Le besoin d'une antenne mince pour l'industrie militaire et spatiale a réanimé le développement des antennes imprimées au début des années 1970. La structure planaire qui est constituée d'une plaque conduc-

trice gravée sur un substrat diélectrique qui repose sur un plan de masse a été décrite par **Byron**. Un peu plus tard **Munson** a réalisé la première antenne microbande. En 1979 un colloque sur les antennes tenu au Mexique lance un intérêt international pour les antennes micro rubans. Plusieurs articles ont été présentés dans cette réunion puis apparus dans une édition spéciale des transactions d'**IEEE** sur les antennes et la propagation. Un des premiers livres qui définit les caractéristiques des antennes microbandes, et qui est toujours une référence standard, a été écrit par **Bahl** et **Bhartia**. Depuis, plusieurs travaux sont apparus montrant la polyvalence en terme de géométries possibles ce qui les rend applicables dans différentes situations.

### **III.3. Choix de la technologie des antennes imprimées [23, 24, 25] :**

Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison de la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration.

Parmi les avantages de cette technologie d'antennes, on peut citer : le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes. Ajoutons que la simplicité de leurs structures fait que ce type d'antenne est adapté au faible coût de fabrication. Ceci est une propriété clé qui explique l'introduction des antennes imprimées dans les applications de la communication mobile.

D'une façon générale, les avantages des antennes imprimées sont:

- Simples.
- Robustes.
- non encombrantes.
- adaptées aux surfaces planes et non planes.
- à faible coût.

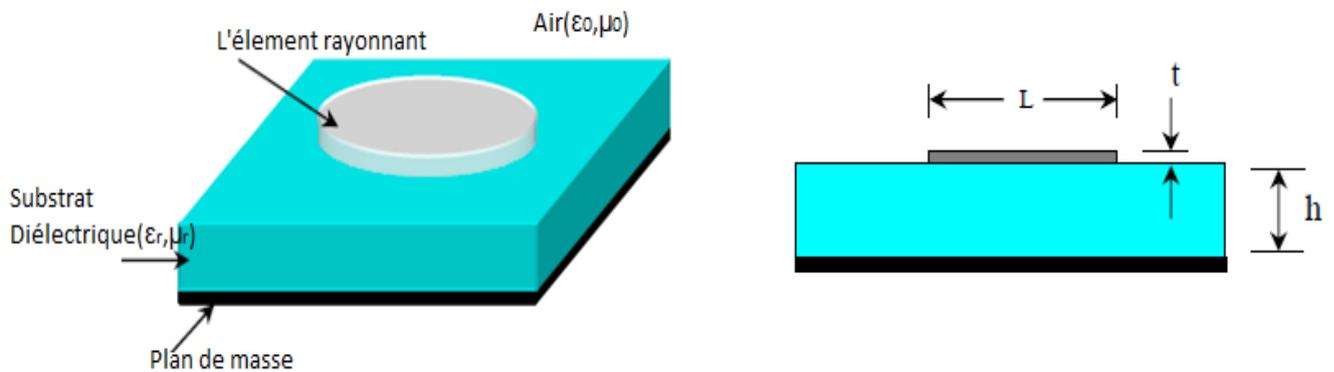
Cependant, elle présente les inconvénients suivants:

- faible efficacité.
- faible puissance.
- impureté de la polarisation.
- bande relativement étroite.

Donc, la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performances et de complexité de réalisation.

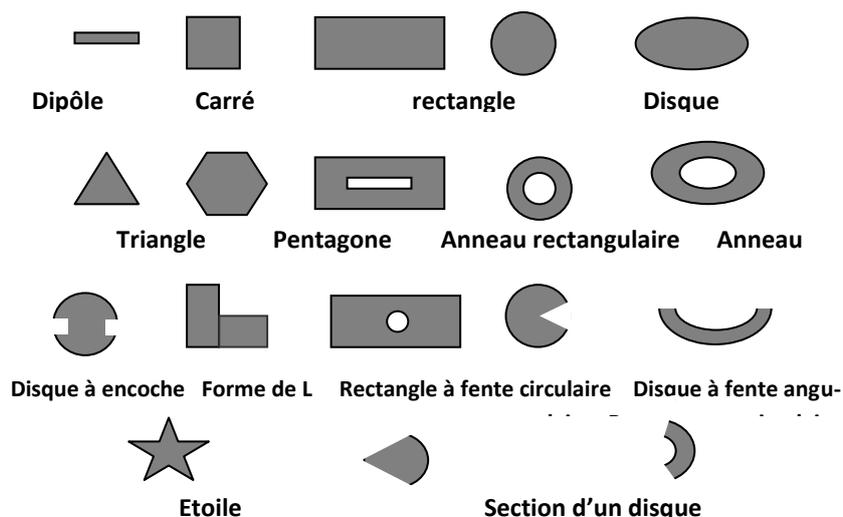
### III.4. Description de l'antenne imprimée [23, 26, 27] :

Dans sa structure de base (Figure III.1), une antenne imprimée est constituée d'un conducteur métallique de forme arbitraire soit de forme carré, rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique, ou une autre forme comme le montre la figure (III.2), déposé sur un substrat diélectrique au-dessus d'un plan de masse. Généralement, pour une structure rectangulaire, la longueur « L » de la pastille est de  $0,3333 \lambda_0 < L < 0,5 \lambda_0$  ou  $\lambda_0$  est la longueur d'onde en espace libre. Le patch est sélectionné pour être très mince de telle sorte que  $t \ll \lambda_0$  (ou t est l'épaisseur patch). La hauteur « h » du substrat diélectrique est généralement  $0,003 \lambda_0 \leq h \leq 0,05 \lambda_0$ . La constante diélectrique du substrat «  $\epsilon_r$  » est typiquement dans la gamme  $1 \leq \epsilon_r \leq 12$ .



**Figure III.1** : Présentation d'une antenne imprimée.

Les différents types d'antenne plaquée « Patch », sont présentés dans la figure (III.2) :



**Figure III.2** : Principales formes des antennes patches.

### **III.4.1. Substrats [24, 28, 29] :**

Dans la pratique, les formes des éléments rayonnants les plus souvent utilisées sont le carré, le rectangle, le disque et l'anneau. Des géométries plus élaborées sont toutefois employées pour répondre à des contraintes spécifiques sur l'antenne (en particulier pour générer de la polarisation circulaire).

Les substrats exploités dans la conception des antennes imprimées sont nombreux. Leurs permittivités relatives varient de 1 à 12.

Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques de grande épaisseur et de basse permittivité dans le but d'avoir une grande efficacité, une large bande passante. Mais dans ce cas la perte par onde de surface augmente et l'antenne devient de plus en plus encombrante.

Au contraire, l'utilisation de minces substrats de permittivités élevées est conseillée pour les circuits micro-ondes parce qu'elle minimise les ondes de surfaces, les radiations non désirées et le volume de l'antenne. Toutefois, l'efficacité et la bande passante diminuent à cause de la grande perte dans le substrat.

### **III.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.

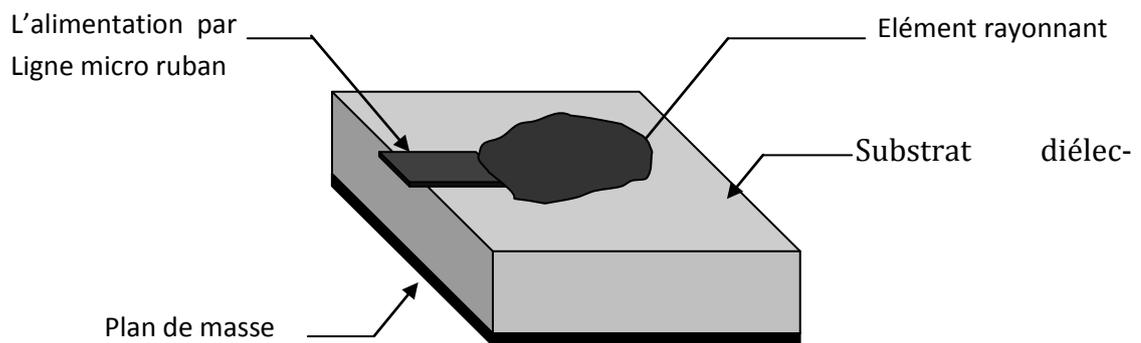
Les méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être classées en deux catégories :

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

#### **III.5.1. Alimentation directe par une ligne micro ruban [31, 38, 39] :**

Dans ce type d'alimentation (figure III.3), 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.



**Figure III.3** : Alimentation par ligne micro ruban.

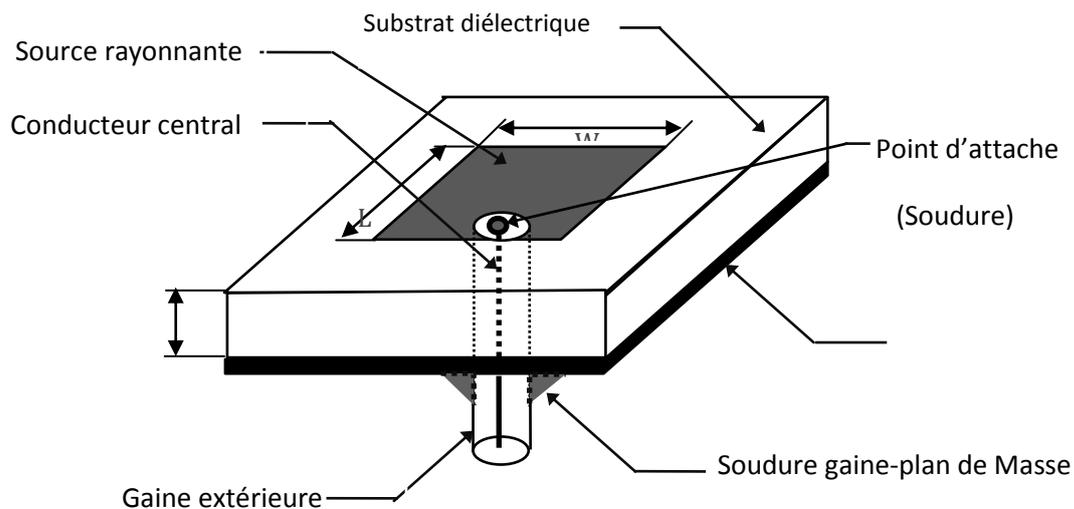
Le but de l'encart coupé dans le patch est d'adapter l'impédance de la ligne d'alimentation au patch sans avoir besoin d'un élément d'adaptation additionnel. Ceci est achevé par un contrôle correct de la position de l'encart. Par conséquent c'est une technique d'alimentation facile, puisqu'elle fournit la facilité de fabrication et la simplicité de modélisation, ainsi que l'adaptation d'impédance. Cependant, certains de ces applications nécessitent un substrat épais, ce qui engendrent l'augmentation des ondes de surface et de rayonnement parasite, entraînant une dégradation de la bande passante.

### III.5.2. Alimentation par câble coaxiale :

L'alimentation coaxiale ou l'alimentation de sonde est une technique très utilisée pour alimenter les antennes micro rubans (figure III.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 [40].

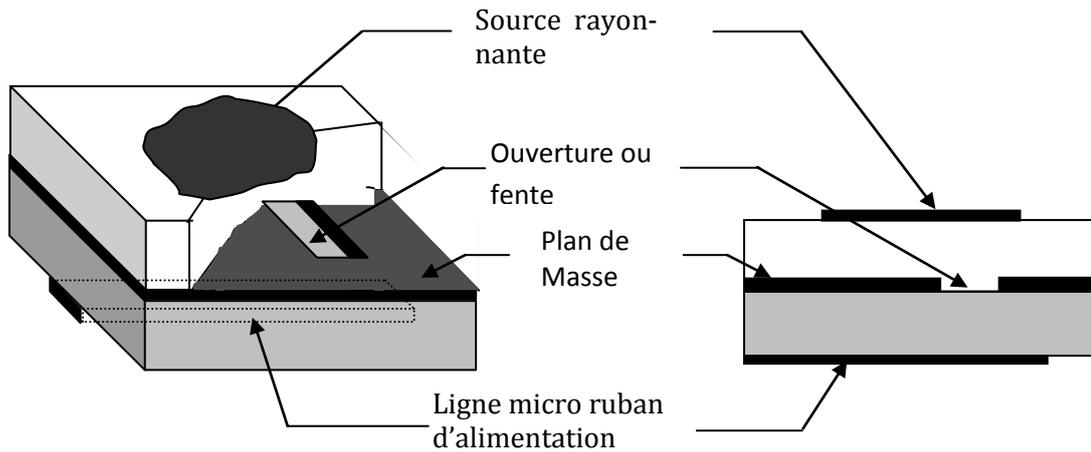


**Figure III.4** : Alimentation par câble coaxiale ou sonde.

### III.5.3. Alimentation couplée par ouverture :

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme indique sur la (figure III.5). La jonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse [31]. Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch.

Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre l'élargissement de bande passante.



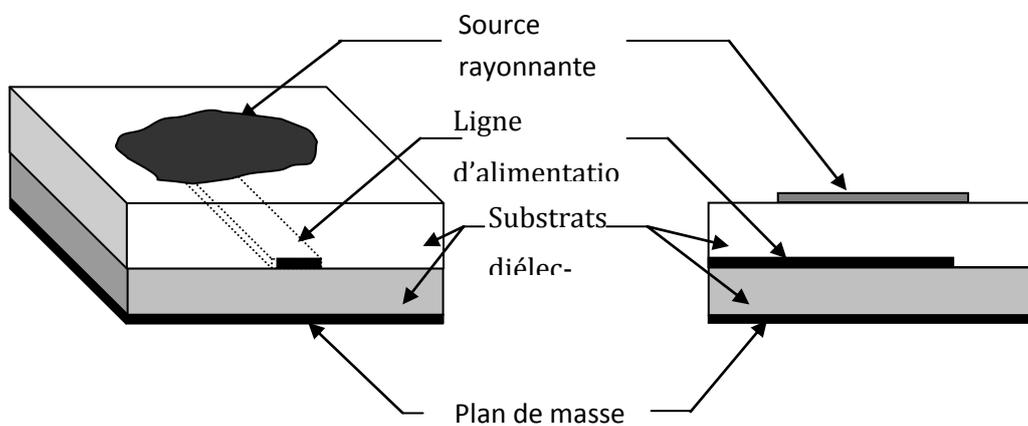
**Figure III.5** : Alimentation couplée par ouverture.

#### III.5.4. Alimentation Couplée Par Proximité :

Ce type d'alimentation est représenté sur la (figure III.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 faux rayonnement 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 III.6** : Alimentation couplée par proximité.

Le tableau III.1 récapitule ci-dessous les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation.

Caractéristique	Alimentation par Ligne micro ruban	Alimentation Coaxiale	Alimentation Couplée par Ouverture	Alimentation 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 Réalise avec Adaptation D'impédance	2-5%	1. 2-5%	2-5%	13%

**Tableau III.1** : Comparaison entre les différentes techniques d'alimentation [30].

**III.6. Mécanisme de Base et Caractéristiques Electriques [31] :**

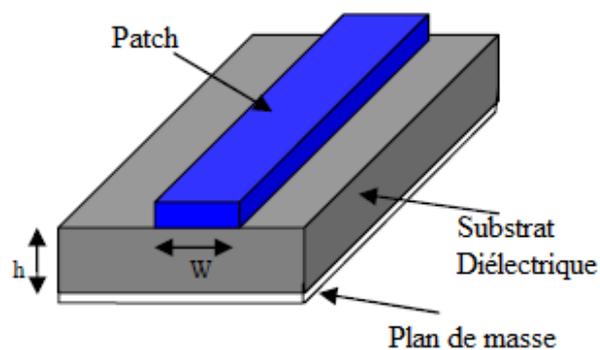
Les modèles les plus populaires pour l'analyse des antennes imprimées micro ruban sont **le modèle de ligne de transmission, le modèle de cavité et modèle Full-Wave** (qui incluent principalement des équations intégrales et la méthode des moments). Le modèle de ligne de transmission est le plus simple, donnant la bonne analyse physique

mais avec moins de précision, Le modèle de cavité est plus exact et donne une bonne analyse physique. Le modèle Full -Wave est extrêmement précis, il peut traiter des éléments simples, des gammes finies et infinies, des éléments en forme arbitraire, ceux-ci donnent moins d'analyse par rapport aux deux modèles mentionnés au-dessus et sont bien plus complexes dans la nature.

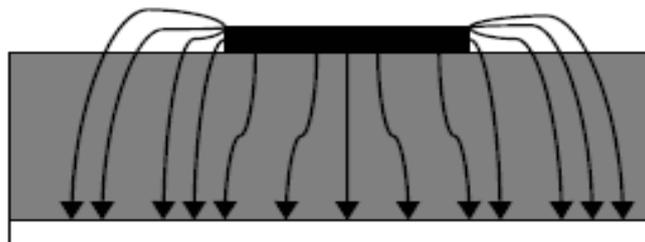
### III.6.1. Modèle de ligne de transmission :

Ce modèle (figure III.7) représente l'antenne plaquée (patch) par deux fentes de largeur «  $W$  » et de hauteur «  $h$  » séparée par une ligne de transmission de longueur «  $L$  ».

Le micro ruban est essentiellement une ligne non homogène de deux électrique généralement le substrat et l'air.



**Figure III.7** : Ligne Micro ruban.



**Figure III.8** : Lignes de champ électrique.

À partir du schéma (figure III.8) on voit que, la plupart des lignes de champ électrique résident dans le substrat et dans quelque partie de l'aire.

Par la suite, cette ligne de transmission ne peut pas soutenir le mode de transmission **TEM** (TEM: transverse –électrique-magnétique) étant donnée que les vitesses de phase seraient différentes dans l'air et le substrat.

Au lieu de cela le mode de propagation dominant serait le mode quasi-TEM. Par conséquent une constante diélectrique efficace ( $\epsilon_{\text{reff}}$ ) doit être obtenue afin d'expliquer la propagation des ondes frangeantes dans la ligne.

La valeur de ( $\epsilon_{\text{reff}}$ ) est légèrement inférieure de ( $\epsilon_r$ ) par ce que les champs frangeant (marginiaux) autour de la périphérie de l'élément rayonnant (patch) ne sont pas confinés dans le substrat diélectrique mais sont aussi étendus dans l'aire comme montré dans le schéma (figure III.8) ci – dessus.

L'expression de  $\epsilon_{\text{reff}}$  est donnée par Balanis [32] comme :

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (\text{III. 1})$$

Ou :

$\epsilon_{\text{reff}}$  = constante diélectrique efficace.

