

Introduction générale

Aujourd'hui, les systèmes de communication sans fil sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive des câbles. Bien que les connexions à haut-débit de type ADSL se multiplient dans le monde, elles ne permettent pas la souplesse d'utilisation que procure un réseau radio sans fil. Pour améliorer la qualité de service qu'ils offrent, les chercheurs préparent l'arrivée de la future génération baptisée 4^{ème} génération (4G)

Les différents systèmes de communication mis en place auront donc besoin d'antennes de plus en plus compactes, fonctionnant sur une ou plusieurs fréquences, permettant notamment d'assurer la compatibilité des différentes normes ou d'accéder à de nombreux services à partir du même appareil.

Le but de ce stage est donc de concevoir dans un premier temps une antenne multi-bande couvrant les bandes LTE (800-1800-2600) pour l'Europe. Cette antenne doit être compatible avec dimension standard d'un Smartphone (120 x 50mm²). Dans un second temps, deux systèmes antennaires MIMO 2x1 et MIMO à quatre antennes seront conçues en utilisant comme brique de base l'antenne multi-bande précédente.

Ce rapport est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, des généralités sur les antennes et leurs caractéristiques ainsi que la technique MIMO et son principe sont donnés.

Dans le second chapitre nous présenterons la norme LTE, son principe de fonctionnement, son architecture ainsi que ses bandes de fréquence. Dans la littérature scientifique, plusieurs antennes ont été proposées pour le système LTE.

Le troisième chapitre sera consacré pour la simulation et pour la réalisation d'une antenne tri-bande compacte fonctionnant dans les trois bandes LTE réservées pour l'Europe (800/1800/2600 MHz).

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons dimensionné et simulé un système multi-antennaire multi-bande fonctionnant dans les bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Afin d'avoir des bonnes performances en termes d'isolation deux techniques ont été investiguées : ligne de séparation et ligne de neutralisation. Cette dernière a été sélectionnée pour ses bonnes performances et deux systèmes multi-antennaires à base de cette ligne ont été conçus : une configuration 2x1 et configuration à quatre antennes.

1.1 Introduction :

Un dispositif permettant de transformer une onde électrique en une onde électromagnétique, et vice et versa, est appelé ANTENNE. En d'autres mots, l'antenne permet d'assurer la transmission d'énergie entre une source et l'espace libre dans lequel cette énergie va se propager. L'utilisation de deux antennes, l'une en émission et l'autre en réception permet de transmettre des informations sans avoir besoin d'éléments porteurs comme des fils, des guides, etc...

Dans ce chapitre, nous avons en premier lieu présenté quelques généralités sur les antennes et leur caractéristique. Ensuite, nous présentons la technique MIMO, son principe ainsi que son architecture.

1.2 Généralités sur les antennes [1-2]

Les systèmes de télécommunications utilisés permettant généralement l'échange d'informations dans différents milieux naturels, peuvent être décomposés en deux parties : une partie servant au traitement des signaux électriques contenant les informations à transmettre et une seconde partie permet la transformation de ces signaux électriques en ondes électromagnétique rayonnées dans l'espace. Cette dernière fonction est réalisée par des dispositifs appelés « antennes ».

1.2.1 Définition d'une antenne

Une antenne est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement.

Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un dispositif qui

permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques. Elle transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception.

Il y a beaucoup de types d'antennes Figure 1.1 présenté Quelques types d'antennes :

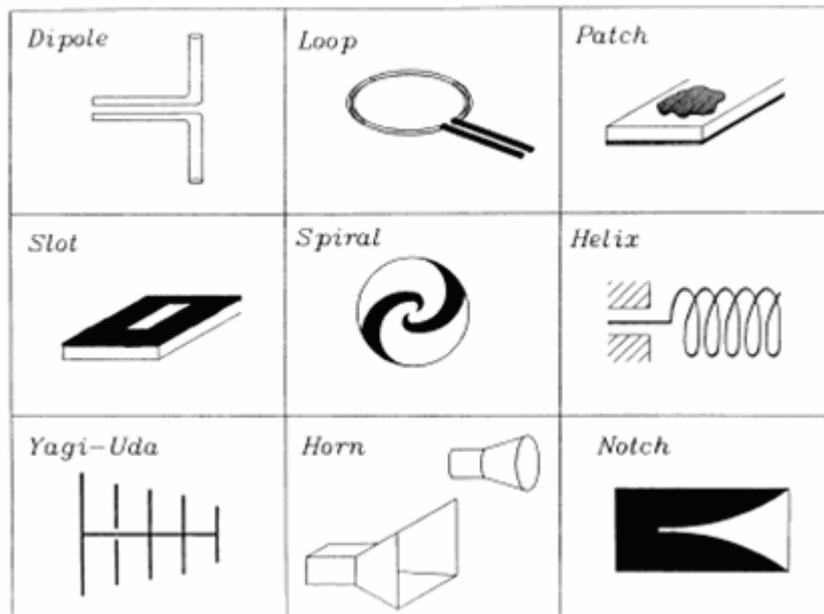


Figure 1.1 : Quelques types d'antennes [3]

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

- ❖ permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation
- ❖ assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- ❖ transmettre le plus fidèlement possible une information

Par ailleurs, afin de décrire les caractéristiques et les performances des antennes, divers paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont classés en deux groupes. Le premier groupe caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique (Z_{in} et S_{11}) et le second groupe s'intéresse à ses propriétés de rayonnement, tel que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain.

1.2.2 Caractéristiques principales [1-4]

Généralement, ces paramètres électriques définissent l'antenne comme élément de circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'apprécier la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation mais nous ne définirons que les trois principaux, à savoir l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et le rapport d'onde stationnaire.

1.2.2.a. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée (notée Z_e) est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes. Elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présenté à l'entrée (voir figure 1.2).

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (1.1)$$

où :

R = Résistance de l'antenne

X = Réactance de l'antenne

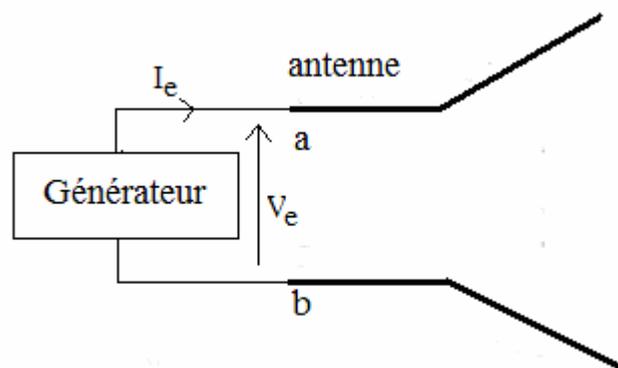


Figure 1.2 : Antenne en mode émetteur [3]

1.2.2.b. Coefficient de réflexion

On dit qu'une antenne est parfaitement adaptée lorsque son impédance d'entrée (Z_e) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c), sinon on démontre qu'il apparaît un coefficient de réflexion Γ (ou S_{11}).

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} = \frac{\text{Onde réfléchie}}{\text{Onde incidente}} \quad (1.2)$$

Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log_{10} (|\Gamma|) \quad (1.3)$$

1.2.2.c. Directivité

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope (P_r).

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{p(\theta, \phi)}{P_r} \quad (1.4)$$

La directivité maximale que l'on appelle souvent directivité est donnée par :

$$D_0 = \text{MAX}(D(\theta, \phi)) \quad (1.5)$$

La directivité, grandeur sans dimension, est généralement exprimée par sa valeur en décibels :

$$D|_{\text{dB}} = 10 \log D_0 \quad (1.6)$$

1.2.2.d. Gain

Le gain $G(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_A} \quad (1.7)$$

P_A = puissance fournie par l'émetteur.

Généralement la valeur maximum de $G(\theta, \phi)$ prend la dénomination du gain de l'antenne.

$$G_0 = \text{MAX}(G(\theta, \phi)) \quad (1.8)$$

Le gain peut être exprimé en décibels :

$$G|_{\text{dB}} = 10 \log G_0 \quad (1.9)$$

Une antenne isotrope n'a pas de gain, donc $G = 0$ dB. (C'est une antenne imaginaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions).