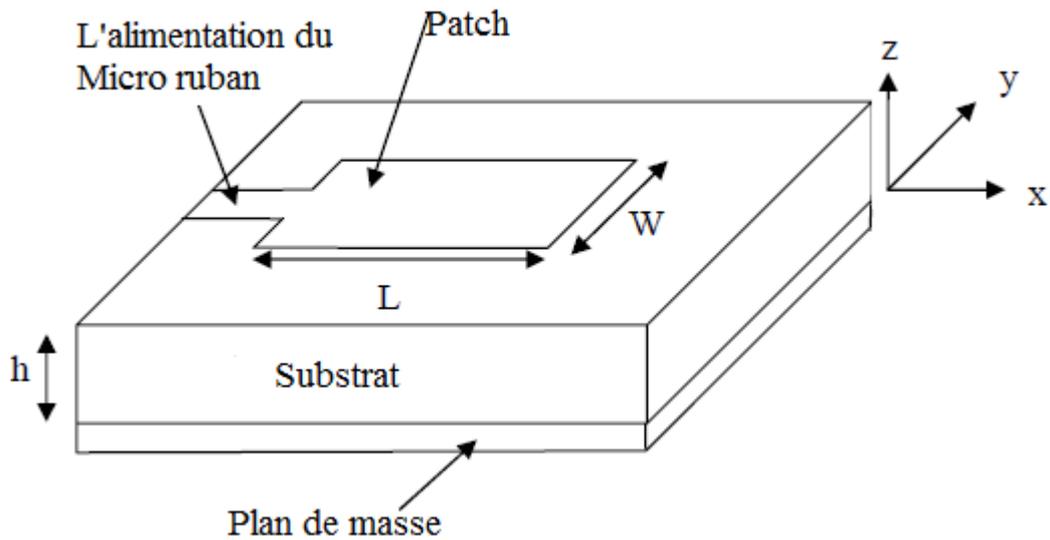
$\epsilon_r$  = constante diélectrique du substrat.

h = hauteur du substrat diélectrique.

W = Largeur du patch.

Considérant la figure (III.9) ci-dessous, qui montre une antenne rectangulaire patch de longueur « L », de largeur « W » reposant sur un substrat de hauteur « h ».

L'axe de coordonnées est choisi de telle sorte que la longueur est dans la direction X, la largeur est dans la direction Y et la hauteur est dans la direction Z.



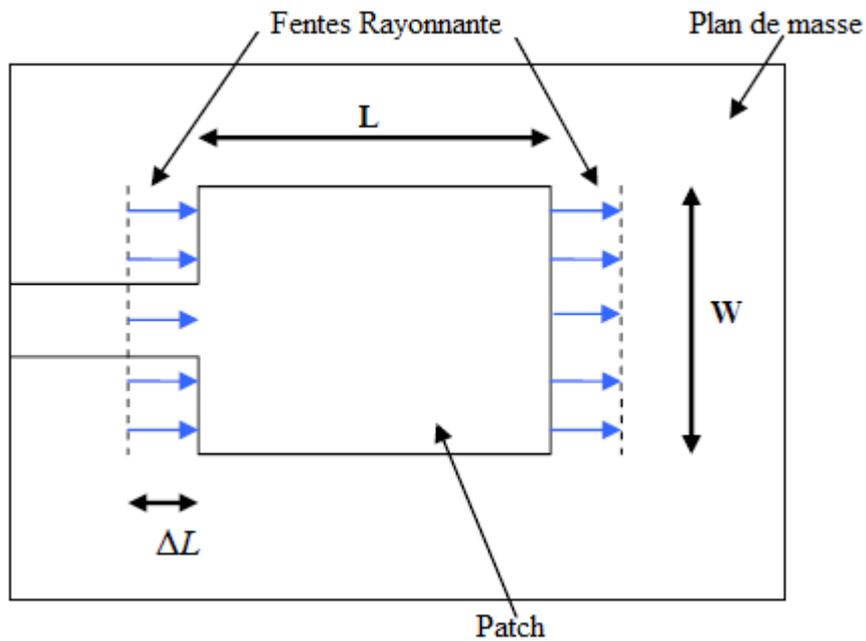
**Figure III.9** : Antenne plaquée « patch ».

Afin de faire fonctionner en mode fondamental  $TM_{10}$ , la longueur du patch doit être légèrement inférieure à  $\lambda/2$  ou  $\lambda$  est la longueur d'onde dans le milieu diélectrique qui est égal à

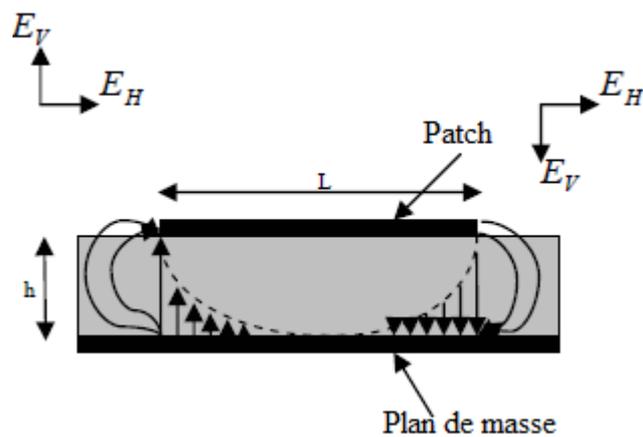
$$\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \quad (III.2)$$

Où ;  $\lambda_0$  est la longueur d'onde d'espace libre.

Le mode  $TM_{10}$  implique que le champ varie au moins de  $\frac{1}{2} \lambda$  le long de la longueur et il n'y a aucune variation sur toute la largeur du patch. Dans le schéma (figure III.10) montrées ci-dessous, l'antenne Micro ruban (patch) est représentée par deux fentes séparées par une ligne de transmission de longueur  $L$  et en circuit ouvert aux deux autres extrémités. Toute au long de la largeur du patch, la tension est maximal et le courant est minimal qui sont due aux extrémités ouvertes. Les champs aux bords peuvent être résolus en composantes normale et tangentielle par rapport au plan de masse.



**Figure III.10** : Vue du haut de l'antenne.



**Figure III.11** : Vue latérale de l'antenne.

Comme il est montré sur la figure (III.11) les composantes normales du champ électrique aux deux extrémités sur toute la largeur sont dans des directions opposées et donc sont déphasés puisque le patch est de  $\lambda/2$  de longueur et donc qu'ils s'annulent l'un de l'autre dans les extrémités. Les composantes tangentielle (voir la Figure III.11) sont en phase, signifie que les champs résultants se combinent pour donner le maximum de champ normal rayonné à la surface de la structure.

D'où, sur toute la largeur, les extrémités peuvent être représentée par deux fentes rayonnantes, qui sont en phase d'une  $\frac{1}{2}$  longueur d'onde ( $\lambda/2$ ) et rayonnant dans le demi-espace au dessus du plan de masse. Alors électriquement le patch de l'antenne micro ruban apparaisse plus grand que ses dimensions physiques. Les dimensions du patch sur toute sa longueur ont maintenant été étendues a chaque extrémité par une distance  $\Delta L$  qui est donné empiriquement par HAMMERSTAD [33] comme :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff}) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (III.3)$$

La longueur effective du patch  $L_{eff}$  devient maintenant :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (III.4)$$

Pour une fréquence de résonance  $f_0$ , la longueur effective est donnée par [34] :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (III.5)$$

Pour une antenne rectangulaire micro ruban, la fréquence de résonance pour tout mode  $TM_{mn}$  est donnée par JAMES et HALL comme [35] :

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} [(m/L)^2 + (n/W)^2]^{1/2} \quad (III.6)$$

Ou ; M et N sont respectivement les modes suivant L et W.

Pour un rayonnement efficace, la largeur est donnée par BAHAL et BHARTIA comme [22] :

$$W = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{(\epsilon_r+1)}{2}}} \quad (III.7)$$

### III.6.2. Modèle de cavité :

Bien que le modèle de ligne de transmission discuté dans la section précédente est facile à utiliser ; il présente certains inconvénients inhérents. Plus précisément il est

utile pour les patches de forme rectangulaire et il ne tient pas compte des variations des champs rayonnant sur toutes les extrémités.

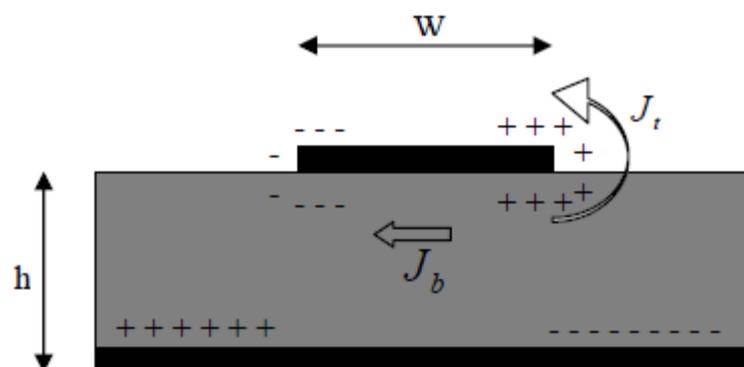
Ces inconvénients peuvent être surmontés en utilisant le modèle de cavité. Un bref aperçu de ce modèle est donné ci-dessous.

Dans ce modèle, la région intérieure du substrat diélectrique est modélisée comme une cavité délimitée par deux parois électriques sur la partie supérieure et inférieure. La base de cette hypothèse pour des substrats minces ( $h \ll \lambda$ ) [31] ont les observations suivantes :

- ✓ puisque le substrat est mince, les champs dans la région intérieure ne varient pas beaucoup dans la direction Z, c'est-à-dire normale au patch.

- ✓ Le champ électrique est destiné seulement dans la direction Z, et le champ magnétique a seulement les composantes transversales  $H_x$  et  $H_y$  dans la région limitée par la métallisation du patch et le plan de masse.

Cette observation prévoit des parois électriques dans la partie supérieure et inférieure.



**Figure III.12** : Distribution de charge et la création d'une densité de courant sur le patch micro ruban.

Considérons la figure (III.12) ci-dessus, quand on alimente l'élément rayonnant **micro ruban**, on voit une distribution de charge sur les surfaces supérieures et inférieures du patch et à la partie inférieure du plan de masse. Cette distribution de charge est con-

trôlée par deux mécanismes : un mécanisme attractif et un mécanisme répulsif comme nous le verront par RICHARDS [36].

✓ Le mécanisme attractif est compris entre les charges opposées sur la face inférieure du patch et le plan de masse, qui aide à maintenir la concentration de charge intacte au dessus du patch.

✓ le mécanisme de répulsion est compris entre les charges identiques sur la surface inférieure du patch, ce qui provoque le fait de pousser quelque charge du bas au sommet du patch.

En conséquent de ce mouvement de charge, les courants circulent sur la surface supérieure et inférieure du patch. Le modèle de cavité suppose que le rapport hauteur sur largeur (c'est-à-dire la hauteur du substrat sur la largeur du patch) est très petit. Et suite à ceci le mécanisme attractif domine et provoque plus de concentration de charge et le courant doit être inférieur sur la surface du patch. Plus que le courant qui passe sur la surface supérieur du patch est petit et comme le rapport hauteur sur largeur est diminué donc le courant sur la surface supérieur du patch est presque égale à zéro. Ce qui ne permet pas la création d'aucunes composantes tangentielles des champs magnétiques aux bords du patch. Par conséquent, les quatre parois latérales peuvent être modélisées comme des surfaces magnétiques électriquement conductrices. Cela implique que les champs magnétiques et la distribution du champ électrique sous le patch ne pourrait pas être modifié.

Pourtant en pratique, un rapport largeur sur hauteur est très petit et cela ne rend pas les champs tangentiels égaux à zéro mais ils sont très petits, les parois latérales peuvent être parfaitement un conducteur magnétique [37].

Etant donné que les parois et le matériel au sein de la cavité sont sans perte, la cavité ne rayonnerait pas et son impédance d'entrée serait purement réactif.

Par conséquent, afin de tenir compte du rayonnement et le mécanisme de perte il faut introduire une résistance de rayonnement  $R_r$  et une résistance de perte  $R_L$ .

Une cavité avec perte représente maintenant l'antenne, et la perte est pris en compte par la tangente de perte effective ( $\delta_{eff}$ ) qui est donnée par :

$$\delta_{eff} = 1/Q_r \quad (III.8)$$

$Q_T$  représente le facteur de qualité d'antenne total par [36] sous la forme :

$$1/Q_T = 1/Q_d + 1/Q_c + 1/Q_r \quad (III.9)$$

$Q_d$  représente le facteur de qualité du diélectrique est donné par :

$$Q_d = \frac{\omega_r W_T}{P_d} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (III.10)$$

Ou ;  $\omega_r$  : est la fréquence de résonance angulaire.

$W_T$  : est l'énergie totale emmagasinée dans le patch à la résonance.

$P_d$  : est la perte diélectrique.

$\tan \delta$  : est la tangente de perte du diélectrique.

- $Q_c$  représente le facteur de qualité du conducteur qui est donné par :

$$Q_c = \frac{\omega_r W_T}{P_c} = \frac{h}{\Delta} \quad (III.11)$$

Ou ;  $P_c$  : est la perte di conducteur.

$\Delta$  : est la profondeur de pénétration du conducteur.

$h$  : est la hauteur du substrat.

- $Q_r$  représente le facteur de qualité de rayonnement qui est donnée comme suit :

$$Q_r = \frac{\omega_r W_T}{P_r} \quad (III.12)$$

Ou ;  $P_r$  : est la puissance rayonnée à partir du patch.

En substituant les équations (III.9), (III.10), (III.11) et (III.12) dans l'équation (III.8) nous obtenons :

$$\delta_{eff} = \tan \delta + \frac{\Delta}{h} + \frac{P_r}{\omega_r W_T} \quad (III.13)$$

Ainsi l'équation (III.13) décrit la tangente de perte effective totale de l'antenne micro ruban.

### III.6.3. Méthode des moments :

L'utilisation de la méthode des moments dans les problèmes électromagnétiques a été développée pour la première fois par Newman [41], 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 [42]. 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.

### III.8. Conclusion :

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les réaliser. Alors, pour assurer un bon fonctionnement, il faut choisir celle la plus adaptée à l'application envisagée.

Dans notre cas, le choix s'est porté sur la technologie des antennes imprimées. Leurs avantages nombreux permettent de les utiliser dans différents secteurs et surtout dans les communications mobiles (satellite, avion, voiture, missile, téléphone portable, ...).

Dans ce chapitre nous avons présenté l'antenne Micro ruban appelé en anglais « Patch », un bref aperçu sur son historique, les avantages et quelque inconvénients et on a donné une description de ce élément rayonnant, les différents types d'alimentation ainsi que son mécanisme de base a savoir le modèle de ligne de transmission, le modèle de cavité et modèle double alternance (méthode de moment).

Après cette révision rapide des caractéristiques de base des antennes imprimées, le chapitre suivant va décrire la structure adoptée pour réaliser les antennes demandées qui fonctionne dans le standard PCS 1900 et le standard UMTS, la technique d'élargissement de la bande passante, ainsi que les résultats et les interprétations de simulation obtenus en utilisant le logiciel de simulation ADS.

# Chapitre 4

## IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, la procédure de conception de l'antenne patch rectangulaire avec logiciel (ADS) sera expliquée.

Les paramètres de cette conception seront présentés par : la fréquence de résonance, la constante diélectrique et la hauteur du substrat qui aboutiront ensuite aux calculs des dimensions de l'antenne.

Le passage à la simulation de l'antenne conçue sur logiciel (ADS) est représenté sur deux étapes de simulation, effectuées pour deux antennes ; l'une faite pour le standard (PCS) et l'autre pour le standard (UMTS).

Pour la conception et la simulation des antennes on a utilisé « l'ADS momentum ».

Enfin, une autre étape d'optimisation à laquelle on procède par « l'ADS schématique » est ajoutée pour conclure le travail.

Les interprétations seront données au fur et à mesure que les résultats sont présentés.

## IV.2. Les paramètres essentiels pour la conception d'une antenne patch rectangulaire sont :

- ✚ Fréquence de résonance ( $f_r$ ): Elle doit être choisie de manière appropriée.
  - Le système de communication (PCS) utilise la gamme de fréquences (1850-1990) MHz. Ainsi l'antenne de conception doit être capable de fonctionner dans cette gamme de fréquence. La fréquence de résonance prise est de 1,92 GHz.
  - Le système de communication (UMTS) utilise la gamme de fréquence (1885-2200) MHz ; donc la fréquence de résonance prise est de 2,04 GHz.

- ✚ La constante diélectrique du substrat ( $\epsilon_r$ ) : Le matériau diélectrique sélectionné pour cette conception est du « silicium » ayant une ( $\epsilon_r$ ) égale à 11,9.

Le choix du matériau diélectrique dépend de la constante diélectrique ; plus elle est élevée plus les dimensions de l'antenne sont réduites.

- ✚ La hauteur du substrat diélectrique ( $h$ ): Pour l'antenne patch utilisé dans les téléphones cellulaires, il est essentiel que celle-ci ne soit pas encombrante.

Par conséquent, la hauteur du substrat diélectrique choisie est de 1,5 mm.

### IV.3. Les calculs des paramètres pour la conception d'une antenne patch rectangulaire sont:

Pour la conception d'une antenne patch rectangulaire, il suffit de suivre des étapes de calculs en se basant sur les données des paramètres et les équations appropriés à nos démarches. Ainsi, le but de ces calculs c'est d'avoir la largeur( $W$ ) et la longueur( $L$ ) de notre antenne patch.

Puisque chaque standard a sa propre gamme de fréquence, alors il possède automatiquement sa propre fréquence de travail, donc les dimensions des antennes seront différentes l'une de l'autre d'après le standard utilisé.