Une antenne dipôle possède un gain de 2,15 dB par rapport à l'antenne isotrope. On dit aussi qu'elle a un gain de 2,15 dBi.

1.2.2.e. Diagramme de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, ϕ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. La fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \phi)$ est donnée comme suit :

$$r(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{p_0(\theta, \phi)} \quad (1.12)$$

← Puissance rayonnée dans une direction quelconque
← Puissance rayonnée max

La figure 1.3 montre plusieurs types de représentation de diagrammes de rayonnement.

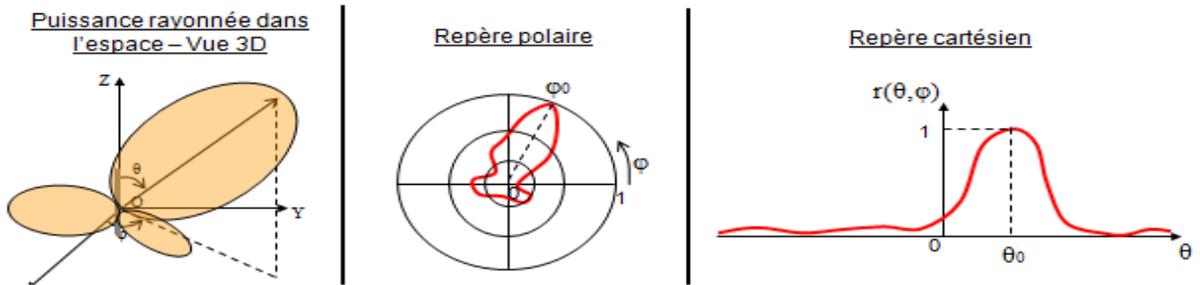


Figure 1.3 : Différentes manières de représenter le diagramme de rayonnement [4]

1.2.2.f. Angle d'ouverture à -3dB

L'angle d'ouverture à -3 dB caractérise la largeur du lobe principal. Il représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Un exemple d'un diagramme de rayonnement avec son angle d'ouverture est illustré par la figure 1.4.

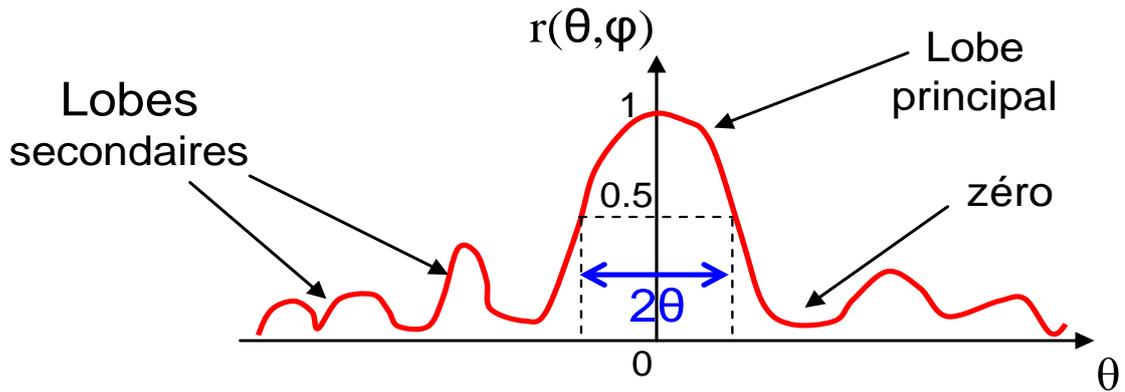


Figure 1.4 : Diagramme de rayonnement montrant l'angle d'ouverture à -3dB [3]

1.2.2.g. Différentes zones de rayonnement

On distingue trois zones de rayonnement d'une antenne : zone de Rayleigh, zone de Fresnel et zone de Fraunhofer. La figure 1.5 montre la variation de la densité de puissance en fonction de la distance r pour les trois zones. D représente le diamètre de la surface équivalente de l'antenne tandis que λ est la longueur d'onde.

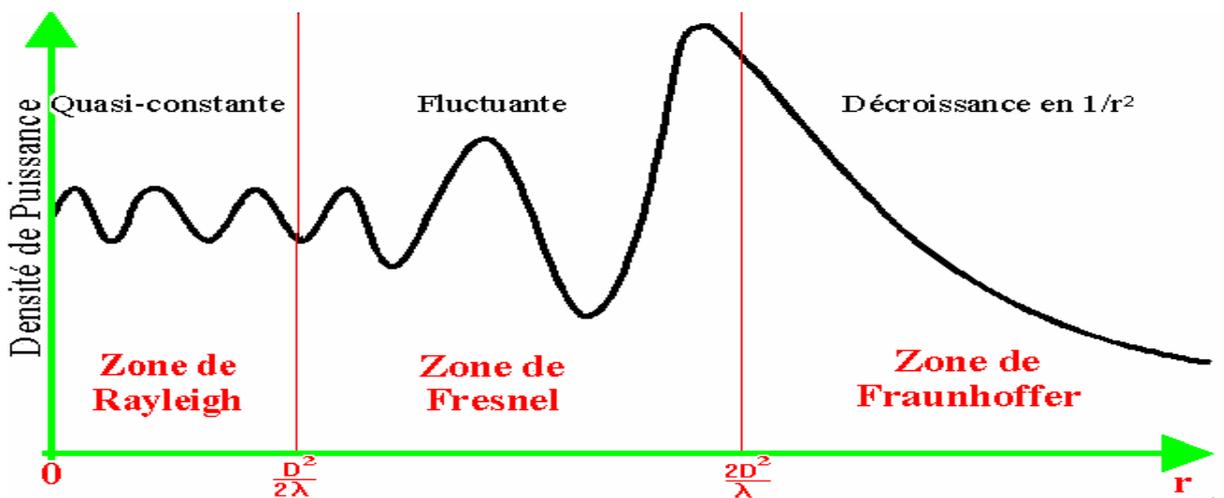


Figure 1.5 : Zones de rayonnement d'une antenne [4]

➤ 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), $r < \frac{D^2}{2\lambda}$ la densité de puissance est quasi constante.

➤ **Zone de Fresnel :**

Dans la seconde zone, i.e., $\frac{D^2}{2\lambda} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$, la densité de puissance est fluctuante.

➤ **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'onde (quasiment) plane.

Dans cette zone, i.e., $r > \frac{2D^2}{\lambda}$, la densité de puissance décroît en $1/r^2$.

1.3 Technique MIMO

1.3.1 Principe de la technique MIMO [5]

Multiple-Input Multiple-Output ou MIMO est une technique utilisée dans les réseaux sans fil et les réseaux mobiles permettant des transferts de données à plus longue portée et à plus grande vitesse. En effet, dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (Single-Input Single-Output ou SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output) (figure 1.6). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes.

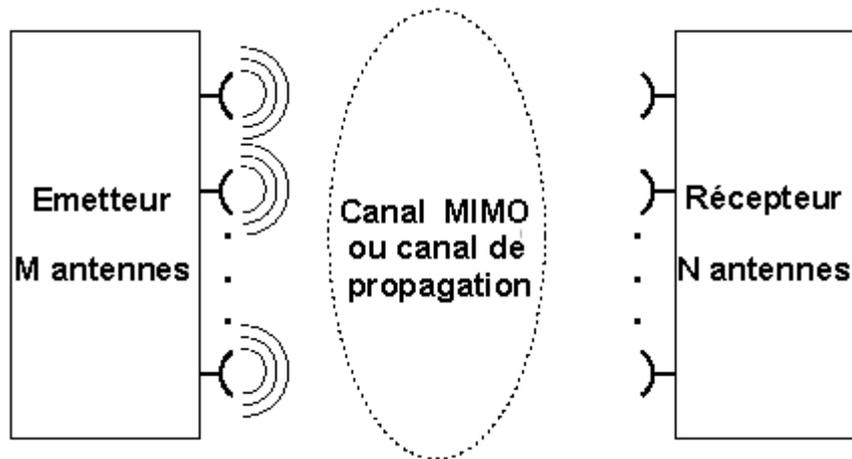


Figure 1.6: Principe de la technique MIMO [5]

1.3.2 Architecture MIMO [6]

De part le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer plusieurs configurations (systèmes). Cependant, ces architectures et particulièrement l'architecture MIMO, utilisent différentes fonctions de traitement du signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc. Ceci afin de permettre une meilleure performance du dispositif antenne.

1.3.2.a Système SISO (Single Input Single Output)

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception.

1.3.2.b Système MISO (Multiple Input Single Output)

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire Plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception.

1.3.2.c Système SIMO (Single Input Multiple Output)

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal.

1.3.2.d Système MIMO

La technologie MIMO permet de :

- Augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception.
- Contrer l'évanouissement du canal.
- Minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal.

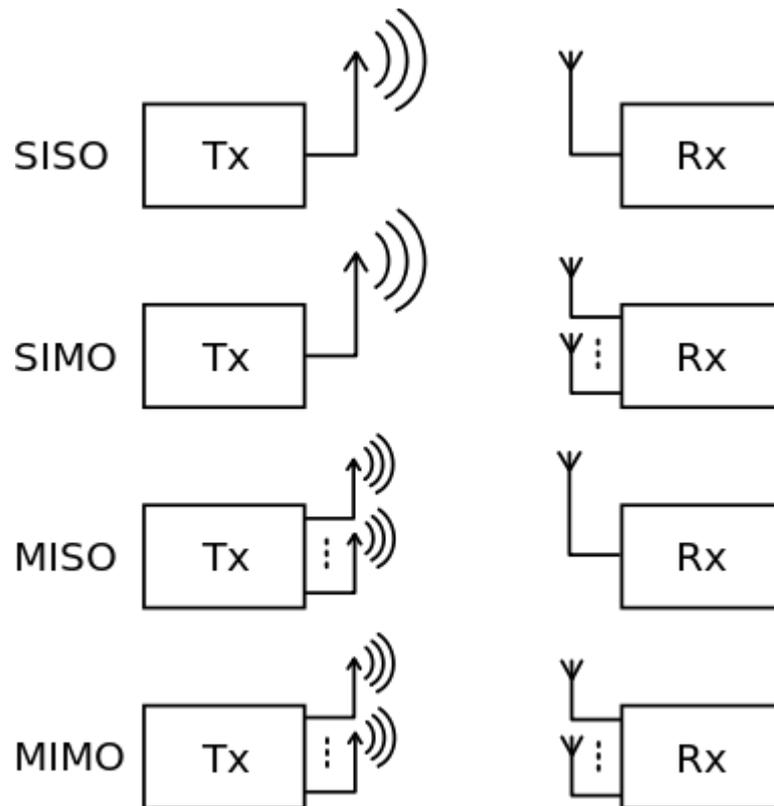


Figure 1.7 : Différence entre SISO, SIMO, MISO et MIMO [7]

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement quelques généralités sur les antennes en donnant leurs caractéristiques principales. Ensuite, le principe de la technique MIMO ainsi que son architecture ont été présentés.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la norme LTE la dernière génération de réseaux mobile.

Chapitre 2 Généralités sur la norme LTE

2.1 Introduction

La norme LTE (Long Term Evolution) est la norme de communication mobile qui est proposée par l'organisme 3GPP (3rd Generation Partnership Project) dans le contexte de la 4G. Le LTE définit l'évolution technologique des réseaux de télécommunications cellulaires pour les années à venir. Le LTE propose des débits élevés, et un meilleur niveau de QoS pour ses abonnés en introduisant de nouvelles architectures du réseau et en employant des nouvelles technologies comme l'OFDMA, le SC-FDMA et le MIMO. Maintenant, le LTE a été choisi par la plupart des opérateurs de téléphonie mobile dans le monde [8].

Dans ce chapitre, l'évolution vers le 4G et la norme LTE sera détaillée dans un premier temps. son architecture et ses bandes de fréquence

2.2 L'évolution vers le 4G [9]

Un réseau mobile est un réseau de communication composé de cellules, généralement considérées de la forme hexagonale. Ces cellules sont toutes juxtaposées l'une à l'autre afin d'assurer une meilleure couverture de la zone géographique considérée. Ces cellules peuvent être de tailles variables. En se basant sur cette répartition cellulaire, les réseaux mobiles opèrent en mode infrastructure, où tous les échanges transitent par un point d'accès, la station de base, desservant chacune une cellule sur une couverture sans fil donnée. Plusieurs générations de réseaux mobiles se sont défilées à travers le temps. Ce sont la 1G avec un mode de transmission analogique, la 2G qui marqua le passage à l'ère numérique, la 3G qui permet d'intégrer des services de voix et de données, ces dernières années, les recherches portent surtout sur l'analyse des réseaux de quatrième génération (4G).

2.3 Généralités sur la norme LTE

2.3.1 LTE (Long Term Evolution) [7]-[10]

Le LTE est une des technologies de la quatrième génération des communications mobiles développé sur différentes bandes de fréquences, Le LTE est concrètement la future évolution des systèmes de télécommunications mobiles et améliore la capacité et la rapidité des réseaux de téléphonie mobile par l'utilisation de différentes technologies comme la technique MIMO.

Les nouvelles normes LTE visent à améliorer l'efficacité spectrale, à diminuer la latence, à augmenter la performance du réseau, à offrir des débits élevés en situation de mobilité à grande ou faible vitesse, à permettre et à faciliter l'interconnexion et l'interopérabilité entre différentes technologies existantes et à réduire les coûts de déploiement et d'exploitation en introduisant de nouvelles architectures et technologies.

Le LTE est basé sur des techniques radios telles que la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant, la technique SC-FDMA (Single Carrier –Frequency Division Multiple Access) Pour le sens montant et la technique MIMO Pour l'émission-réception.

Les largeurs de bande du LTE peuvent s'étendre de 4 à 20 MHz en liaison montante comme en liaison descendante, ce qui permet à un opérateur d'adapter cette technologie aux bandes de fréquence qu'il possède. En outre, l'architecture MIMO contribue à augmenter les débits de transfert de données du LTE en autorisant plusieurs chemins de signaux.

Le LTE annonce un changement major dans la connexion mobile : des vitesses de connexion équivalentes à 100/50Mbps, davantage de services, une latence plus faible, une structure simplifiée et une optimisation du réseau pour les échanges de données sans séparation du canal audio à commutation de circuit, la figure 1.6 Montre le déploiement en 2014 de la norme LTE dans le monde.

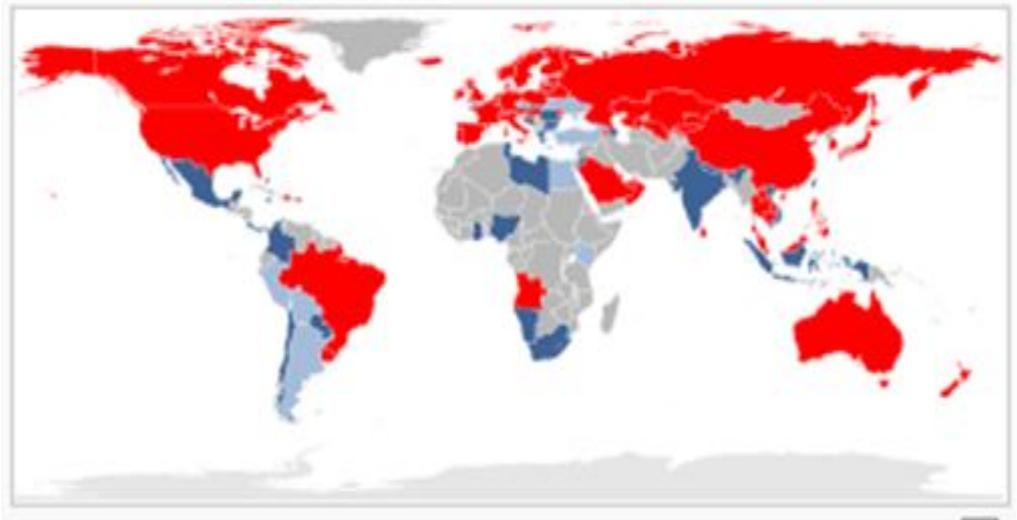


Figure 2. 1: Pays équipés 2014 de réseaux mobiles LTE : réseaux commerciaux en rouge, réseaux en cours de déploiement en bleu foncé, réseaux en test en bleu clair [11]