#### IV.3.1. Le calcul des paramètres de l'antenne patch rectangulaire pour le standard (PCS):

- **1<sup>ère</sup> étape**: Le calcul de la largeur ( $W$ ) de l'antenne patch est donné par l'équation (III.7)

$$W = \frac{C}{2f_r \frac{\sqrt{\epsilon_r + 1}}{2}}$$

Avec:  $C = 3.10^8$  m/s,  $(\epsilon_r) = 11.9$  et  $(f_r) = 1.92$  GHz

$$W = 31 \text{ mm}$$

- **2<sup>ème</sup> étape**: Le Calcul de la constante diélectrique effective ( $\epsilon_{reff}$ ) est donné par L'équation (III.1)

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}$$

Avec:  $(\epsilon_r) = 11.9$ ,  $W = 31 \text{ mm}$  et  $h = 1.5 \text{ mm}$

$$\epsilon_{reff} = 10.785$$

- **3<sup>ème</sup> étape:** Le calcul de la longueur effective ( $L_{eff}$ ) est donné par l'équation(III.5)

$$L_{eff} = \frac{C}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

Avec:  $C = 3.10^8 \text{ m/s}$ ,  $(\epsilon_{reff}) = 10.785$  et  $(f_r) = 1.92 \text{ GHz}$

$$L_{eff} = 23.79 \text{ mm}$$

- **4<sup>ème</sup> étape:** Le calcul de l'extension de la longueur ( $\Delta L$ ) est donné par l'équation (III.3)

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_{reff} - 0.258)(W/h + 0.8)}$$

Avec:  $W = 31 \text{ mm}$ ,  $h = 1.5 \text{ mm}$  et  $(\epsilon_{reff}) = 10.785$

$$\Delta L = 0.789 \text{ mm}$$

- **5<sup>ème</sup> étape:** Le calcul de la longueur ( $L$ ) est donné par l'équation (III.4)

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

Avec:  $L_{eff} = 23.79 \text{ mm}$ ,  $\Delta L = 0.789 \text{ mm}$

$$L = 22 \text{ mm.}$$

#### IV.3.2. Le calcul des paramètres de l'antenne patch pour le standard (UMTS):

- **1<sup>ère</sup> étape** : Le calcul de la largeur ( $W$ ) de l'antenne patch est donné par l'équation (III.7)

$$\text{Avec: } C = 3e8 \text{ m/s, } (\epsilon_r) = 11.9 \text{ et } (f_r) = 2.04\text{GHz}$$

$$\mathbf{W = 28.65 \text{ mm}}$$

- **2<sup>ème</sup> étape** : Le Calcul de la constante diélectrique effective ( $\epsilon_{reff}$ ) est donné par L'équation (III.1)

$$\text{Avec: } (\epsilon_r) = 11.9, W = \text{ mm et } h = 1.5 \text{ mm}$$

$$\mathbf{\epsilon_{reff} = 10.728}$$

- **3<sup>ème</sup> étape**: Le calcul de la longueur effective ( $L_{eff}$ ) est donné par l'équation (III.5)

$$\text{Avec: } C = 3e8 \text{ m/s, } (\epsilon_{reff}) = 10.728 \text{ et } (f_r) = 2.04 \text{ GHz}$$

$$\mathbf{L_{eff} = 22 \text{ mm}}$$

- **4<sup>ème</sup> étape**: Le calcul de la longueur ( $\Delta L$ ) est donné par l'équation (III.3)

$$\text{Avec: } W = 28.65 \text{ mm et } h = 1.5 \text{ mm et } (\epsilon_{reff}) = 10.728$$

$$\mathbf{\Delta L = 0.70 \text{ mm}}$$

- **5<sup>ème</sup> étape**: Le calcul de la longueur ( $L$ ) est donné par l'équation (III.4)

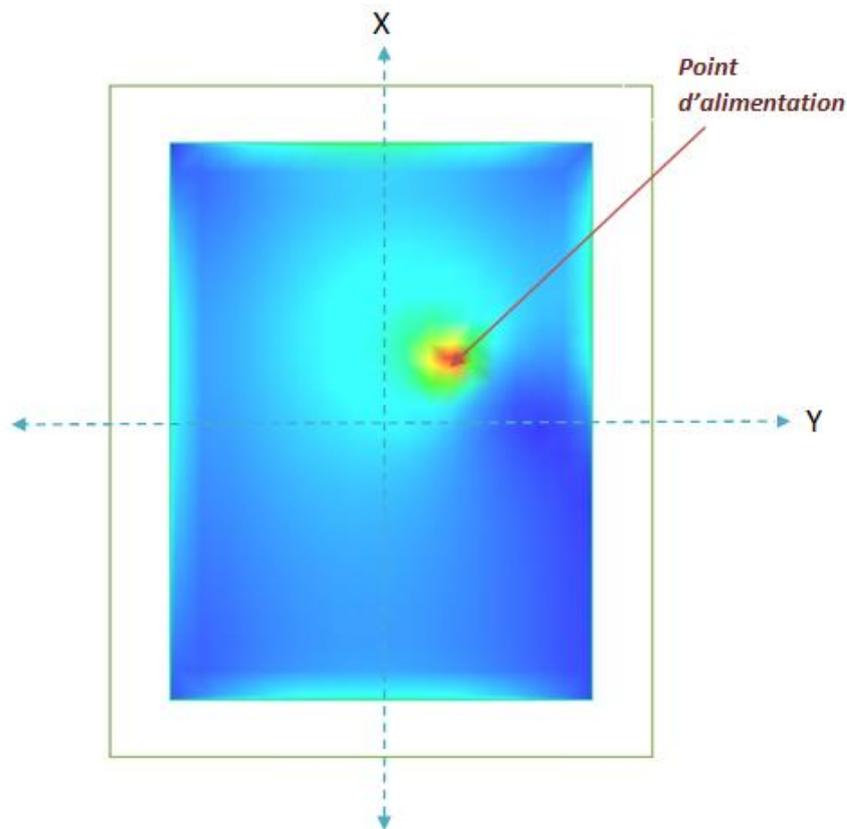
$$\text{Avec: } L_{eff} = 22 \text{ mm, } \Delta L = 0.70 \text{ mm}$$

$$\mathbf{L = 20.6 \text{ mm}}$$

#### IV.4. La détermination du point d'alimentation :

Une fois que les dimensions de l'antenne patch rectangulaire sont calculées, on passe alors à la conception de celle-ci. Dès que l'antenne est dessinée dans le logiciel de simulation (ADS), il faudra déterminer le point d'alimentation.

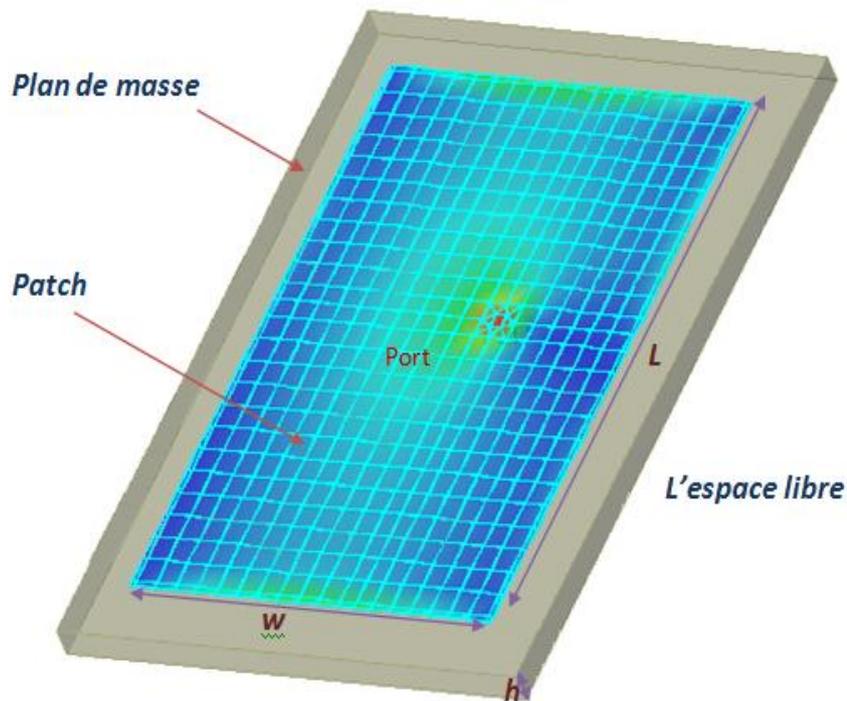
De type coaxial, le point d'alimentation est déterminé de façon à ce que, son emplacement est défini par les coordonnées  $(x, y)$  à partir de l'origine qui est pris, dans notre cas, au centre du patch comme le montre (la figure VI.1).



**Figure IV .1:** Point d'alimentation indiqué par les coordonnées  $(x, y)$ .

#### **IV.5. La conception de l'antenne patch :**

La conception de l'antenne patch rectangulaire, s'effectue suivant les résultats des dimensions trouvées et la détermination du point d'alimentation. (La figure IV.2) ci-dessous représente l'antenne conçue.



**Figure IV.2** : Antenne patch rectangulaire en 3D.

#### IV.6. La simulation de l'antenne patch rectangulaire et les résultats trouvés :

Après modélisation de notre structure d'antenne patch, se basant sur les formules analytiques, le travail qui suit consiste à simuler l'antenne avec différents points d'alimentation et trouver le point d'alimentation optimal.

On dit point optimal, s'il correspond à la fréquence de résonance spécifique au standard qui est présentée en théorie, sachant que cette fréquence de résonance est prise pour le coefficient de réflexion le plus petit :  $[S(1,1)]_{F_r}$  est minimal].

Une fois que le point d'alimentation optimal est trouvé, il faudra déterminer la bande passante correspondante en utilisant la formule suivante :

$$BP = F_{\max} - F_{\min} \quad (IV.1)$$

## IV.7. Simulation et Résultats de l'antenne patch conçue pour Le standard (PCS):

L'antenne patch rectangulaire conçue pour le standard (PCS) a pour dimensions :

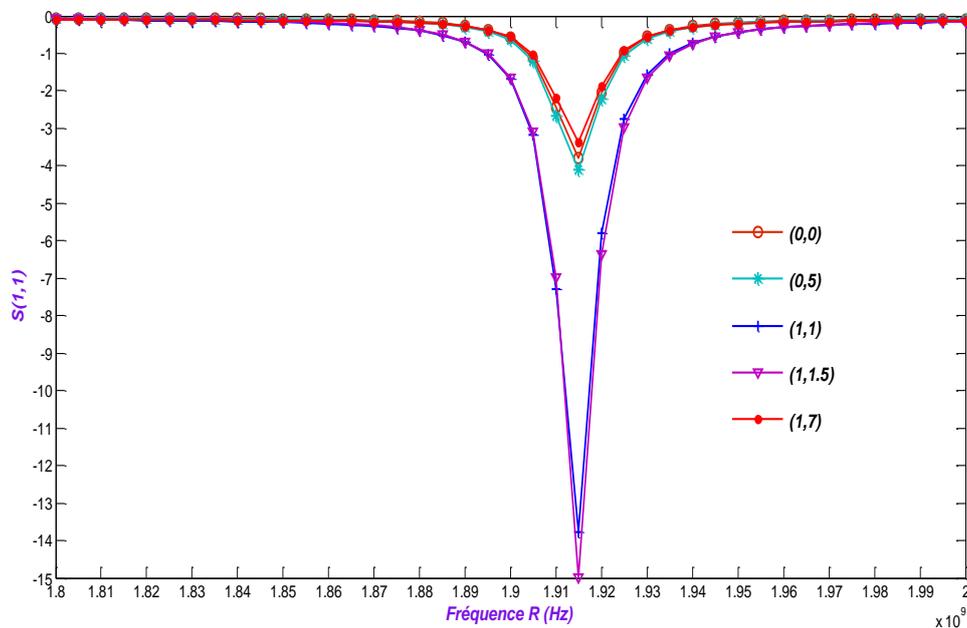
$W=31$  mm,  $L=22$  mm,  $h =1.5$  mm

Après simulation de cette antenne, les résultats sont présentés sous forme de graphes et tableaux, obtenus après variation du point d'alimentation sur toute la surface du patch depuis l'origine.

Cette variation a suivi une méthode choisie, fixant le coordonné (x) sur une valeur quelconque en variant (y) puis, fixant le coordonné (y) sur une valeur précise en variant (x).

La valeur de (y) fixée est choisie d'après les résultats trouvés précédemment et qui ont donné la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion adéquats.

### IV.7.1. Les résultats obtenus pour (x) fixe et leurs interprétations:



**Figure IV.3** : coefficient de réflexion pour (x) fixe.

X=0

Y	F <sub>r</sub> (GHz)	S (1,1) F <sub>r</sub>
0	1.915	- 3.78
5	1.915	-4.11

X=1:

Y	F <sub>r</sub> (GHz)	S (1,1) F <sub>r</sub>
1	1.915	-14.50
1.5	1.915	-14.98
7	1.915	-3.55

**Tableaux IV.1** : Les valeurs de S(1,1) pour(x=0) et (x=1)

➤ **Interprétations des résultats :**

Après les simulations de l'antenne patch conçue pour le standard (PCS) avec différents points d'alimentations (x,y), on a déposé les courbes qui résument tous les résultats des simulations faites.

D'abord, on remarque que la fréquence de résonance est fixée à **(1.915 GHz)** pour toutes les courbes, ainsi nos paramètres théoriques sont justifiés.

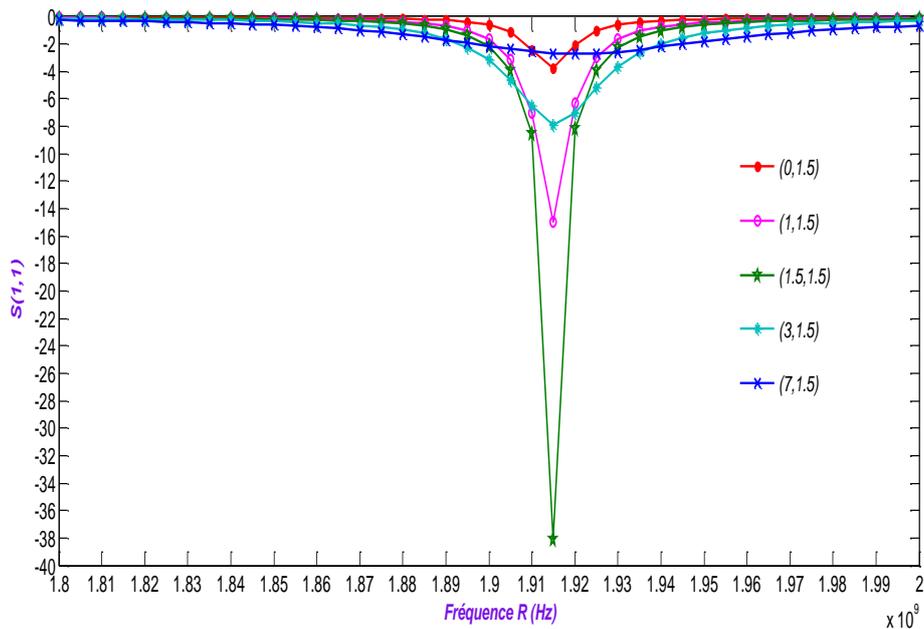
En fixant (x) sur deux valeurs différentes et (y) sur d'autres quelconques, on déduit que les coefficients de réflexion S(1,1)F<sub>r</sub> sont largement supérieurs à (-9.54dB) pour les points : (0,0), (0,5) et(1,7) ; donc la bande passante est égale à (0). On remarque que les points d'alimentation à l'origine donnent de mauvaises valeurs du coefficient de réflexion.

Pour les autres points (1.1) et (1,1.5) les coefficients de réflexions à la fréquence de résonance sont (-14.50 dB) et (-14.98 dB) respectivement. Ces valeurs sont inférieures à (-9.54dB) ; donc la bande passante peut être calculée.

La bande passante est calculée à partir de la formule (IV.1) à condition que le S(1,1)F<sub>r</sub> soit inférieur au coefficient (S(1,1)=-9.54) qui correspond au (VSWR=2), Comme c'est décrit dans le **chapitre II**.

Donc on prend la valeur de (y=1.5) puisque son point donne le résultat du coefficient de réflexion le plus petit ; il est distingué des courbes de la figure (IV.7.a).

#### IV.7.2. Les résultats obtenus pour (y) fixe et leurs interprétations :



**Figure IV.4 :** coefficient de réflexion pour (y) fixe

X	F <sub>r</sub> (GHz)	S (1,1) F <sub>r</sub>
0	1.915	-3.77
1	1.915	-14.94
1.5	1.915	-38.40
3	1.915	-7.88
7	1.915	-2.72

**Tableau IV.2 :** Les valeurs de S(1,1) pour (y=1.5)

##### ➤ Interprétations des résultats :

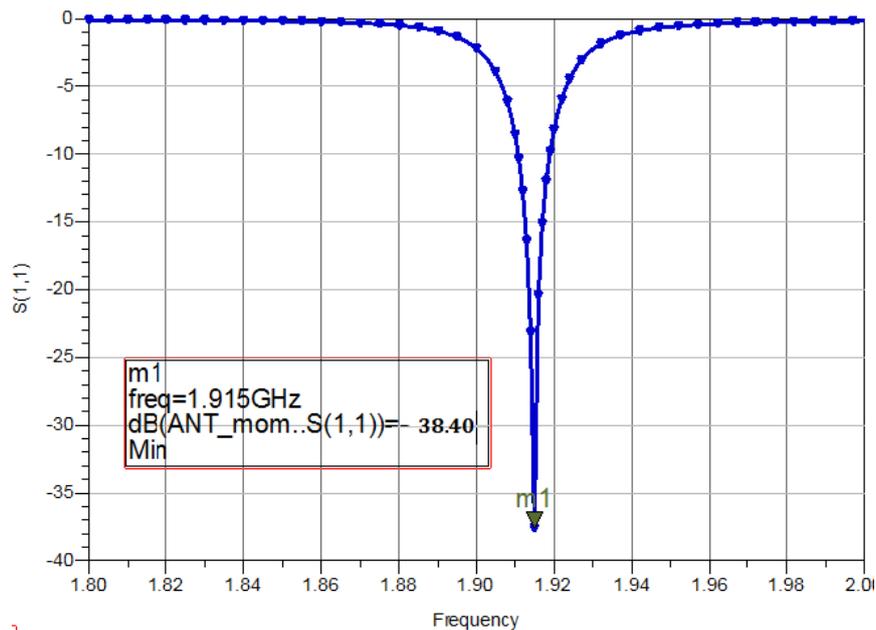
D'après les résultats trouvés précédemment, on a fixé (y) sur une valeur précise de (1.5) et on a varié (x).

Les résultats obtenus présentés dans le tableau (IV.7.b) montrent l'existence d'une valeur de (x) donnant le point d'alimentation optimale (x,y) = (1.5,1.5), d'où sa fréquence de résonance au coefficient de réflexion le plus petit est (F<sub>r</sub> = 1.915 GHz), et son coefficient de réflexion minimal est S(1,1)F<sub>r</sub> = -38.40dB.

Comme on remarque dans la figure (IV.7.b), la courbe qui représente le point optimal déduit, possède un coefficient de réflexion minimal, donc elle est distincte par rapport aux autres courbes.

Le calcul de la bande passante correspondant au point optimal s'effectue par la formule (IV.1).

### IV.7.3. Le résultat de simulation de l'antenne patch au point optimal (1.5, 1.5) :



**Figure IV.5 :** Le coefficient de réflexion du point d'alimentation optimal.

• **Le calcul de la bande passante :**

$$BP = F_{max} - F_{min}$$

$$BP = 1.919 - 1.910$$

$$BP = 9 \cdot 10^{-3} \text{GHz} = 9 \text{MHz}$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{min} = 1.910 \text{ GHz} \\ F_{max} = 1.919 \text{ GHz} \end{array} \right.$$

La bande passante calculée qui est à 9MHz est très petite par rapport à la bande passante du PCS (1850-1990) qui est à 140 MHz, alors il faudra l'optimiser.