Le tableau suivant illustre quelques caractéristiques de la technologie LTE :

Caractéristique	Description
Flexibilité de la bande passante :	La norme LTE permet une bande passante extensible de 1,4 à 20 MHz, offrant une flexibilité à l'opérateur lors de l'utilisation du spectre.
Orthogonalité du DownLink et UpLink :	La liaison montante et la liaison descendante des utilisateurs, sont orthogonales entre elles (pas d'interférence intracellulaire)
Modulation et codage adaptatif :	Selon la qualité du canal, le LTE utilise les schémas de modulation et après plusieurs des systèmes de codage dans chaque modulation : <ul style="list-style-type: none"> • Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) • 16-Etat Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) • 64-Etat Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM)

FDD et TDD :	LTE utilise FDD et TDD.
La technologie d'antenne :	La technologie MIMO est utilisée dans la liaison descendante pour permettre d'améliorer le débit

Tableau 2.1 :Caractéristiques LTE [7]

2.3.2 Terminaux [12]

Les terminaux LTE peuvent être des téléphones (Smartphones), des tablettes, des clés-Modems USB ou tout autre type d'équipements fixes ou mobiles (GPS, ordinateur, écran vidéo, ...).Le 3GPPa défini 5 classes de terminaux LTE correspondant aux débits maximaux (montant et descendant) que doit supporter l'équipement et au type d'antenne qu'il intègre. Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques de ses classes:

Catégorie		1	2	3	4	5
Débit (Mbps)	DownLink	10	50	100	150	300
	UpLink	5	25	50	50	75
Bande passante		1.4 à 20 MHz				
Modulations	Downlink	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	Uplink	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Antennes	MIMO 2*2	non	oui			
	MIMI+O 4*4	Non				oui

Tableau 2.2 : Classes des terminaux LTE [12]

2.3.3 Architecture du réseau LTE [13]

Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences hertziennes, y compris dans les cellules radio mitoyennes, grâce aux codages radio OFDMA et SC-FDMA. Ceci permet d'affecter à chaque cellule une largeur spectrale plus importante, variant de 3 à 20 MHz et donc d'avoir une bande passante plus importante et plus de débit dans chaque cellule. La

figure (1.7) représente l'architecture générale du réseau LTE et la figure (1.8) Représente la modulation OFDMA et SC-FDMA.

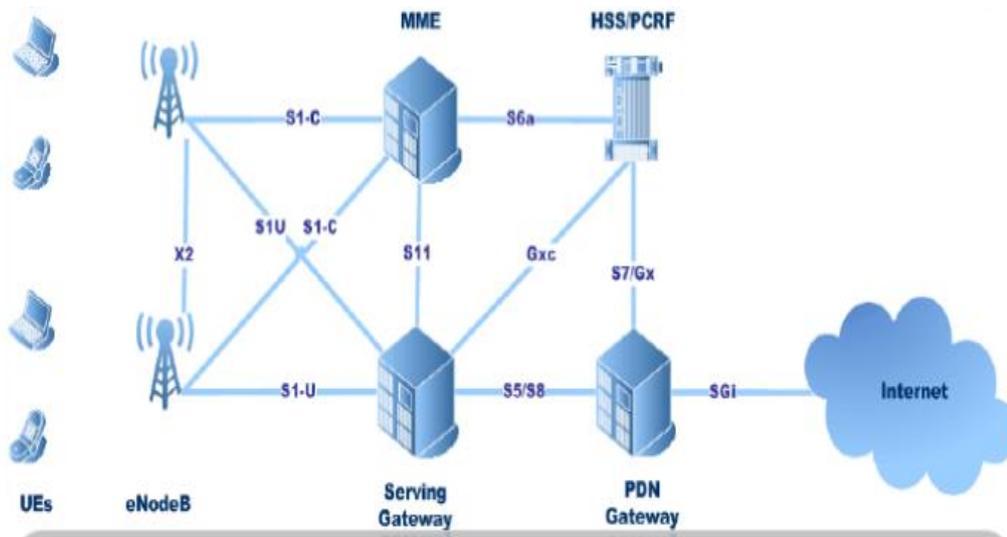


Figure 2.2 : Architecture générale du réseau LTE [12]

2.4 Les bandes de fréquence pour différentes régions du monde

La norme LTE couvre une gamme de plusieurs bandes différentes, dont chacune est désignée à la fois par une fréquence et un numéro de bande. En Amérique du Nord, 700, 850, 1900, 1700/2100 (AWS) et 2600 MHz; 2500 MHz en Amérique du Sud; 800, 900, 1800, 2600 MHz en Europe; 800 ,1800 et 2600 MHz en Asie; et 1800 MHz et 2300 MHz en Australie et la Nouvelle-Zélande. En conséquence, les téléphones d'un pays peuvent ne pas fonctionner dans d'autres pays. Les utilisateurs auront besoin d'un téléphone capable multi-bande pour l'itinérance internationale [14].

La figure 2.5 fait la synthèse des bandes de fréquences allouées pour le standard LTE pour différentes régions du monde.

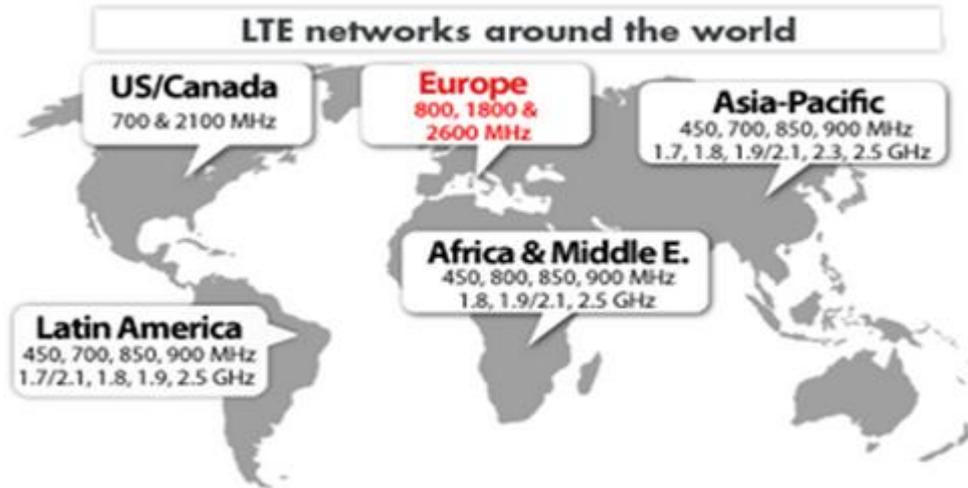


Figure 2.3 : Bandes de fréquences allouées à la norme LTE

2.5 Etat de l'art sur les antennes compactes LTE

Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes sont résumés dans le Tableau 2.3.

Titre de la publication	Fréquence MHz	Taille	Aperçu de l'antenne	Référence
Compact Dual-Band Monopole Antenna for LTE Mobile Phones	700 et 2500	120x50 mm ²		[15]
An 800 MHz compact MIMO Antenna System For LTE Handsets	760	40x50 mm ²		[16]

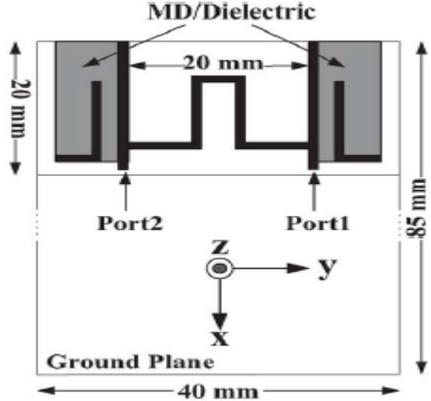
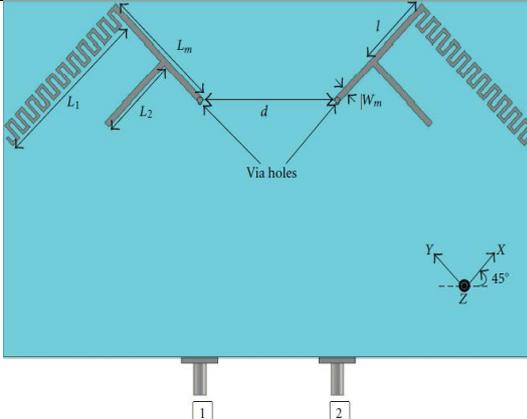
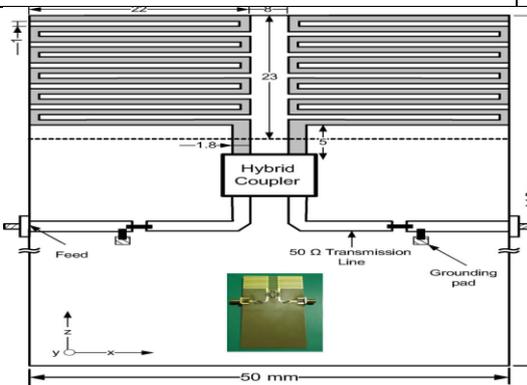
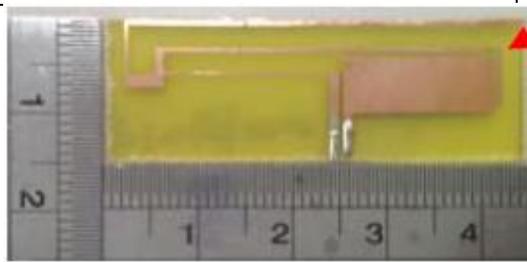
<p>Quad-Band Monopole Antenna Including LTE 700 Mhz With Magneto-Dielectric Material</p>	<p>700</p>	<p>40x85 mm²</p>		<p>[21]</p>
<p>Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications</p>	<p>700–862 Et 2.5-2.69</p>	<p>140 × 83 mm²</p>		<p>[22]</p>
<p>Compact Antenna Array With Port Decoupling For LTE-Standardized Mobile Phones</p>	<p>710</p>	<p>110x 50 mm²</p>		<p>[23]</p>
<p>Planar Compact LTE/WWAN Monopole Antenna for Tablet Computer Application</p>	<p>700 et 2690</p>	<p>45 × 15 mm²</p>		<p>[24]</p>

Tableau 2.3 : Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes LTE

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction générale au standard LTE, son principe de fonctionnement ainsi que son architecture et Les bandes de fréquence allouées pour cette norme. Dans la littérature scientifique, plusieurs antennes ont été proposées pour le système LTE. La problématique était principalement la couverture de plusieurs bandes et la réduction de l'encombrement des antennes. Dans le chapitre suivant, nous présenterons la Conception d'une antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE 800/1800/2600 MHz.

Chapitre 3 : Conception d'une antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE 800/1800/2600 MHz

3.1 Introduction

La multiplicité des bandes dans les systèmes de télécommunication mobile a engendré des besoins d'antennes multi-bandes performantes et surtout de taille réduite afin d'être facilement intégrées dans les terminaux mobiles de plus en plus compacts.

Il s'agit dans ce chapitre de concevoir une antenne tri-bande compacte fonctionnant dans les trois bandes LTE réservées pour l'Europe (800/1800/2600 MHz). Cette antenne doit présenter une taille compacte ($<120 \times 50 \text{mm}^2$) afin qu'elle puisse être intégrée dans des terminaux mobile de taille d'un Smartphone.

Notre choix s'est porté sur quelques antennes imprimées omniprésentes dans notre vie quotidienne et très utilisées dans différents domaines à savoir l'antenne patch et l' antenne monopole imprimée. Afin de satisfaire les spécifications en termes de taille, cette dernière a été compactée à l'aide de profils irréguliers de type Méandre. Le comportement multi-bande a été obtenu en ajoutant un élément annexe à cette antenne.

Nous terminons ce chapitre par la réalisation du prototype retenu. Les résultats de mesure confirment les bonnes performances prédites par la simulation.

3.2 Antenne mono-bande pour LTE800

Dans cette partie on s'intéressera à la conception d'une antenne mono-bande travaillant dans la bande européenne la plus basse du système LTE à savoir 800 MHz. La fréquence de fonctionnement étant inversement proportionnelle à la taille de l'antenne, le choix de la bande 800 MHz permet d'estimer dans une certaine mesure la taille maximale occupée par l'antenne.

L'outil de conception utilisé est IE3D adapté à la simulation électromagnétique des antennes imprimées. Plus de détails sur cet outil sont présentés en Annexe.

Trois antennes imprimées ont été dimensionnées à 800 MHz : une antenne patch, une antenne monopole imprimé et enfin une antenne monopole imprimée compacte. Enfin, les performances et la taille des ces trois antennes ont été comparés.

3.2.1 Antenne patch

3.2.1.a. Rappels sur les antennes patch rectangulaires [25]

Une antenne patch, dans sa forme la plus simple, consiste en un élément rayonnant d'un côté du substrat diélectrique et d'un plan de masse de l'autre côté. Dans sa version rectangulaire (voir figure 3.1), cette antenne est constituée d'un élément rayonnant de forme rectangulaire de longueur L et de largeur W , imprimé sur un substrat d'une épaisseur h et de permittivité ϵ_r . L'élément rayonnant peut être alimenté de plusieurs façons : ligne micro-ruban, ligne coaxiale ou par coulage. La figure 3.1 montre la technique d'excitation à l'aide de ligne micro-ruban.

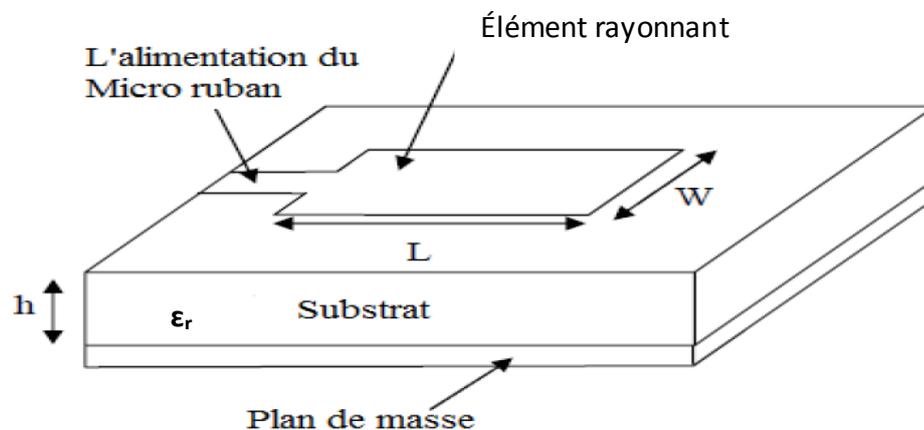


Figure 3.1 : Exemple d'une antenne patch de type rectangulaire [25]

Nous savons que la propagation des ondes dans un linge micro-ruban s'effectue, à la fois, dans le milieu diélectrique et dans l'air.

L'expression de la permittivité effective (ϵ_{reff}) est donnée par Balanis [26] comme suit :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} - \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \quad (3.1)$$

avec

ϵ_{reff} : Constante diélectrique effective

ϵ_r : Constante diélectrique

h : Epaisseur du substrat diélectrique

W : Largeur du patch

L'expression de la fréquence de résonance du mode (m,n) est donnée comme suit :

$$f_{m,n} = \sqrt{\left(\frac{m}{w_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (3.2)$$

m et n : modes de cavités, entiers >0

L_{eff} : longueur effective du patch

W_{eff} : largeur effective du patch

et

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.813\right)} \quad (3.3)$$

Δw s'obtient en remplaçant la largeur W par la longueur L dans l'équation (3.3).

La largeur du patch W est donnée comme suit :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (3.4)$$

Ou le terme f_{01} représente la fréquence du mode fondamentale de l'antenne.