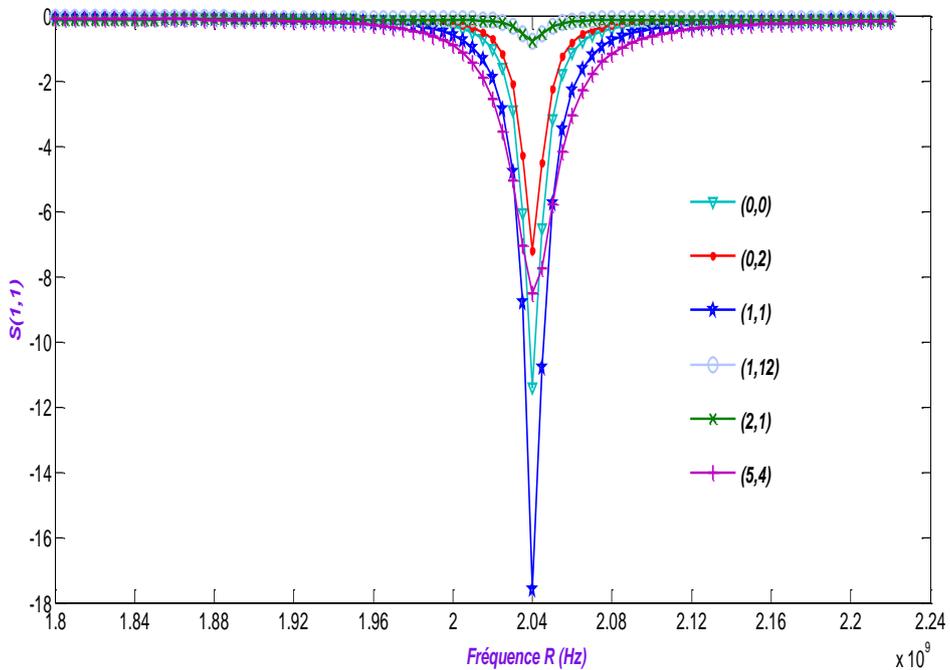
### IV.8. Résultats de simulation de l'antenne patch pour le standard (UMTS) :

L'antenne patch rectangulaire conçue pour le standard (UMTS) a pour dimensions :

$W=28.65 \text{ mm}$ ,  $L=20.6 \text{ mm}$ ,  $h =1.5 \text{ mm}$

Après simulation de cette antenne les résultats sont présentés sous forme de tableaux et graphes, obtenus après variation du point d'alimentation sur toute la surface du patch depuis l'origine. On prend différents points de nos essais afin de montrer tous les résultats achevés. Puis en deuxième étape, on fixe (y) à une valeur précise trouvée, en variant (x) jusqu'à obtention d'un point (x,y) optimal ayant un  $S_{(1,1)F_r}$  minimal.

**IV.8.1. Les résultats obtenus pour différents points (x,y) et leurs interprétations :**



**Figure IV.6:** Le coefficient de réflexion pour différents points

X	y	F <sub>r</sub> (GHz)	S (1,1) F <sub>r</sub>
0	0	2.04	-11.39
0	2	2.04	-7.21
1	1	2.04	-17.58
1	12	2.04	-0.80
2	1	2.04	-0.87
5	4	2.04	-8.52

**Tableau IV.3 :** Les valeurs de S(1,1)F<sub>r</sub> pour différents points (x,y)

➤ **Interprétations des résultats :**

Après les simulations de l'antenne patch avec différents points d'alimentations  $(x,y)$ , on a déposé les courbes qui résument tout les résultats des simulations déjà faites.

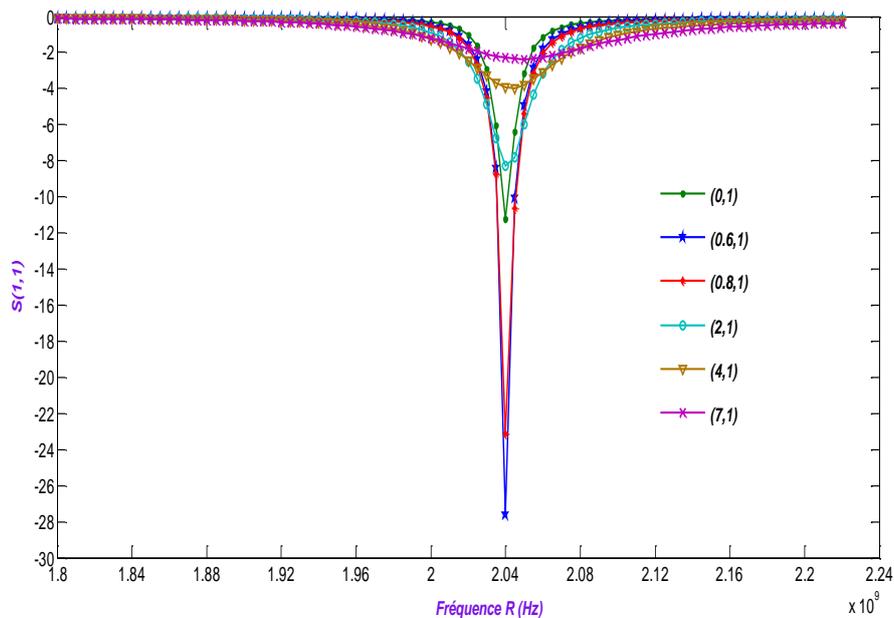
On remarque que la fréquence de résonance est fixée à **(2.04 GHz)** pour toutes les courbes ; donc nos calculs théoriques sont justifiés.

Pour les points  $(0,2)$ ,  $(1,12)$ ,  $(2,1)$  et  $(5,4)$  les coefficients de réflexion à la fréquence de résonance  $S(1,1)_{F_r}$  sont largement supérieurs à  $(-9.54\text{dB})$  ; donc la bande passante est égale à  $(0)$ . Pour les autres points  $(0,0)$  et  $(1,1)$  les coefficients de réflexions à la fréquence de résonance sont  $(-11.39\text{ dB})$  et  $(-17.58\text{ dB})$  respectivement.

Alors, on prend la valeur de  $(y=1)$  puisque son point donne le résultat du coefficient de réflexion le plus petit.

Pour le calcul de la bande passante correspondante au point optimal, on utilise la formule (IV.1).

**IV.8.2. Les résultats obtenus pour (Y) fixe et leurs interprétations:**



**Figure IV.7:** Le coefficient de réflexion pour  $(y)$  fixe.

x	Fr (GHz)	S (1,1) Fr
0	2.04	-11.33
0.6	2.04	-25.57
0.8	2.04	-23.14
2	2.04	-8.31
4	2.04	-3.96
7	2.04	-2.94

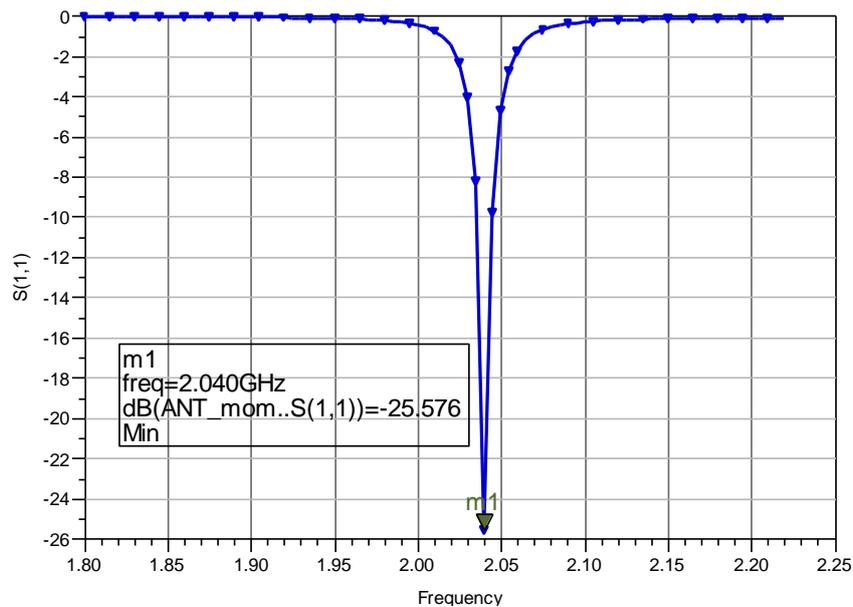
**Tableau IV.4 :** Les valeurs de S(1,1) pour (y=1).

➤ **Interprétations des résultats :**

D'après les résultats trouvés précédemment, on a fixé (y) sur une valeur précise de (1) et on a varié (x).

Les résultats obtenus pour chaque point sont présentés dans la figure (IV.8.b) et le tableau (IV.7.b), montrant l'existence d'une valeur de (x=0.6) donnant le point optimale (x,y) = (0.6, 1), d'où sa fréquence de résonance est ( $F_r = 2.04 \text{ GHz}$ ), et son coefficient de réflexion minimale est ( $S(1,1)_{Fr} = -25.57 \text{ dB}$ ).

**IV.8.3. Le résultat de simulation de l'antenne patch au point optimale (0.6, 1) :**



**Figure IV.8:** Le coefficient de réflexion du point d'alimentation optimal.

- **Le calcul de la bande passante :**

$$BP = F_{max} - F_{min} \quad (IV.1)$$

$$BP = 2.045 - 2.035$$

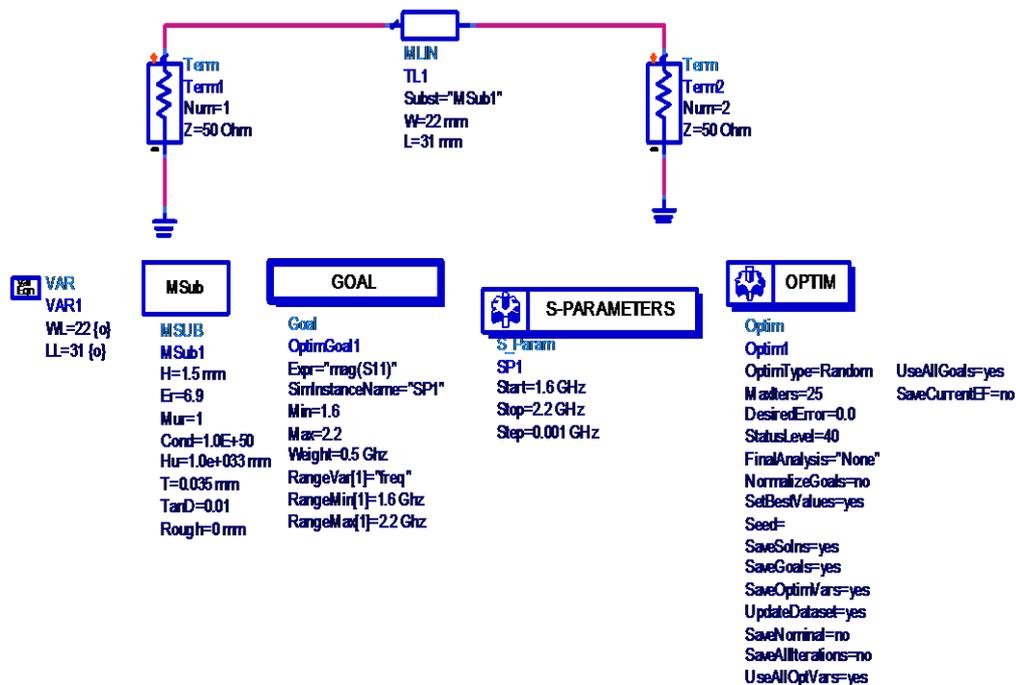
$$BP = 0.01GHz = 10 MHz$$

Avec  $\left\{ \begin{array}{l} F_{min}=2.035 GHz \\ F_{max}= 2.045 GHz \end{array} \right.$

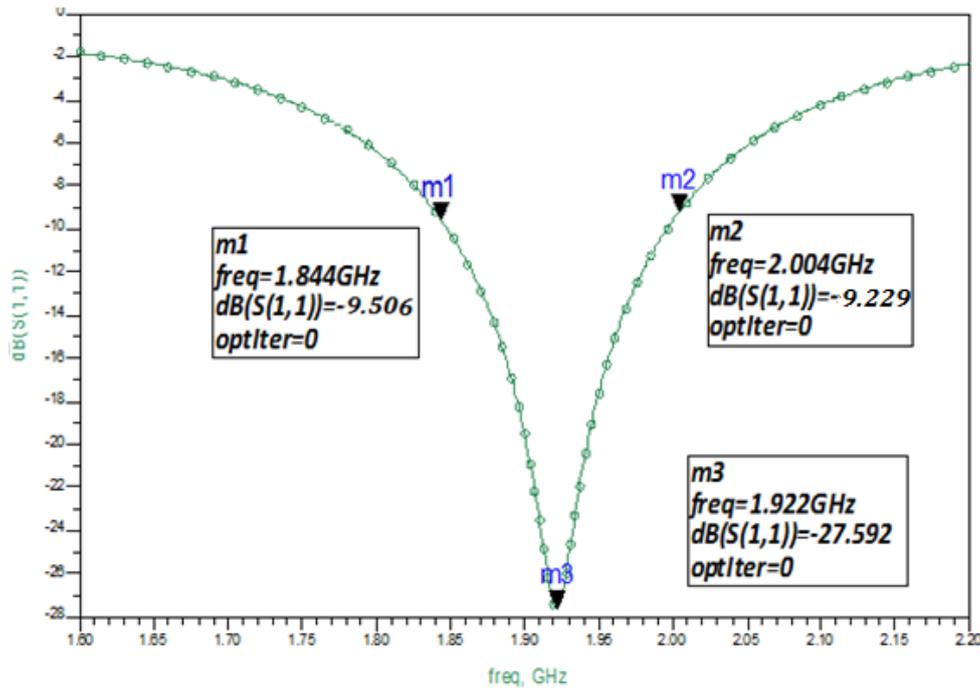
La bande passante de l'antenne simulée (BP=10 MHz) est très petite par rapport à la bande passante du (UMTS 1885-2200) qui est à 315 MHz; donc il faudra l'optimiser.

### IV.9. L'optimisation de la bande passante de l'antenne patch conçue pour le standard (PCS) :

Après simulation de l'antenne patch rectangulaire au point optimale (1.5, 1.5) et calcul de la bande passante on a constaté que celle-ci (BP=9MHz) est très étroite la comparant à la bande passante du standard (PCS) qui est à 140 MHz, ce qui n'est pas suffisant pour le bon fonctionnement de notre antenne. Et pour l'optimiser, on a utilisé le logiciel (ADS schématique). La figure IV.9.1 représente le schématique de l'antenne.



**Figure IV.9 :** le schématique de l'antenne



**Figure IV.10** : La bande passante de l'antenne patch optimisé.

On remarque qu'en utilisant l'ADS schématique, notre antenne a eu une bande passante plus élargie, et la fréquence de résonance est à (1.92GHz) qui représente la fréquence de travail désirée. Le coefficient de réflexion à la fréquence de résonance est à (-27.59dB), donc la bande passante peut être calculée.

- **Le calcul de la bande passante après optimisation de l'antenne:**

$$F_r = 1.922 \text{ GHz}$$

$$S(1, 1)_{F_r} = -27.59 \text{ dB}$$

$$BP = F_{\max} - F_{\min}$$

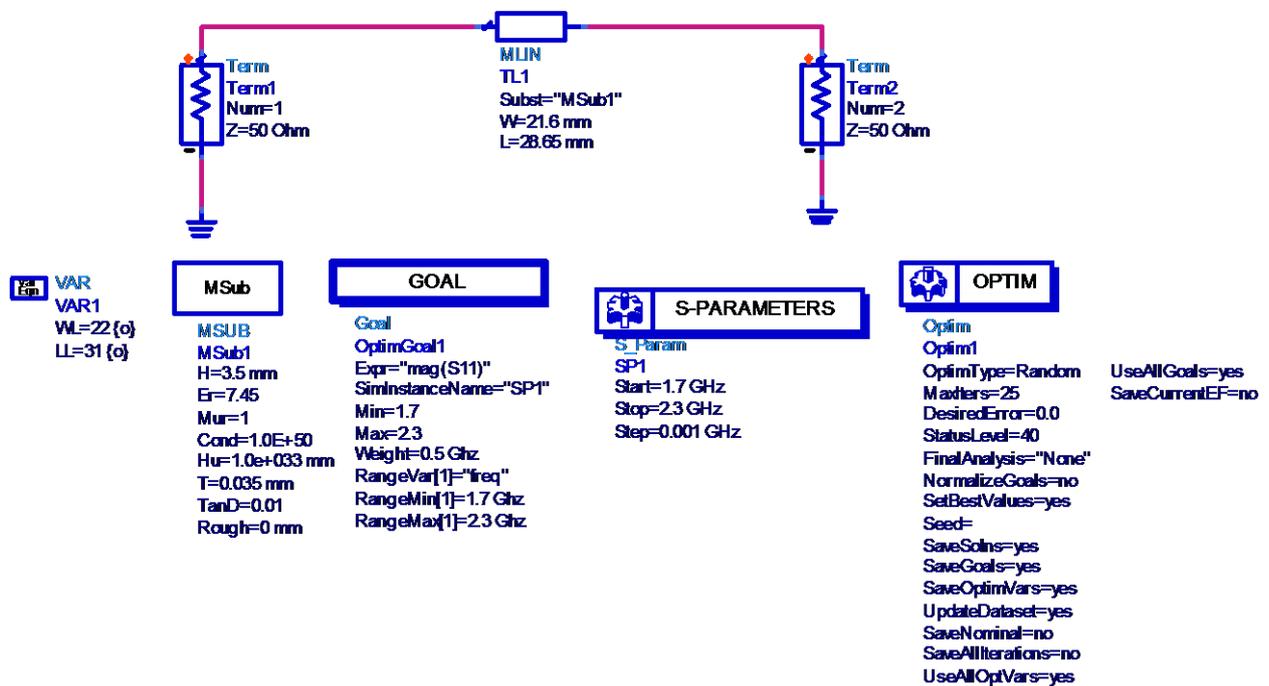
$$BP = 2.004 - 1.844 = 160.10^{-3} \text{ GHz} = 160 \text{ MHz}$$

La bande passante optimisée a donné une valeur de (160MHz) qui est largement suffisante puisqu'elle a dépassé la valeur désirée (140MHz).

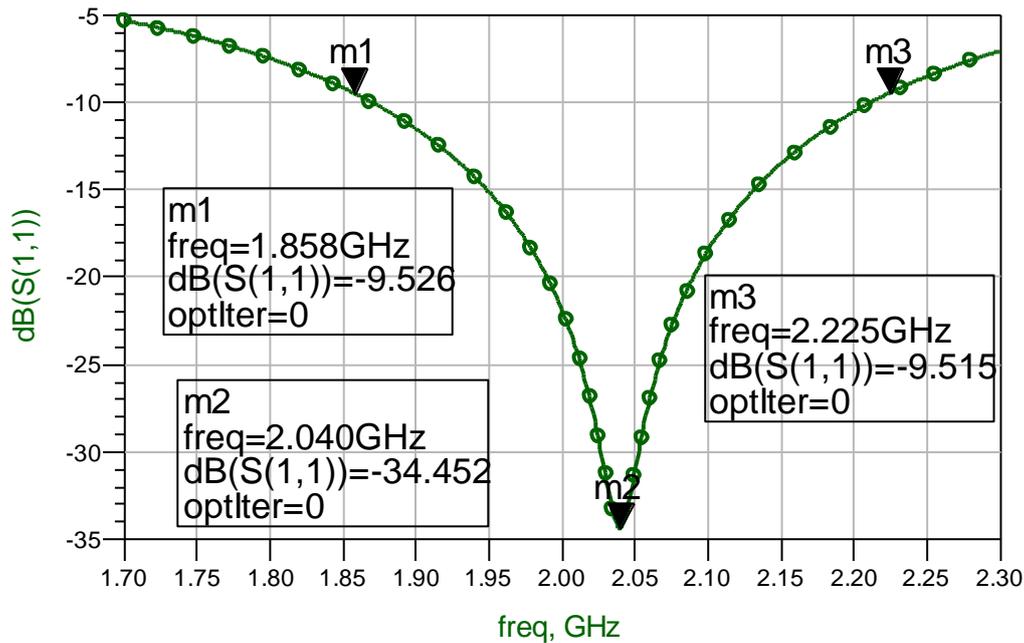
#### **IV.10.L'optimisation de la bande passante de l'antenne patch conçue pour le standard (UMTS) :**

Après simulation de l'antenne patch rectangulaire au point optimale (0.6, 1) et calcul de la bande passante on a constaté que celle-ci (BP=10MHz) est très étroite la comparant à la bande passante du standard (UMTS) qui est à 315 MHz, ce qui n'est pas suffisant pour le bon fonctionnement de notre antenne. Et pour l'optimiser, on a utilisé le logiciel (ADS schématique).

La figure IV.9.1 représente le schématique de l'antenne.



**Figure IV.11 :** le schématique de l'antenne



**Figure IV.12** : La bande passante de l'antenne patch optimisé.

On remarque qu'en utilisant l'ADS schématique, notre antenne a eu une bande passante plus élargie, et la fréquence de résonance est à **(2.04 GHz)** qui représente la fréquence de travail désirée. Le coefficient de réflexion à la fréquence de résonance est à (-34.45 dB), donc la bande passante peut être calculée.

- **Le calcul de la bande passante après optimisation de l'antenne:**

$$F_r = 2.04 \text{ GHz}$$

$$S(1, 1)_{F_r} = -34.45 \text{ dB}$$

$$BP = F_{\max} - F_{\min}$$

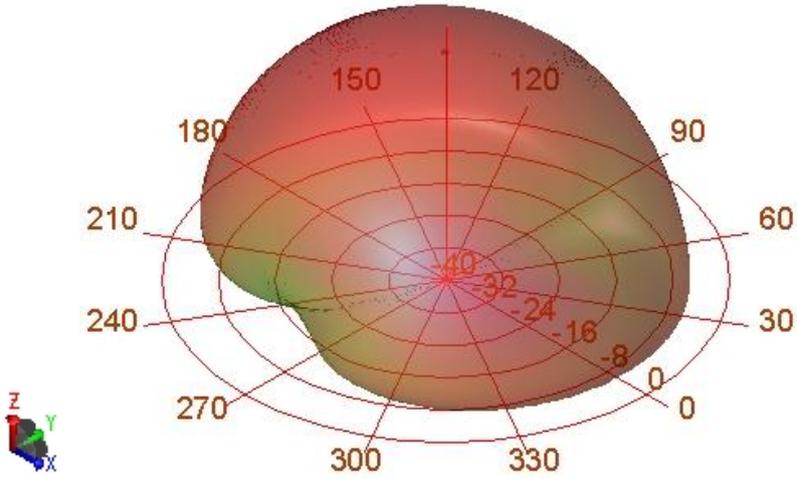
$$BP = 2.225 - 1.858 = 367 \cdot 10^{-3} \text{ GHz} = 367 \text{ MHz}$$

La bande passante optimisée a donné une valeur de 367MHz qui est largement suffisante puisqu'elle a dépassé la valeur désirée (315MHz).

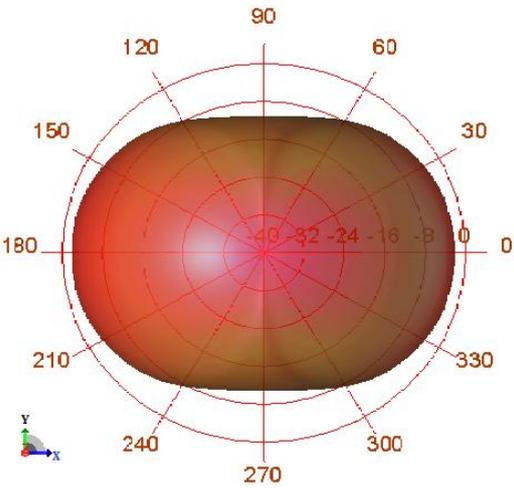
#### IV.11. Le diagramme de rayonnement en 3D :

Dés que l'antenne patch est conçue, elle doit être placée dans le téléphone portable. L'orientation de l'antenne est dirigée vers l'axe Z ; donc notre antenne est parallèle à la

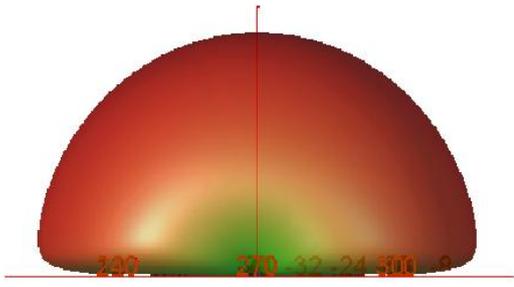
terre. Les figures ci-dessous (Figure IV.13) montrent le diagramme de rayonnement pour différents angles d'orientations.



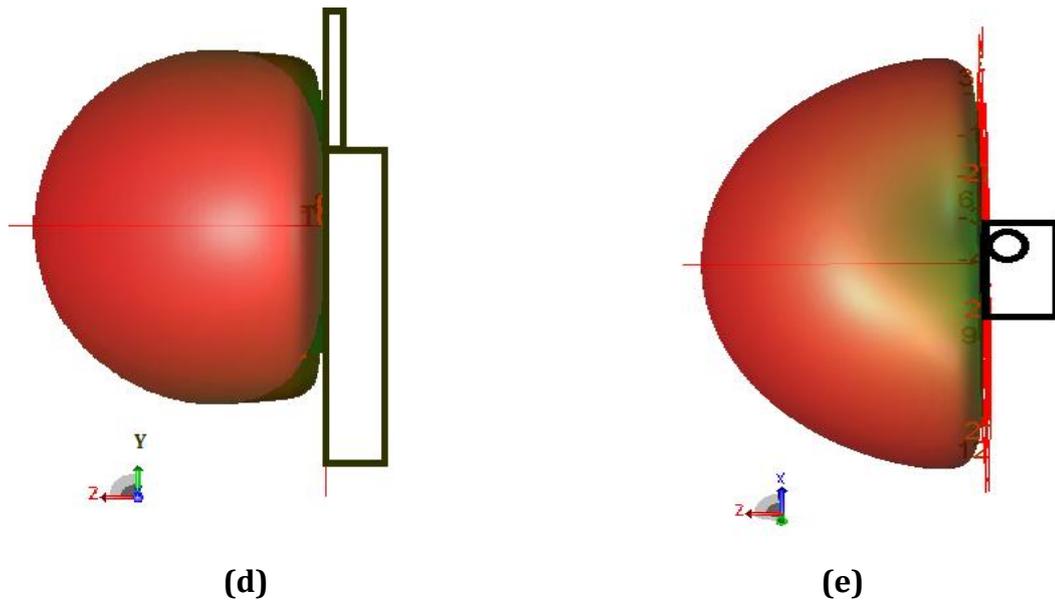
(a)



(b)



(c)



**Figure IV.13 :** (a) : Le diagramme de rayonnement en 3D (X, Y, Z)

(b) : le diagramme de rayonnement en 3D vu sur l'axe Z dans le plan (Y, X)

(c) : le diagramme de rayonnement en 3D vu sur l'axe Y dans le plan (Z, X)

(d) : le diagramme de rayonnement en 3D du téléphone portable sur le plan (Y, Z)

(e) : le diagramme de rayonnement en 3D du téléphone portable sur le plan (X, Z)

#### IV.12. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de réaliser une antenne imprimée rectangulaire fonctionnant aux standards PCS, UMTS sous logiciel de simulation ADS.

Les résultats achevés ont justifié pratiquement la recherche théorique utilisée et les formules analytiques données pour la conception de notre antenne patch, d'où les antennes conçues sont assez compactes pour être placées dans un téléphone cellulaire.

Les deux antennes patch dont les fréquences de résonance sont : 1.915 GHz et 2.04 GHz sont conçues avec succès pour les deux standards PCS, UMTS respectivement.

Les bandes passantes des antennes conçues après optimisation ont permis de couvrir une bonne marge de gamme de fréquences des standards utilisés PCS, UMTS.

## **Conclusion générale**

Les travaux présentés tout au long de cette thèse ont permis de concevoir deux antennes rectangulaires imprimées l'une adaptée au standard PCS 1900 et l'autre à celui d'UMTS.

Cette conception basée sur des données théoriques a permis de confirmer ces données, en ayant des antennes fonctionnant à la bonne fréquence de résonance appropriées à chacun des standards utilisés.

Les résultats obtenus ont abouti à plusieurs valeurs du coefficient de réflexion à la fréquence de résonance aux quelles on a choisi la meilleure valeur qui représente le point optimal.

Notre travail est complété par l'optimisation de chaque antenne patch à son point optimal conclu, afin d'élargir sa bande passante et couvrir la gamme du standard.

Puisque les antennes étudiées ont bien fonctionné dans le standard PCS 1900 et l'UMTS, donc ce travail est autant pratique pour une antenne imprimée du système de communication cellulaire LTE de 4<sup>ème</sup> génération, et aussi elle aura la possibilité d'être intégré dans les téléphones cellulaires comme les antennes conçues précédemment.

Un autre concept à étudier dans l'avenir, est d'utiliser ce travail pour une conception multistandard; c'est à dire réaliser une antenne imprimée qui est adopté aux systèmes de communication cellulaires.

Il est envisageable, qu'un seul combiné servirait à un certain nombre d'applications ; lorsque l'utilisateur serait à la maison, le combiné fonctionnera dans la bande de fréquence identique à celle utilisée par les téléphones sans fil ; donc il serait relié au central téléphonique local ; puis lorsque l'utilisateur serait en dehors de sa maison, le combiné se raccorderait au réseau cellulaire ; et Lors d'un voyage d'affaires, loin de la maison, le combiné se connectera via le réseau satellite pour offrir un service à l'utilisateur.

Pour ces différents standards, l'antenne du téléphone portable exige de fonctionner à des fréquences distinctes, autrement dit, concevoir une antenne micro ruban « patch » qui peut fonctionner à deux ou trois fréquences pour des applications multiples.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1]: S.Senouci, A.-L.Beylot, G.Pujolle, "*Call admission Control in cellular Networks: A Reinforcement Learning Solution*", to appear in ACMiley .International journal of Network Management, 2003.
- [2]: S.Lohier, S.Senouci, Y.M.Ghamri.Doudane, and G.Pujolle, "*A reactive QoS Routing Protectol for Ad Hoc Networks*", European. Symposium on Ambient Intelligence (EUSAI 2003) Eindhoven , Netherlands , November 2003 , lecture Notes in Computer Science , Springer Verlag .
- [3]: P.Simons , Y.M.Ghamri.Doudane , S.Senouci , F.Bachiri , A.Munaretto , J.Karsila , G. Le grand , and T.Demeure , "*Ambience Project- Find a Meeting* " European. Symposium on Ambient Intelligence (EUSAI 2003), Eindhoven, Netherlands, Novembre 2003, Lecture Notes in Computer Science, Spring.Verlag.
- [4]: S.Senouci, and G.Pujolle, "*Dynamic Channel Assignment in Cellular Networks: Reinforcement Learning. Solution*", 10<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications ICT 2003, Papeete, Tahiti, Février / Mars 2010
- [5]: L.Ouakil, S.Senouci, and G.Pujolle "*Performance Comparaison of Ad. Hoc Routing Protocols Based on Energy Consumption*", Ambience workshop 2002, Torino, Italy, Septembre 2002.
- [6]: Constantine A.Balanis, PanayiotisI.Ioannides "*Introduction smart Antennas*"2007.
- [7]: X.Lagrange, P.Godlewski, S.Tabbane, "*Réseaux GSM*", Hermes Science publication, Paris 5<sup>ème</sup> édition, 2000, ISBN : 2-7462-01531-4
- [8]: J.Sanchez, M.Thioune "*HMTS*", Lavoisier, 2<sup>ème</sup> édition 2004, ISBN : 2-7462-0856-3
- [9]: J.Korhonen, "*Introduction to 3G.Mobile Communications*", Artech House, 2001, ISBN: 1-58053-287-X
- [10]: Xavier Lagrange Philippe Godlowski, Sami Tabbane, "*Réseaux GSM-DCS*" édition Hermès. Paris, 1996.
- [11]: Mohamed Tahar MISSAOUI "*Etude des techniques des Densifications dans les réseaux Radio Mobiles Cellulaires* " : thèse de doctorat. RNIT ,2004
- [12]: Odile Picon et coll, "*Les antennes Théorie, conception et application*", Dunod, Paris, 2009, ISBN 978-2-10-054245-1
- [13]: Balanis, C.A., "*Antenna Theory: Analysis and Design*", John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [14]: GROSSE, C. ; TIRADO, M. : "*Animating field lines*". *Education, IEEE Transactions on*. Vol. 39,Issue 1, Feb. 1996. pp. 69-76.
- [15]: DARKO, K., J.; GERALD J., A.: "*Plotting Vector Fields with a Personal Computer*". *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, Vol. MTT-35, N. 11, November 1987. Pp.1069-1072.

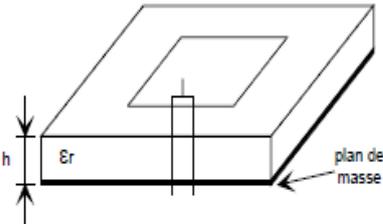
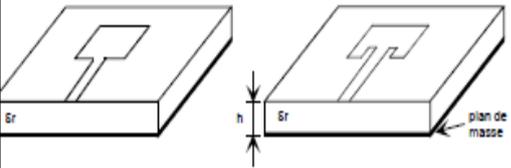
- [16]: STALLING, D.; ZOCKLER, M.; HEGE, H.-C : “Fast display of illuminated field lines“. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*. Vol. 3, Issue 2, June 1997. pp. 118–128.
- [17]: Makarov, S.N., “*Antenna and EM Modeling with MATLAB*“, John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [18]: Ulaby, F.T., “*Fundamentals of Applied Electromagnetics*“, Prentice Hall, 1999.
- [19]: G. A. Deschamps, “*Microstrip Microwave Antenna*“, Third USAF Symp. on Antennas, 1953
- [20]: H.Gutton,G.Baissinot ,”*flat Aerial For Ultra High Frequencies*” ,French Patent No 703 113, 1955
- [21]: VAN BLADEL, J. : “*Some remarks on green's dyadic for infinite space*“. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*. Vol. 9, Issue 6, Nov 1961 pp. 563–566.
- [22]: I.J. BAHL - P. BHARTIA, “*Microstrip Antennas*“ Artech House – 1980
- [23]: Constantine A. BALANIS, “*Antena Theory, Analysis and Design*“. Second Edition
- [24]: D. M. Pozar, “*Microstrip Antennas,*“ *Proc.IEEE*, Vol. 80, No. 1, pp. 79-80, January 1992
- [25]: Alexander KUCHAR, “*Aperture-Coupled Microstrip Pacth Antenna Array* “, Rapport de Thèse, Technic University of Wien – March – 1996
- [26]: David M. Pozar & Daniel H. Schaubert, “*Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays* “.
- [27]: LAL C. GODARA, “*Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System considerations*“ , *IEEE*, Vol. 85, No. 7, July 1997.
- [28]: C.M. Krowne “*Cylindrical-Rectangular Microstrip Antenna,*“ *IEEE Trans. Antennas Propagat*“, Vol. AP-31, No. , pp.194-199, January 1983
- [29]: I. Lier & K. R. Jakobsen “*Rectangular Microstrip Pacth Antennas with Infinite and Finte Ground Plane Dimensions,*“ *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-31, No.6, pp.978-984, November 1983
- [30]: Stutzman, W.L. and Thiele, G.A., “*Antenna Theory and Design*“, John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [31]: Balanis, C.A., *Antenna Theory: “Analysis and Design*“, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [32]: Balanis, C.A., “*Advanced Engineering Electromagnetics*“, John Wiley & Sons, New York, 1989

- [33]: Hammerstad, E.O., "*Equations for Microstrip Circuit Design*," Proc. Fifth European Microwave Conf., pp. 268-272, September 1975.
- [34]: Kumar, G. and Ray, K.P., "*Broadband Microstrip Antennas*", Artech House, Inc, 2003.
- [35]: James, J.R. and Hall, P.S., "*Handbook of Microstrip Antennas*", Vols 1 and 2, Peter Peregrinus, London, UK, 1989.
- [36]: Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A., "*Microstrip Antenna Design Handbook*", Artech House, Inc, 2001.
- [37]: Richards, W.F., "*Microstrip Antennas, Chapter 10 in Antenna Handbook: Theory Applications and Design*" (Y.T. Lo and S.W. Lee, eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1988.
- [38]: D. M. Pozar, and S. M. Voda , " *A rigorous analysis of a microstripline fed patch antenna*," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. AP-35, N°. 12, pp. 1343-1350, December 1987.
- [39]: A. K. Bhattacharryya , "*Long rectangular patch antenna with a single feed* ," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 38 , N°. 7, pp. 987-993, July 1990.
- [40] : M. Diblang , " *Développement du concept de l'antenne a résonateur bie pour la Génération de la polarisation circulaire*," Université de Limoges. Thèse de doctorat 20 mars 2006.
- [41]: E. H. Newman, and P.Tylyathan, "*Analysis of microstrip antennas using moment methods*", IEEE Transaction on Antennas and Propagations, Vol. AP-29, N°. 1, pp. 47-53, January 1989.
- [42]: P. R. Haddad and D. M. Pozar "*Anomalous mutual coupling between microstrip antennas*", IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 42, N°. 11, pp.1545-1549, November 1994.