Pour permettre un bon rendement de l'antenne , une longueur pratique est égale à :

$$L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

L'équation qui sert à déterminer l'impédance d'entrée du patch à une distance y_0 du bord du patch est la suivante :

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2G_r} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) \quad (3.6)$$

Avec

$$G_r = \frac{w}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (3.7)$$

Et

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3.8)$$

Tel que λ_0 est la longueur d'onde en espace libre.

3.2.1.b. Simulation électromagnétique de l'antenne patch

Le substrat choisi pour la simulation de cette antenne est de type FR4 avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$ et une épaisseur $h=1.6\text{mm}$. Les dimensions analytiques d'un patch fonctionnant à 800 Mhz issues des équations de la partie précédente sont résumées dans le tableau 3.1. La largeur de la ligne d'excitation (W_f) de type micro-ruban a été prise égale 3.05mm afin d'assurer une impédance caractéristique de 50 Ω .

Le modèle de simulation sur IE3D du patch est montré par la figure 3.2.

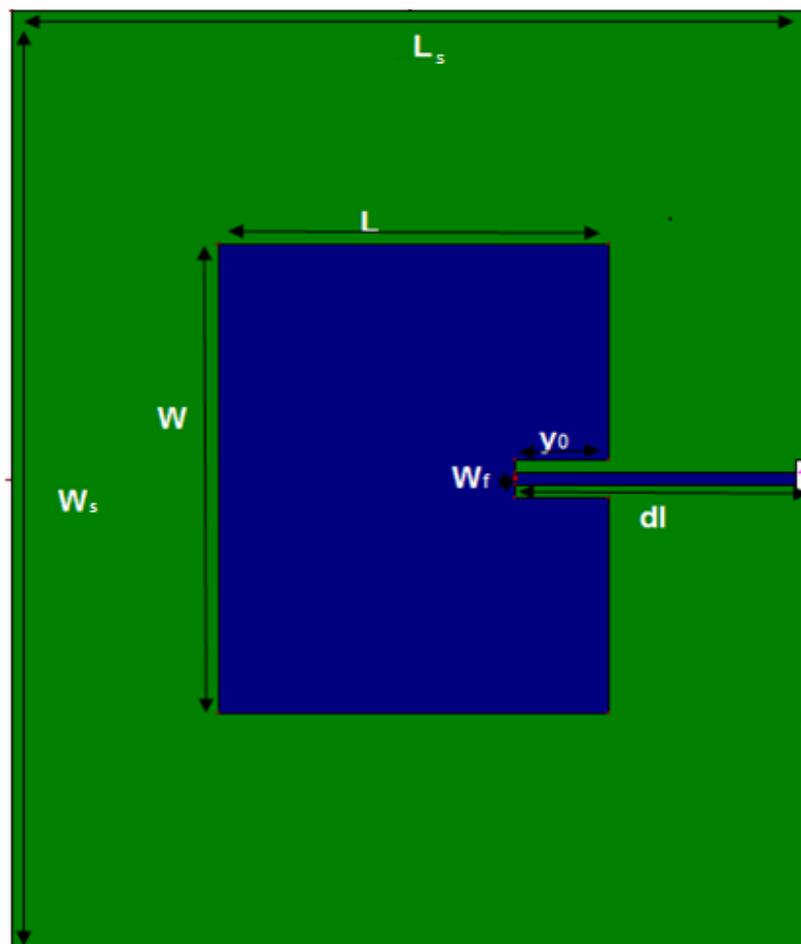


Figure 3.2 : Géométrie d'antenne patch sous IE3D

Paramètres	W	L	Y_0	d_l	W_f	W_s	L_s
Valeurs (mm)	114	89.24	20	64	3.05	228	178.86

Tableau 3.1 : Dimensions théoriques de l'antenne patch pour LTE800

La simulation a été réalisée avec plan de masse de dimension finie. Nous avons choisi un plan de masse de grandeur deux fois supérieure à la dimension du patch.

Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne patch ayant les dimensions théoriques du tableau 3.1 est illustré par la figure 3.3.

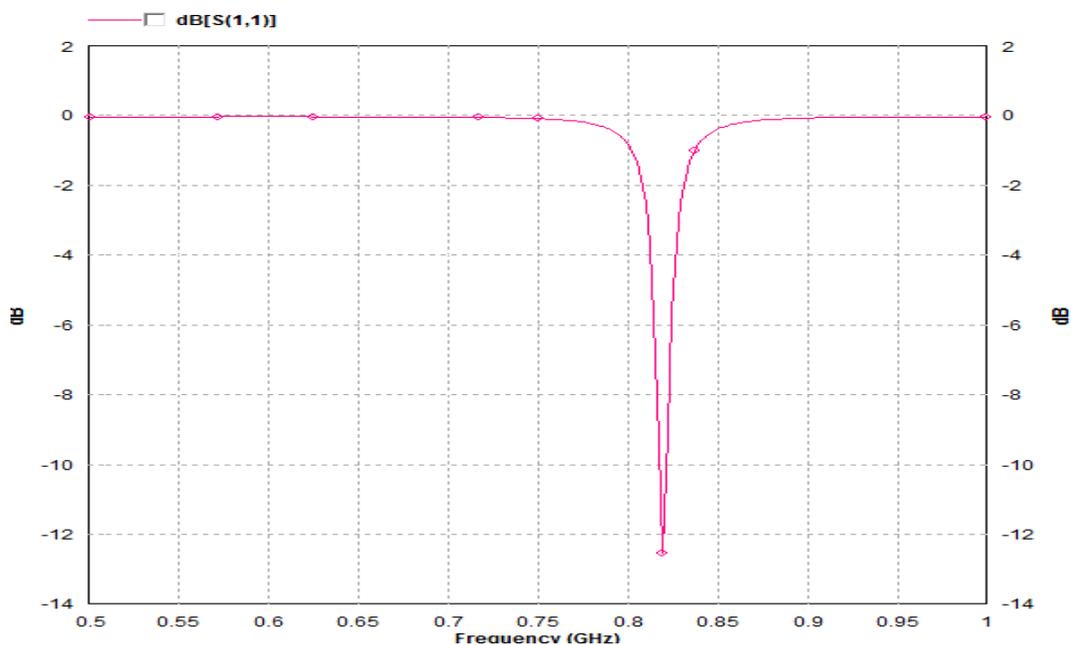


Figure 3.3 : Coefficient de réflexion d'antenne patch avec dimensions théoriques

La figure 3.3 montre un décalage de la fréquence de fonctionnement. En effet, au lieu d'obtenir une fréquence centrée sur 800 Mhz, la simulation indique une fréquence de 830 Mhz. Les nouvelles dimensions optimisées pour retrouver la fréquence de fonctionnement sont données dans le tableau 3.2.

Paramètre	W	L	W_f	d_l	Y_0	W_s	L_s
Valeurs (mm)	114	91.94	3.05	66	22	228	178.86

Tableau 3.2 : Dimension de l'antenne patch après optimisation sur IE3D

Les résultats obtenus pour le comportement du coefficient de réflexion sont illustrés dans la figure 3.4.

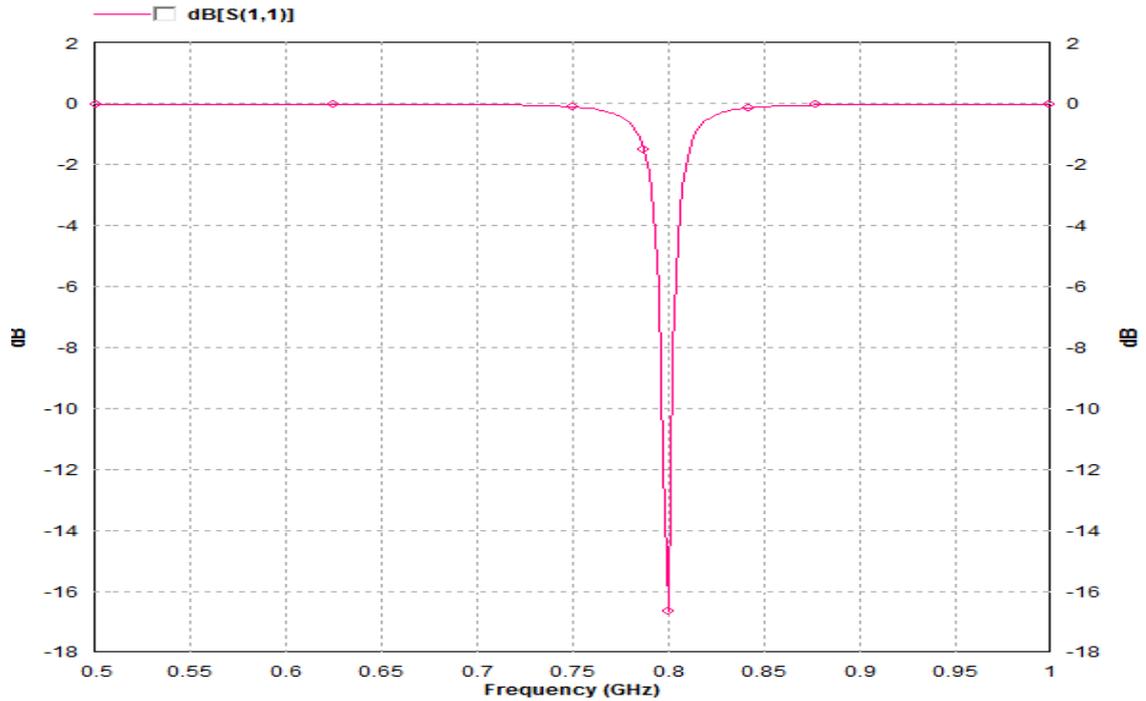


Figure 3.4 : Coefficient de réflexion d'antenne patch optimisée

L'analyse de ces résultats (figure 3.4), indique que la fréquence est maintenant centrée à 800 MHz avec une bonne adaptation ($|S_{11}|_{dB} = -17$ dB), et avec une bande passante assez étroite 0.375%.

Les figures 3.5 et 3.6 montrent les diagrammes de rayonnement 3D et 2D respectivement. Le gain maximal de cette antenne est de 5.03 dBi

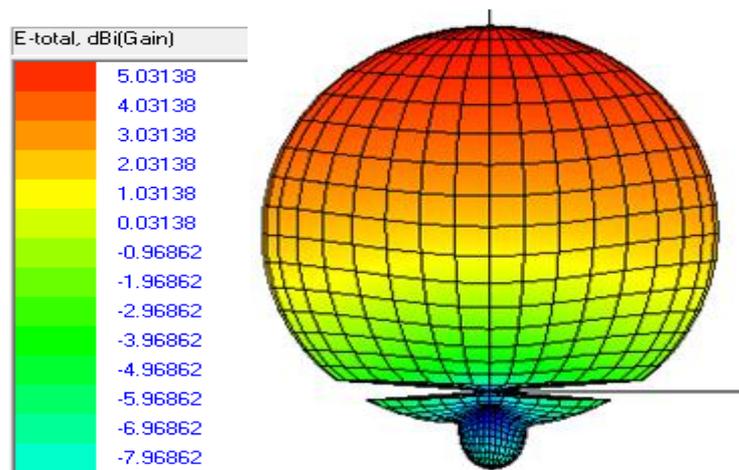


Figure 3.5 : Représentation du diagramme de rayonnement en 3D

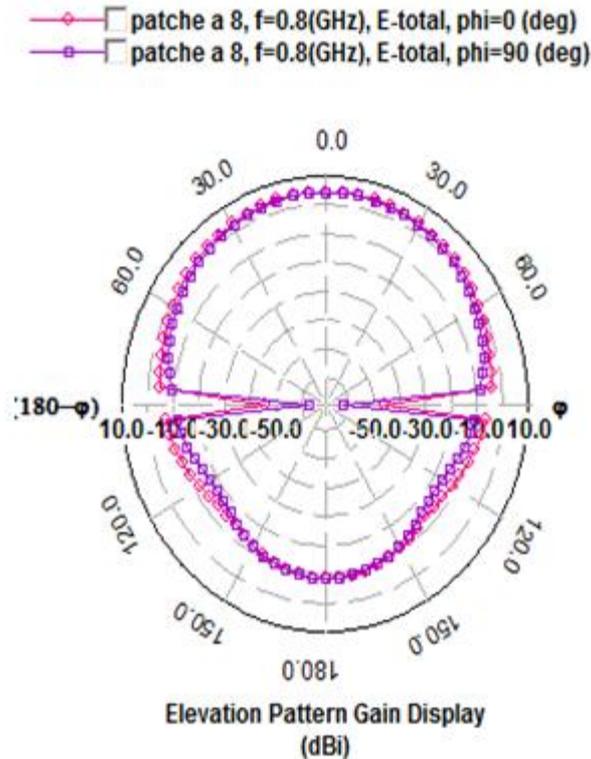


Figure 3.6 : Représentation du diagramme de rayonnement en 2D

Le diagramme de rayonnement obtenu est celui d'une antenne patch classique avec un rayonnement unilatéral du à la présence d'un plan de masse au dessous de l'antenne.

Malgré les bonnes performances affichées par l'antenne patch, sa dimension ($228 \times 178.86 \text{mm}^2$) reste très encombrante et ne permet pas ainsi son intégration dans les Smartphones actuels.

Pour cette raison, nous nous intéresserons dans la suite à un autre type d'antenne qui est le monopole imprimé.

3.2.2 Antenne monopole imprimée

Une des antennes les plus largement utilisées et cela dès la création des systèmes de communication mobiles est l'antenne monopole. Les antennes monopoles ont une forme très simple, d'un fouet d'une hauteur de $\lambda/4$ au-dessus d'un plan de masse, théoriquement infini.

Pour des raisons d'intégration et de fabrication aisée des versions monopoles imprimés peuvent également être utilisés. La figure 3.7 montre une antenne monopole

imprimée sous l'interface d'IE3D. Elle rayonne en polarisation linéaire et avec un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel.

Le substrat utilisé pour la conception de l'antenne monopole imprimée est de type Ro4003c de permittivité relative $\epsilon_r = 3.55$ et d'épaisseur $h = 0.508$ mm.

Dans un premier temps, nous avons simulé une antenne monopole imprimée de longueur $L_1 = \lambda/4$ (voir Figure 3.7). Tel que λ est la longueur d'onde en espace libre à 800 MHz. Ceci donne une longueur L_1 égale à 93mm. La dimension du plan de masse a été prise égale à $L_p = 96$ mm x $W = 50$ mm tandis que la largeur (W_1) du monopôle est fixée à 0.5 mm. Le coefficient de réflexion correspondant est illustré par la figure 3.8.