## Annexe A

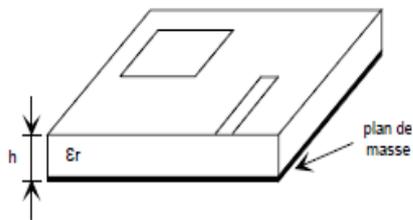
### A.1 Alimentation des antennes plaquées :

Les différentes méthodes d'alimentation des antennes plaques peuvent être regroupées en deux grandes catégories: les **alimentations par contact** (par sonde ou ligne micro ruban) et les **alimentations par proximité** (couplage électromagnétique par ligne ou fente). La technique utilisée peut modifier de façon importante le fonctionnement de l'antenne: les avantages et les inconvénients des principales méthodes de base rencontrées dans la littérature sont présentés.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<p style="color: blue; text-decoration: underline;">Alimentation par contact</p> <p style="color: green; text-align: center;"><i>Sonde coaxiale</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pas de pertes par rayonnement de ligne</li> <li>- sélection possible d'un mode privilégié</li> <li>- obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde</li> <li>- prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur</li> <li>- technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rayonnement parasite de la sonde de type monopolaire</li> <li>- partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte</li> <li>- technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique</li> <li>- rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité</li> </ul>
<p style="color: green; text-align: center;"><i>Ligne microruban</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation</li> <li>- adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rayonnement parasite de la dis continuité ligne - aérien</li> <li>- rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique</li> <li>- structure figée après gravure</li> </ul>

## Alimentations par proximité

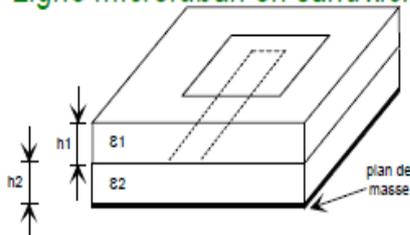
### *Ligne microruban en circuit ouvert*



- procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation

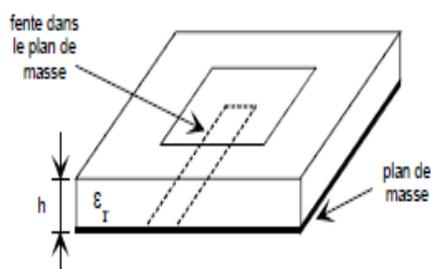
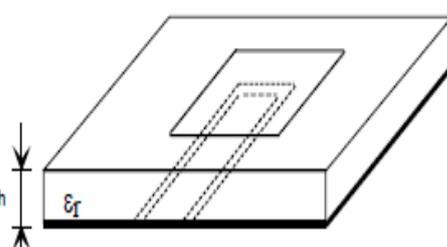
- rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique
- structure figée après gravure
- paramétrage du positionnement relatif de la ligne nécessaire pour adapter l'antenne

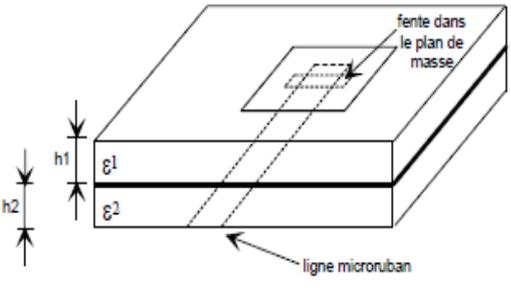
### *Ligne microruban en sandwich*

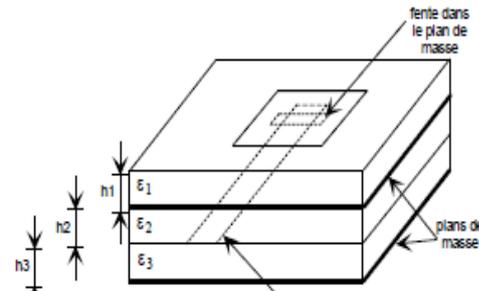


- dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens
- bande passante plus large par augmentation de la hauteur ( $h_1 + h_2 > h_1$ )

- deux couches de substrat requises
- difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur

<p style="text-align: center;"><b>Ligne à fente</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- procédé technologique simple</li> <li>- facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rayonnement arrière parasite possible de la fente</li> <li>- transition fente - ligne de transmission</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Guide d'onde coplanaire</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mêmes avantages que cas précédent</li> <li>- faible rayonnement arrière</li> <li>- transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et de circuits MMIC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires après une discontinuité (coude ou tés) nécessitant des ponts à air en millimétrique</li> </ul>

<p style="text-align: center;"><b>Couplage par fente</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- réalisations du circuit de distribution et de l'aérien indépendantes</li> <li>- séparation électromagnétique des deux couches</li> <li>- possibilité d'élargir la bande en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- technologie plus coûteuse et complexe (positionnement des 2 couches, 4 faces de métallisation)</li> <li>- intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions</li> <li>- rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément</li> </ul>
--	--	---

<p style="text-align: center;"><b>Couplage par fente d'une ligne encastrée</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mêmes avantages que cas précédent</li> <li>- rayonnement arrière nul</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- technologie très coûteuse</li> <li>- apparition possible de modes parasites microrubans de propagation entre le ruban conducteur et le plan de masse de la fente</li> </ul>
--	--	--

## **A.2 Présentation du logiciel MOMENTUM :**

*MOMENTUM* (HP – EEsof) est un simulateur électromagnétique 2D1/2 qui permet à la fois une analyse de circuit et une analyse électromagnétique. En effet, il prend en compte les vraies géométries dessinées par les concepteurs pour simuler le couplage et les effets parasites.

*MOMENTUM* peut alors être utilisé lorsque les modèles de circuit n'existent pas ou ne sont plus valables (ce qui est souvent le cas dans le domaine du millimétrique).

Cependant, quelques conditions sont nécessaires pour utiliser ce type de logiciel :

- les substrats doivent être homogènes et isotropes et de dimensions **transversales infinies**
- les plans de masse de dimensions infinies.

## **A.2 Principe de fonctionnement et de simulation :**

### **A.2.1 Technique de maillage :**

Ce logiciel est basé sur une méthode électromagnétique numérique appelée Méthode des Moments. Par cette technique, les conducteurs sont "maillés", divisés en éléments simples triangles ou rectangles. La taille des éléments simples n'est pas constante ce qui lui permet d'adapter les cellules à la géométrie de l'objet. Ainsi, en présence de discontinuités, les dimensions de la structure à étudier sont respectées.

Les courants surfaciques induits sur le conducteur sont décomposés dans une base de fonction sur chacune des cellules élémentaires. Ces coefficients sont les inconnus du problème.

Si le courant est fortement localisé, comme par exemple sur une ligne microruban où il se propage principalement sur les bords, un maillage plus fin et plus dense peut alors être utilisé (fonction *Edge Mesh* du logiciel), pour représenter de façon plus précise le courant, tout en minimisant le temps de calcul grâce à un algorithme d'échantillonnage efficace.

De plus, les nouvelles versions de *MOMENTUM* génèrent maintenant automatiquement le maillage des arcs et des cercles.

### **A.2.2 Principe de superposition des couches :**

Bien qu'il ne soit pas un logiciel 3D, MOMENTUM permet cependant de simuler des structures volumiques, si les conditions énoncées au début de ce paragraphe sont respectées.

Les éléments (**Strip** ou **hole**) sont alors superposés et les différentes couches peuvent être reliées entre elles par des **vias**. On définit l'ordre des couches c'est à dire leur positionnement par rapport aux substrats mis en jeu.

Il est donc important de noter ici que ce logiciel n'est pas adapté lorsque l'on cherche à étudier une **antenne alimentée par sonde coaxiale**. Pour simuler un tel dispositif, il faut insérer une ligne micro ruban sous le plan de masse et relier l'élément rayonnant à la ligne par un via, ce qui souvent s'éloigne de la structure initialement souhaitée.

Par contre, lors d'une **excitation par fente** dans le plan de masse, *MOMENTUM* convient parfaitement. En effet la ligne microruban sous le plan de masse et l'antenne sont définies en tant que *STRIP* et l'ouverture dans le plan de masse en tant que *HOLE*. Ainsi, la fente, souvent de très petites dimensions par rapport à celle de l'antenne, peut être correctement maillée, sans pour autant augmenter ni le volume ni le temps de calcul, ce qui est souvent le cas avec un logiciel 3D.

### **A.2.3 Compilation des substrats et génération du maillage :**

Une fois que les éléments sont dessinés et que le positionnement des différentes couches est effectué, on réalise une compilation des substrats dans la bande de fréquence utile, qui par l'intermédiaire des fonctions de Green va déterminer les caractéristiques sur tout le volume (soit à l'infini). Ces données pourront être sauvegardées et être ainsi réutilisées chaque fois que l'on se trouve dans les mêmes conditions d'utilisation.

La dernière étape avant la compilation est donc la génération automatique du maillage de la structure, généralement calculé à la plus haute fréquence.

### **A.2.4 Caractérisation de l'élément étudié :**

*MOMENTUM* utilise une méthode fréquentielle. Un calcul est nécessaire pour chaque fréquence désirée dans la bande à déterminer. Ceci peut donc demander un temps de calcul important si le pas fréquentiel est constant. Ainsi, une fonction appelée **Adaptive Frequency Sampling**, est un algorithme d'interpolation qui sélectionne automatiquement des fréquences et interpole les données. Des détails sur d'importants circuits sont modélisés en échantillonnant plus souvent la réponse quand les paramètres  $S$  évoluent rapidement, tout en minimisant le nombre total d'échantillons. Ceci permet donc des résultats précis à des coûts de calcul moindres.

Une fois la simulation terminée, de nombreuses sorties de résultats sont autorisées. Pour des lignes micro ruban, les ports d'accès permettent de déterminer tous les paramètres  $S_{ij}$  en module et phase.

Dans le cas d'antennes imprimées, en plus des paramètres  $S$ , des visualisations de courant animées, un abaque de Smith (ou un tracé séparé des impédances), ainsi que les diagrammes de rayonnement peuvent être obtenus. *MOMENTUM* simule les circuits conçus avec des conditions aux limites ouvertes ou fermées. Ces accès sont générés automatiquement et ne demandent pas de temps de calculs supplémentaires ou une augmentation en place mémoire.

Université Abou Bekr Belkaid

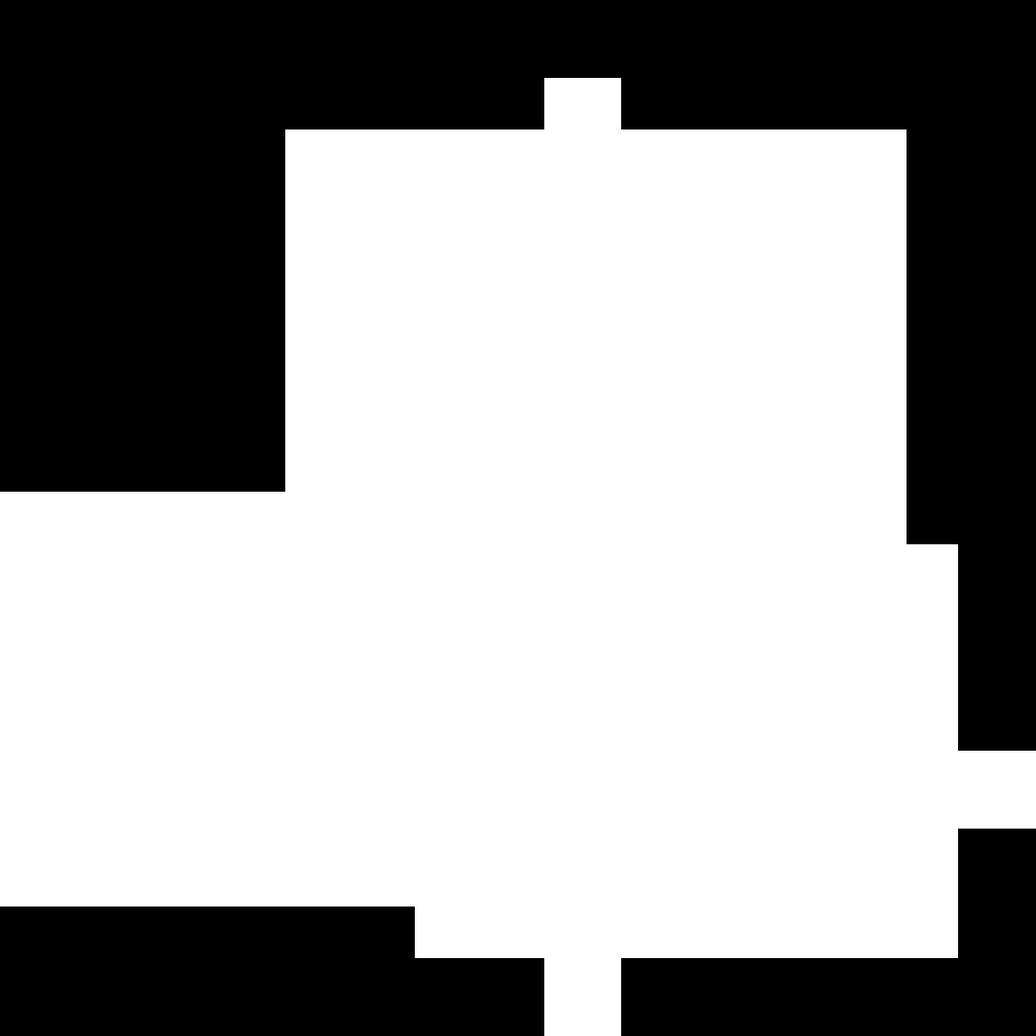
*Tlemcen Algérie*



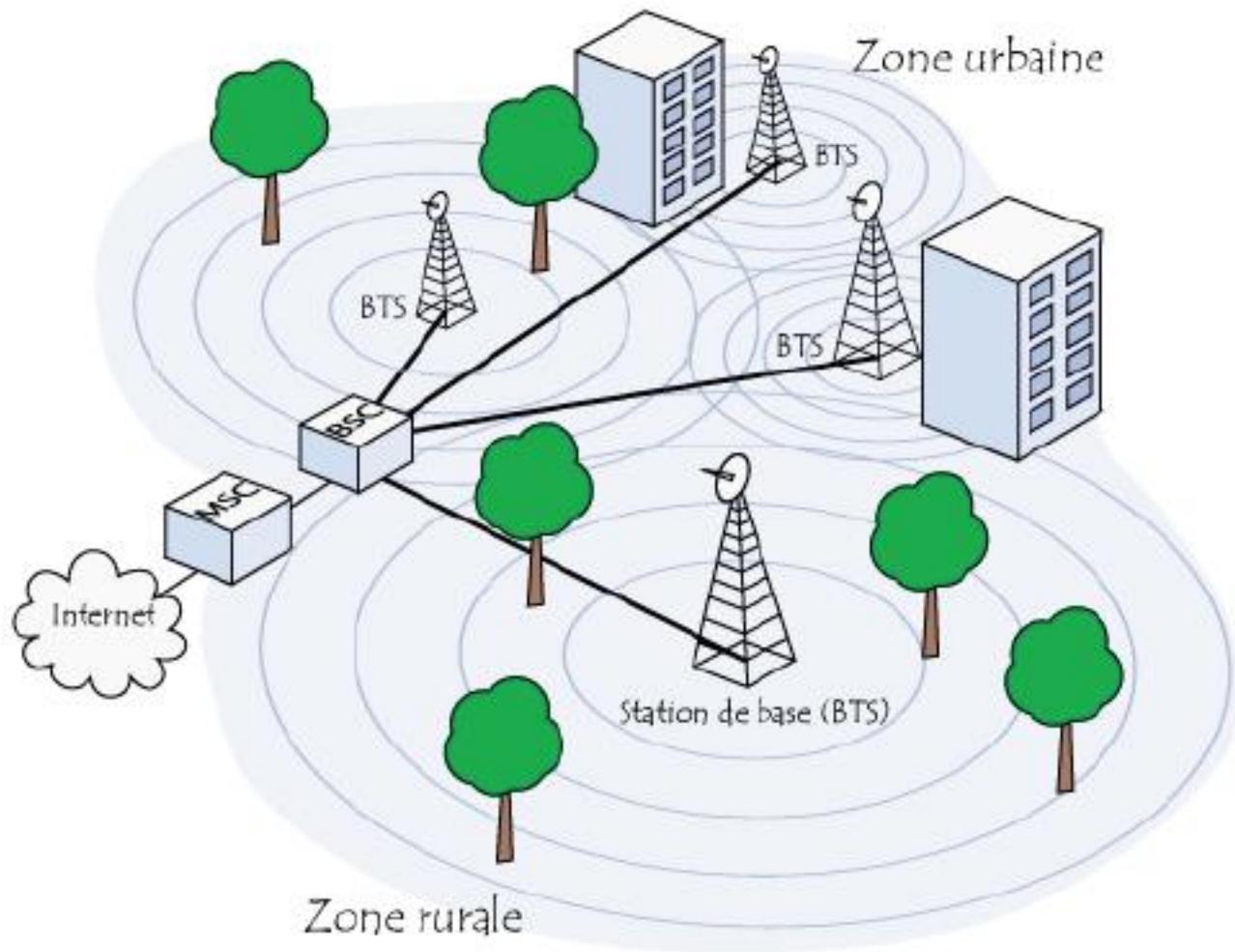
جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر









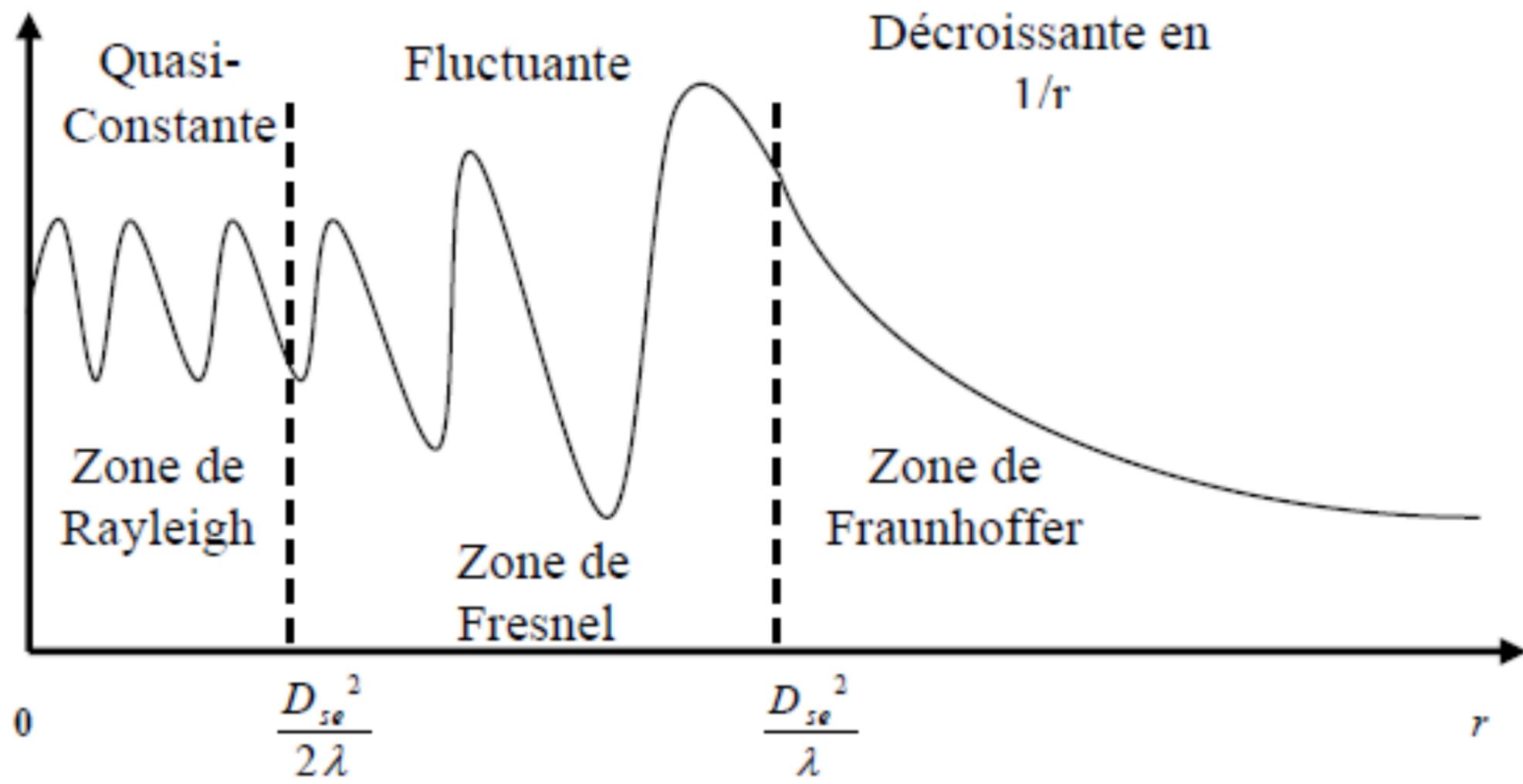




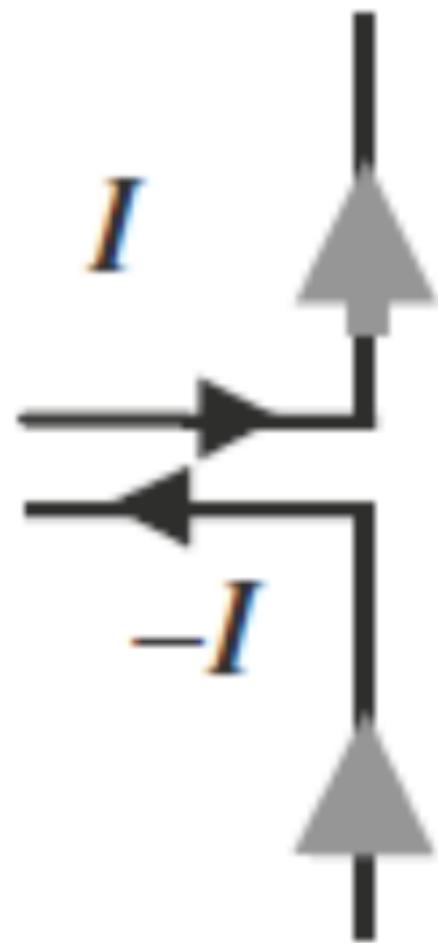




Densité de  
Puissance

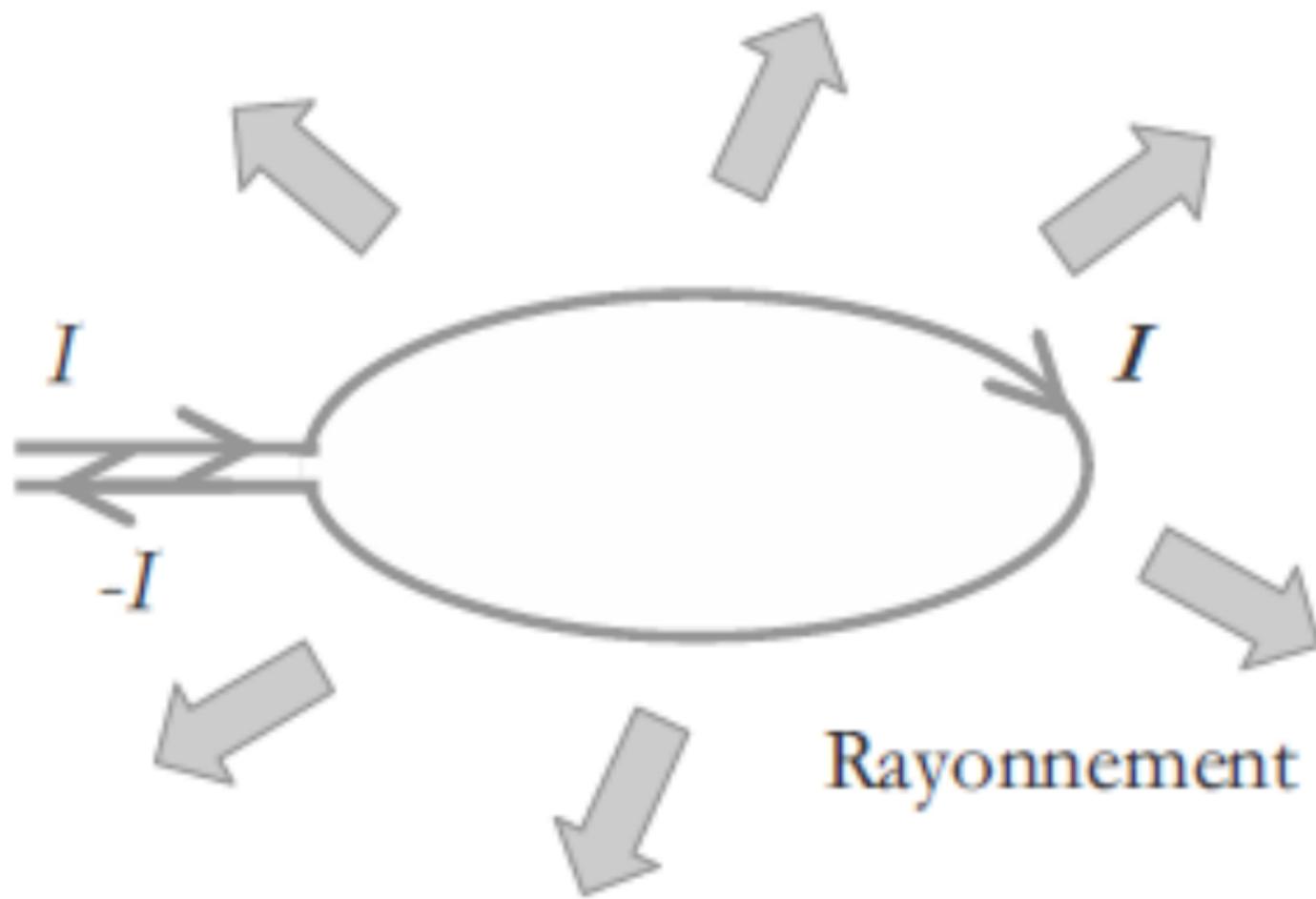


Rayonnement

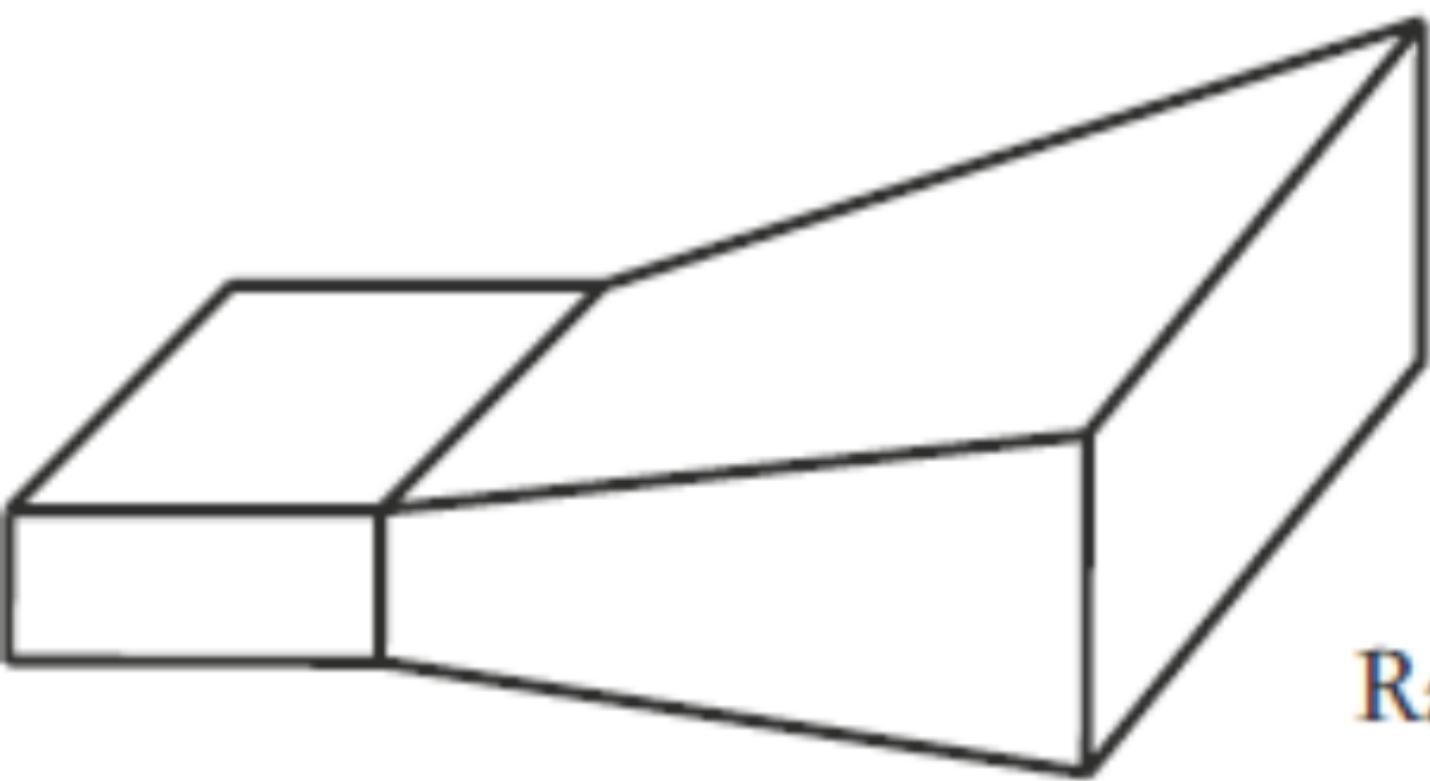


Rayonnement





Rayonnement



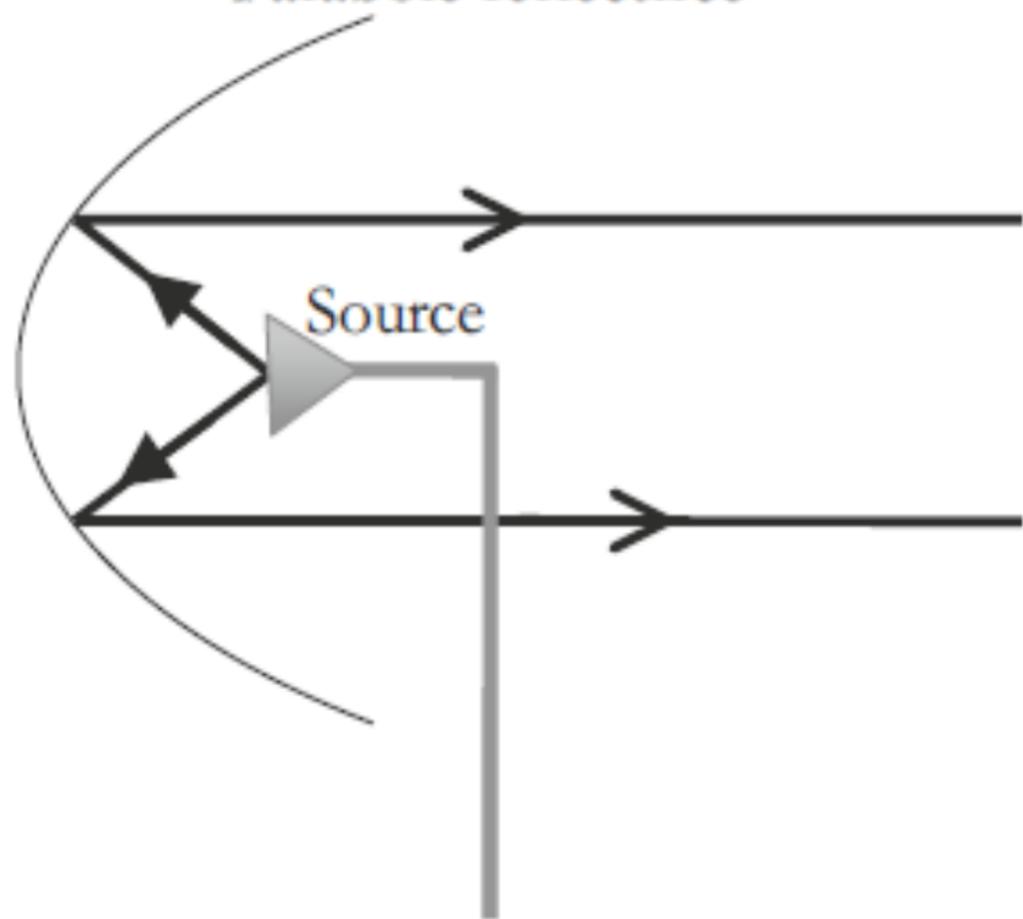
Rayonnement



Rayonnement



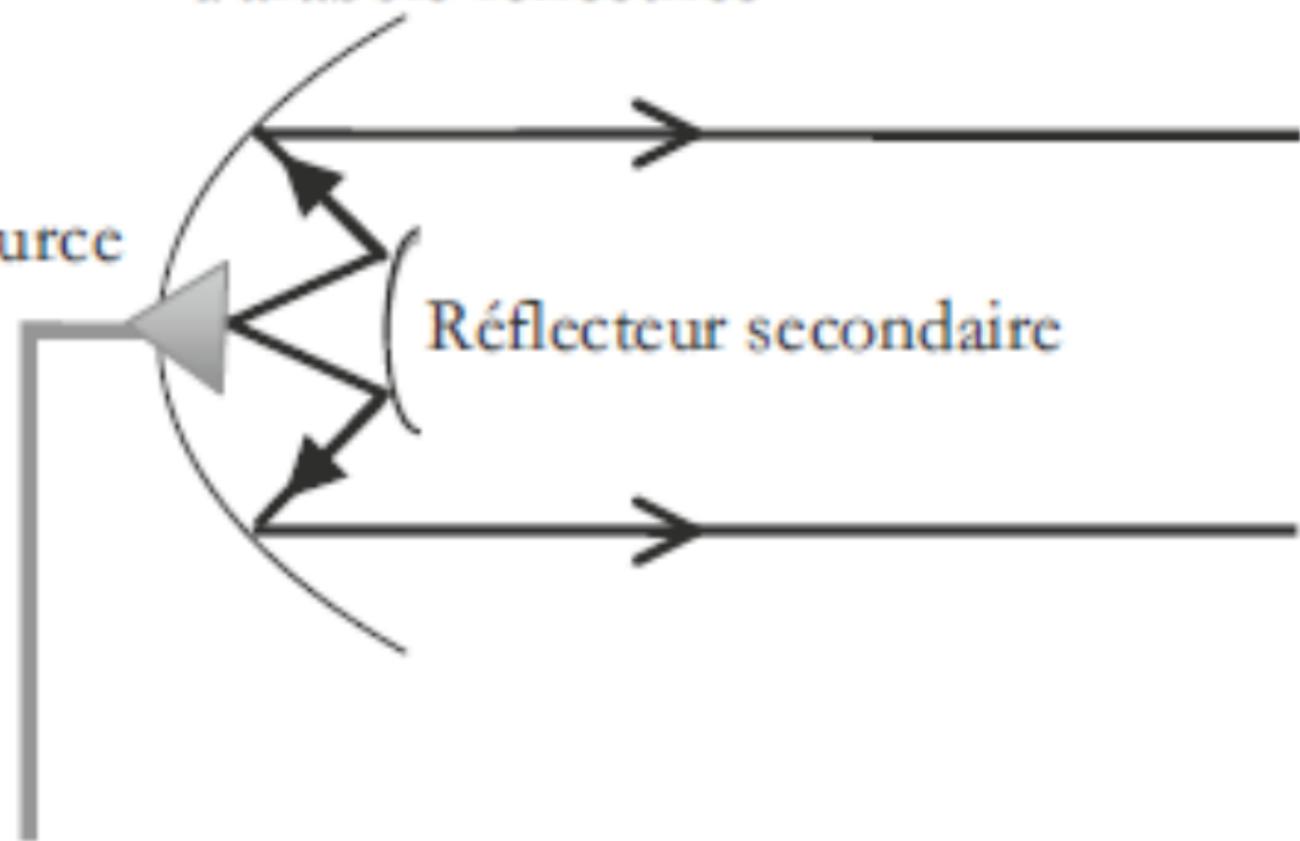
Parabole réflectrice

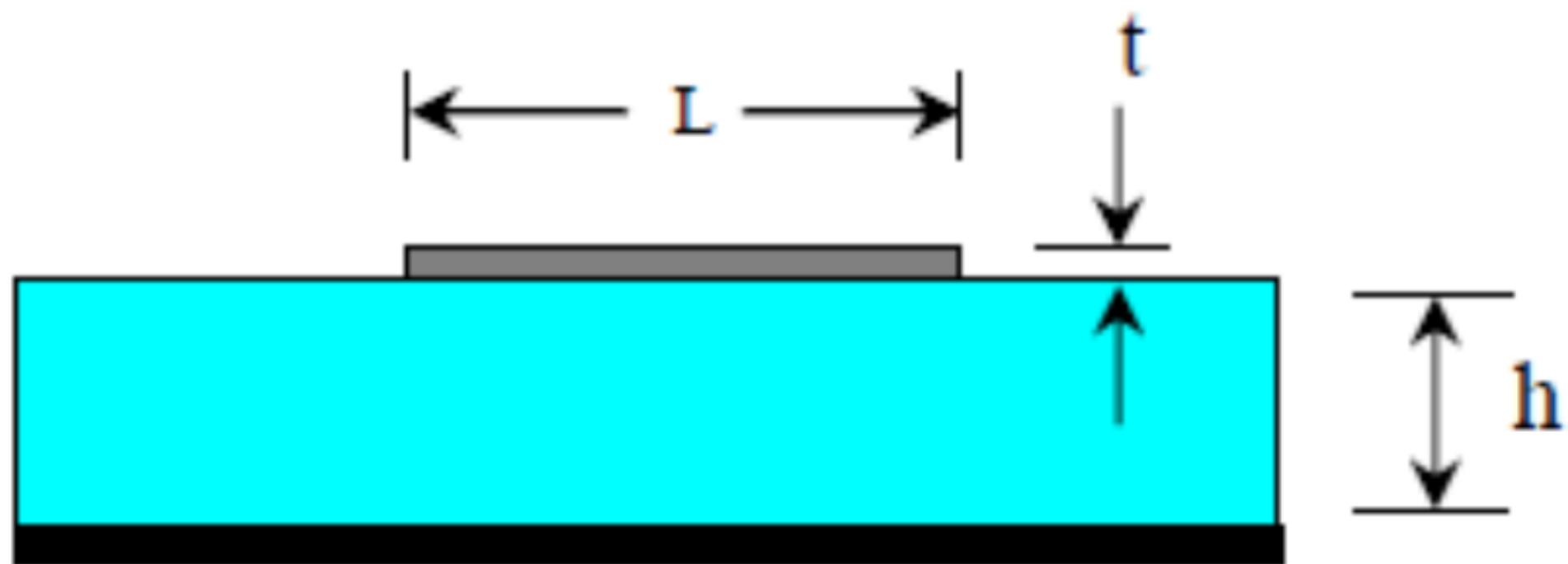


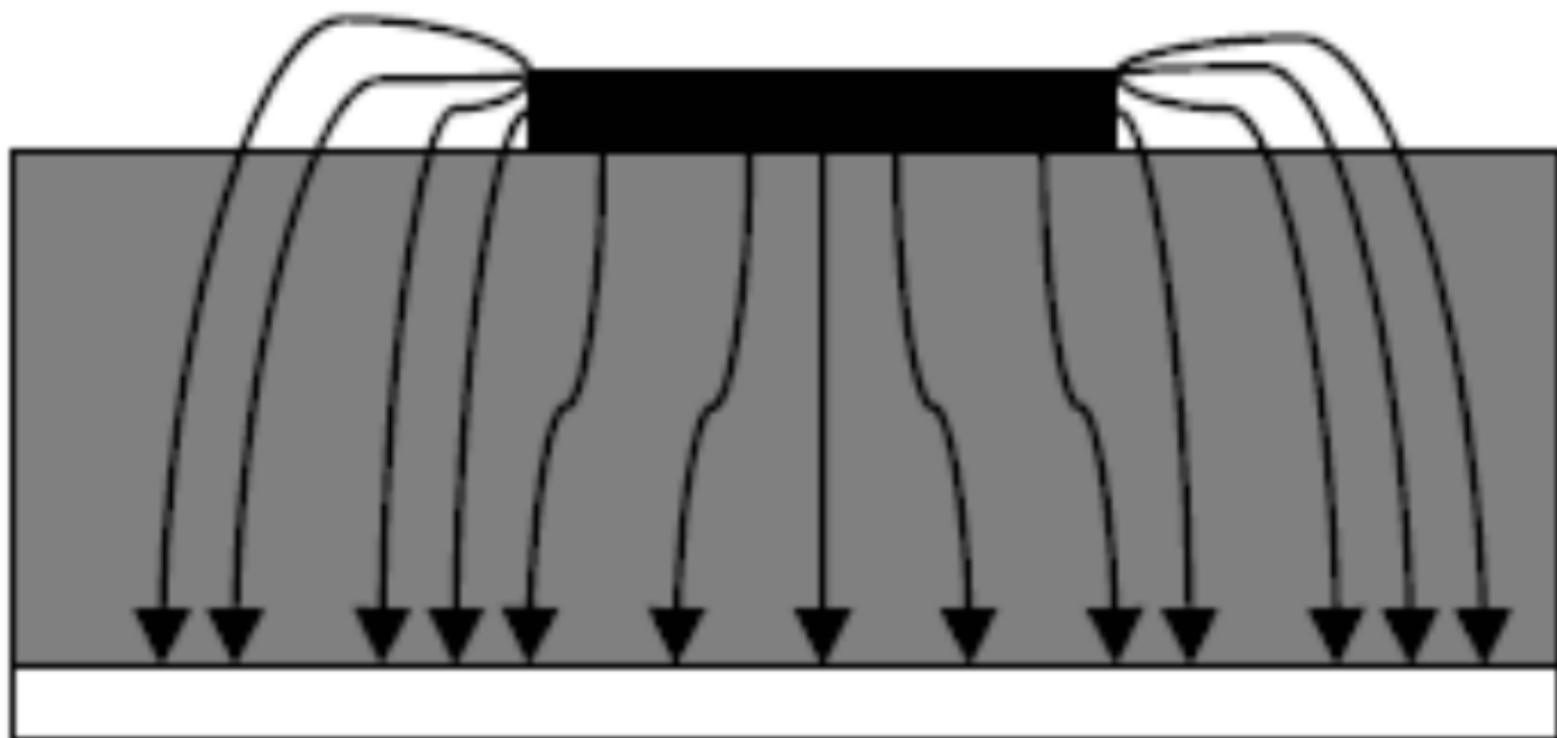
Parabole réflectrice

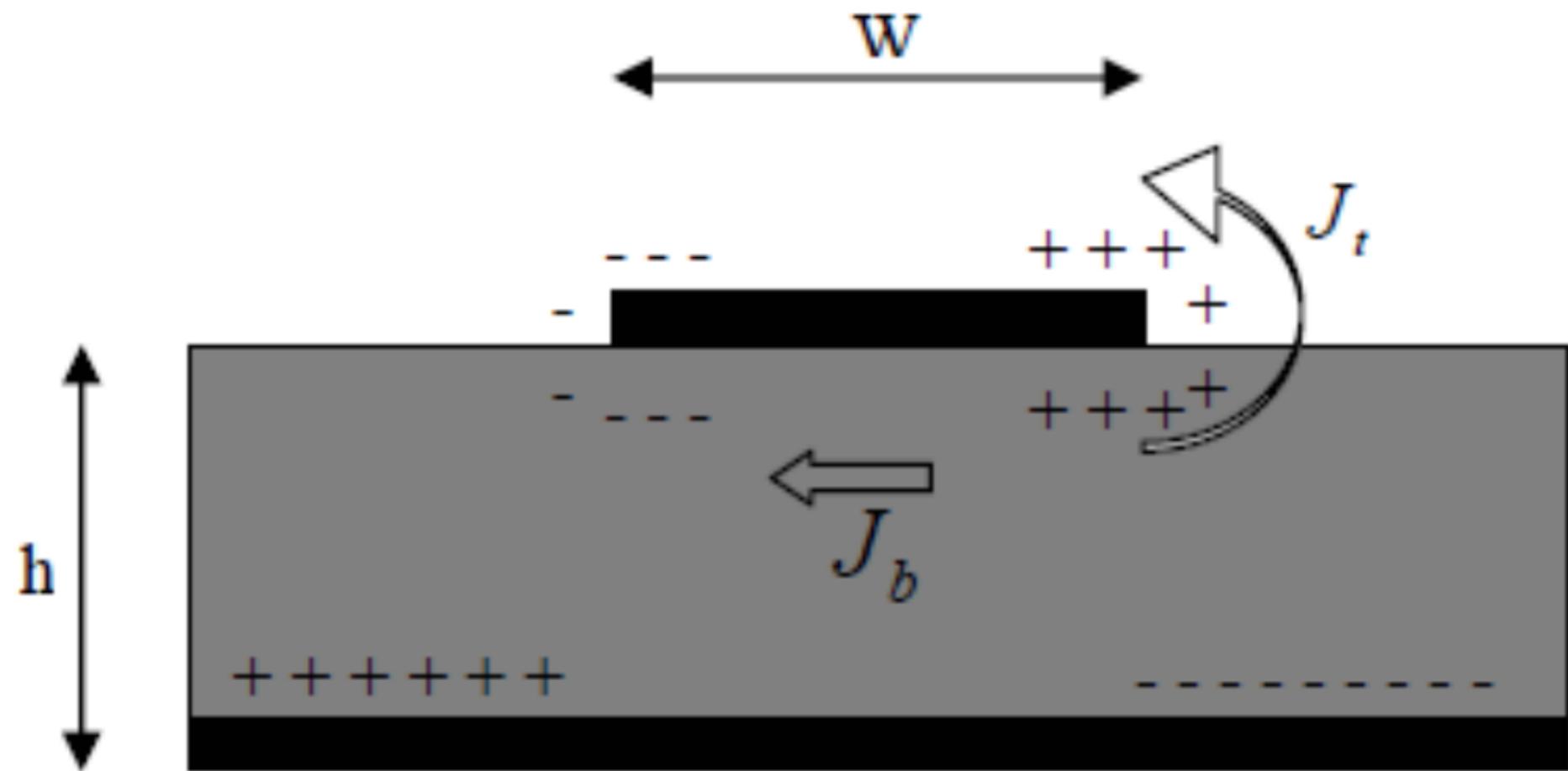
Source

Réflecteur secondaire











VAR  
VAR1  
WL=22 {o}  
LL=31 {o}

MSub

MSUB  
MSub1  
H=1.5 mm  
Er=6.9  
Mur=1  
Cond=1.0E+50  
Hu=1.0e+033 mm  
T=0.035 mm  
TanD=0.01  
Rough=0 mm

GOAL

Goal  
OptimGoal1  
Expr="mag(S11)"  
SimInstanceName="SP1"  
Min=1.6  
Max=2.2  
Weight=0.5 Ghz  
RangeVar[1]="freq"  
RangeMin[1]=1.6 Ghz  
RangeMax[1]=2.2 Ghz



S-PARAMETERS

S\_Param  
SP1  
Start=1.6 GHz  
Stop=2.2 GHz  
Step=0.001 GHz



OPTIM

Optim  
Optim1  
OptimType=Random  
MaxIters=25  
DesiredError=0.0  
StatusLevel=40  
FinalAnalysis="None"  
NormalizeGoals=no  
SetBestValues=yes  
Seed=  
SaveSolns=yes  
SaveGoals=yes  
SaveOptimVars=yes  
UpdateDataset=yes  
SaveNominal=no  
SaveAllIterations=no  
UseAllOptVars=yes

UseAllGoals=yes  
SaveCurrentEF=no



VAR  
VAR1  
WL=22 {o}  
LL=31 {o}

MSub

MSUB  
MSub1  
H=3.5 mm  
Er=7.45  
Mur=1  
Cond=1.0E+50  
Hu=1.0e+033 mm  
T=0.035 mm  
TanD=0.01  
Rough=0 mm

GOAL

Goal  
OptimGoal1  
Expr="mag(S11)"  
SimInstanceName="SP1"  
Min=1.7  
Max=2.3  
Weight=0.5 Ghz  
RangeVar[1]="freq"  
RangeMin[1]=1.7 Ghz  
RangeMax[1]=2.3 Ghz



S-PARAMETERS

S\_Param  
SP1  
Start=1.7 GHz  
Stop=2.3 GHz  
Step=0.001 GHz



OPTIM

Optim  
Optim1  
OptimType=Random  
MaxIters=25  
DesiredError=0.0  
StatusLevel=40  
FinalAnalysis="None"  
NormalizeGoals=no  
SetBestValues=yes  
Seed=  
SaveSolns=yes  
SaveGoals=yes  
SaveOptimVars=yes  
UpdateDataset=yes  
SaveNominal=no  
SaveAllIterations=no  
UseAllOptVars=yes

UseAllGoals=yes  
SaveCurrentEF=no

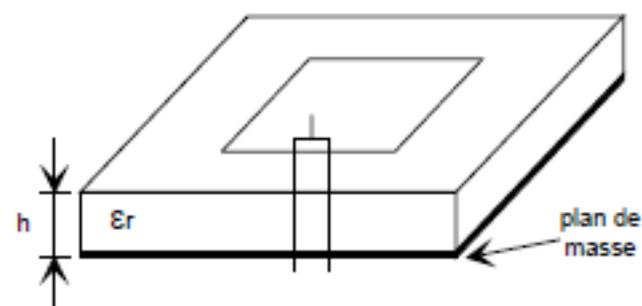
## Méthodes

## Avantages

## Inconvénients

### Alimentation par contact

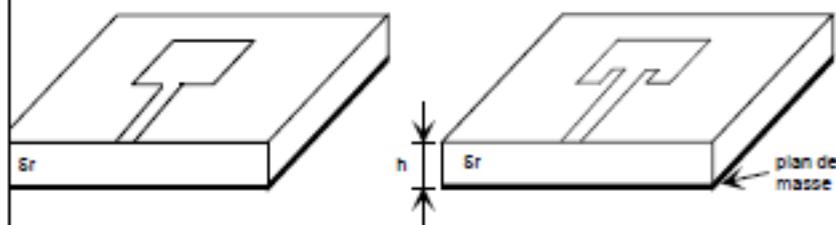
#### Sonde coaxiale



- pas de pertes par rayonnement de ligne
- sélection possible d'un mode privilégié
- obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde
- prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats faible hauteur
- technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz

- rayonnement parasite de la sonde de type monopolaire
- partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte
- technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique
- rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité

#### Ligne microruban

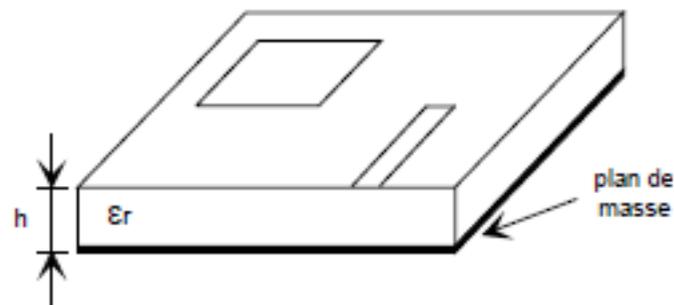


- procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation
- adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant.

- rayonnement parasite de la dis continuité ligne - aérien
- rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique
- structure figée après gravure

## Alimentations par proximité

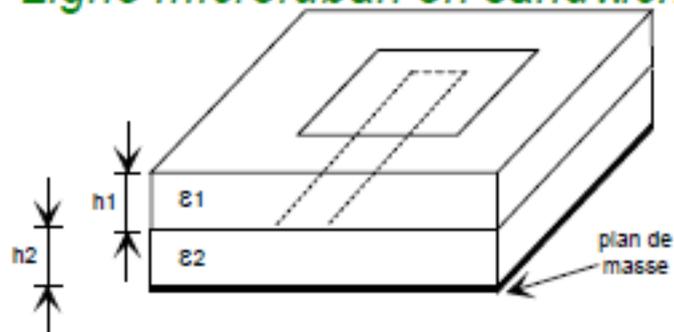
### *Ligne microruban en circuit ouvert*



- procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation

- rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique
- structure figée après gravure
- paramétrage du positionnement relatif de la ligne nécessaire pour adapter l'antenne

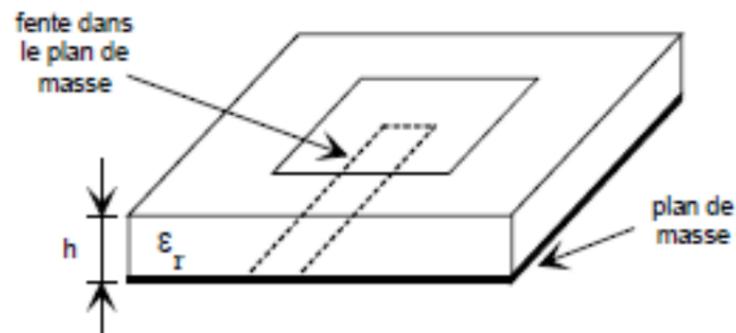
### *Ligne microruban en sandwich*



- dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens
- bande passante plus large par augmentation de la hauteur ( $h_1 + h_2 > h_1$ )

- deux couches de substrat requises
- difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur

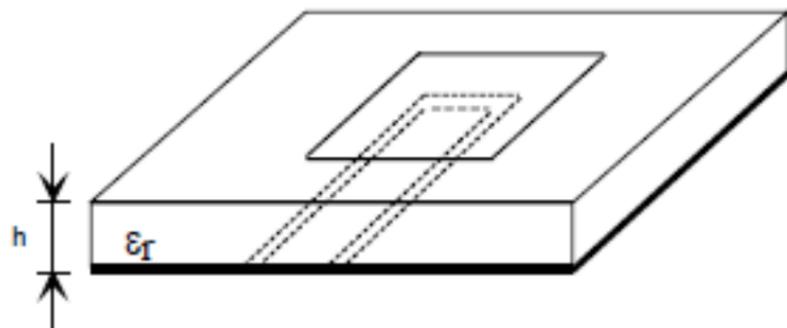
## Ligne à fente



- procédé technologique simple
- facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante

- rayonnement arrière parasite possible de la fente
- transition fente - ligne de transmission

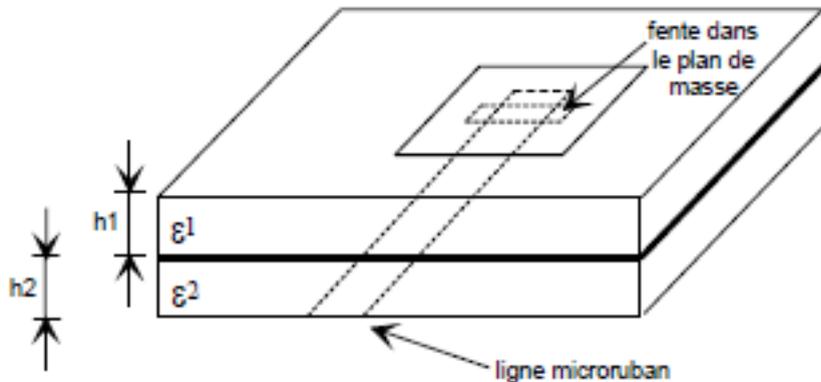
## Guide d'onde coplanaire



- mêmes avantages que cas précédent
- faible rayonnement arrière
- transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et de circuits MMIC

- génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires après une discontinuité (coude ou tés) nécessitant des ponts à air en millimétrique

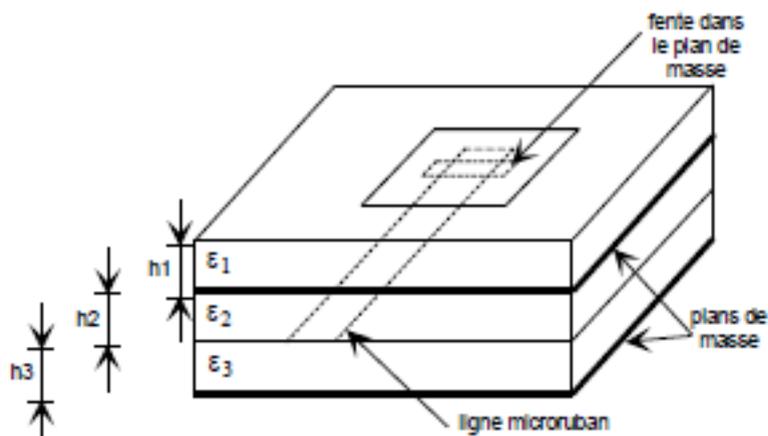
## Couplage par fente



- réalisations du circuit de distribution et de l'aérien indépendantes
- séparation électromagnétique des deux couches
- possibilité d'élargir la bande en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente

- technologie plus coûteuse et complexe (positionnement des 2 couches, 4 faces de métallisation)
- intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions
- rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément

## Couplage par fente d'une ligne encastrée



- mêmes avantages que cas précédent
- rayonnement arrière nul

- technologie très coûteuse
- apparition possible de modes parasites microrubans de propagation entre le ruban conducteur et le plan de masse de la fente