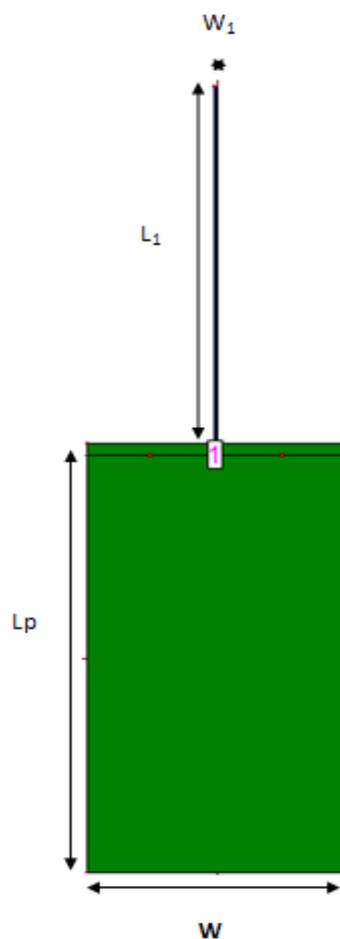


Figure 3.7 : La configuration de l'antenne monopole imprimé

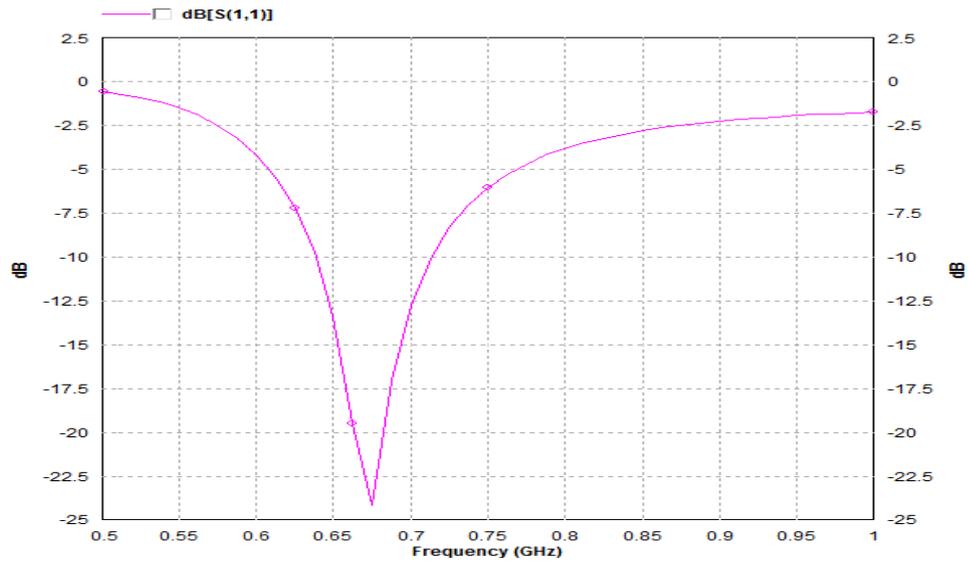


Figure 3.8 : Le coefficient de réflexion d'antenne monopole imprimé théorique

Dans la figure 3.8, on remarque que la fréquence de résonance est centrée sur 675 MHz au lieu des 800 MHz attendus. L'ajustement de la longueur L_1 (premier responsable de la fréquence de résonance) est donc nécessaire afin de corriger ce décalage. La nouvelle longueur obtenue par simulation est $L_1=75$ mm. Le nouveau coefficient de réflexion de l'antenne est présenté par la figure 3.9.

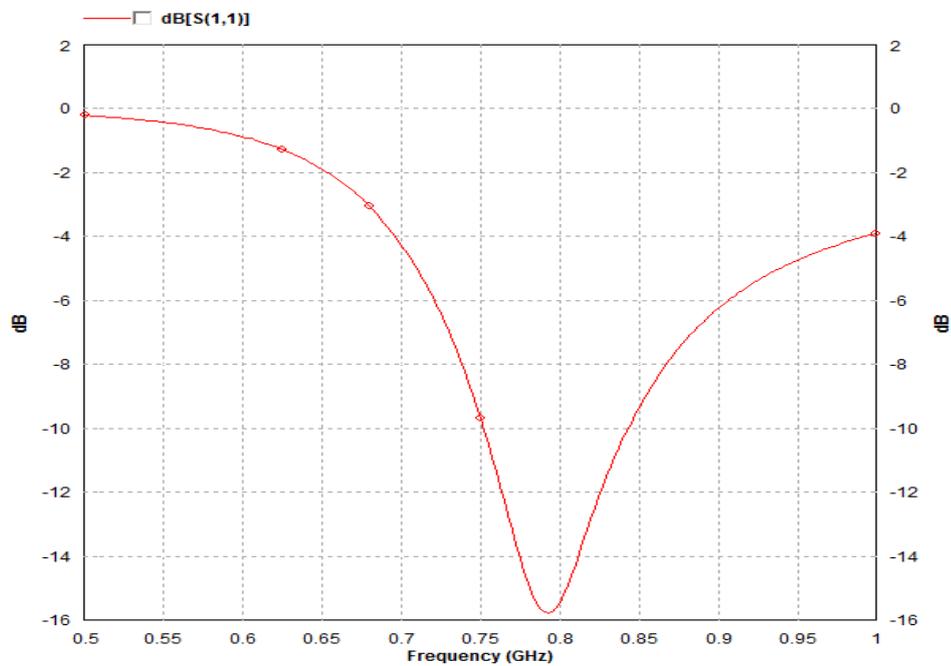


Figure 3.9 : Le Coefficient de réflexion de l'antenne monopole optimisée

A la fréquence de résonance, i.e., 800MHz, on enregistre un coefficient de réflexion $|S_{11}| = -16$ dB et une bande passante de 11.60%.

Les figures 3.10 et 3.11 montrent le diagramme de rayonnement de l'antenne monopole à 800 Mhz en 3D et 2D respectivement.

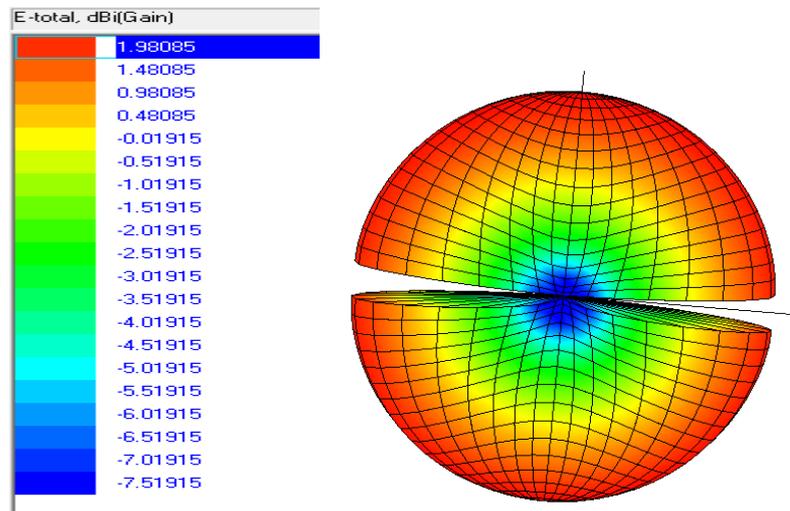


Figure 3.10: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne monopole imprimée

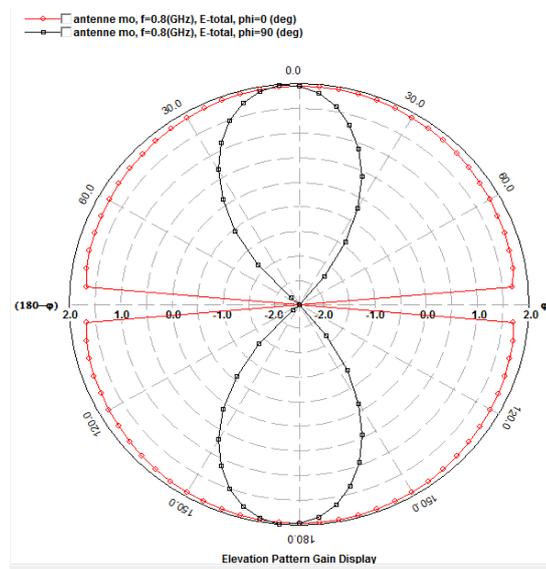


Figure 3.11 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne monopole imprimée

A partir des figure 3.10 et 3.11, on constate un gain maximal de l'antenne de 1.98 dBi avec un rayonnement de type omnidirectionnel.

Malgré les bonnes performances obtenues par l'antenne monopole, sa dimension totale ($171 \times 50 \text{ mm}^2$) reste encombrante et ne permet pas ainsi son intégration dans les Smartphones actuels. Afin de remédier à cet inconvénient, nous avons proposé dans la partie suivante l'utilisation de la technique du méandre pour la réduction de la taille du monopole.

3.2.3 Antenne monopôle imprimée compacte

Dans cette partie, l'antenne proposée est un monopole imprimé compactée à l'aide de profils irréguliers de type méandre. L'utilisation de tels profils permet de réduire significativement la taille de l'antenne tout en gardant sa longueur électrique presque inchangée (proche d'un quart de longueur d'onde). La figure 3.12 montre la structure de l'antenne monopole compacte. Le substrat utilisé est le même que celui de l'antenne monopole simple précédente ($\epsilon_r = 3.55$ et épaisseur = 0,508 mm). Egalement, les dimensions du plan de masse restent inchangées (taille : $L_p = 96 \text{ mm} \times W = 50 \text{ mm}$).

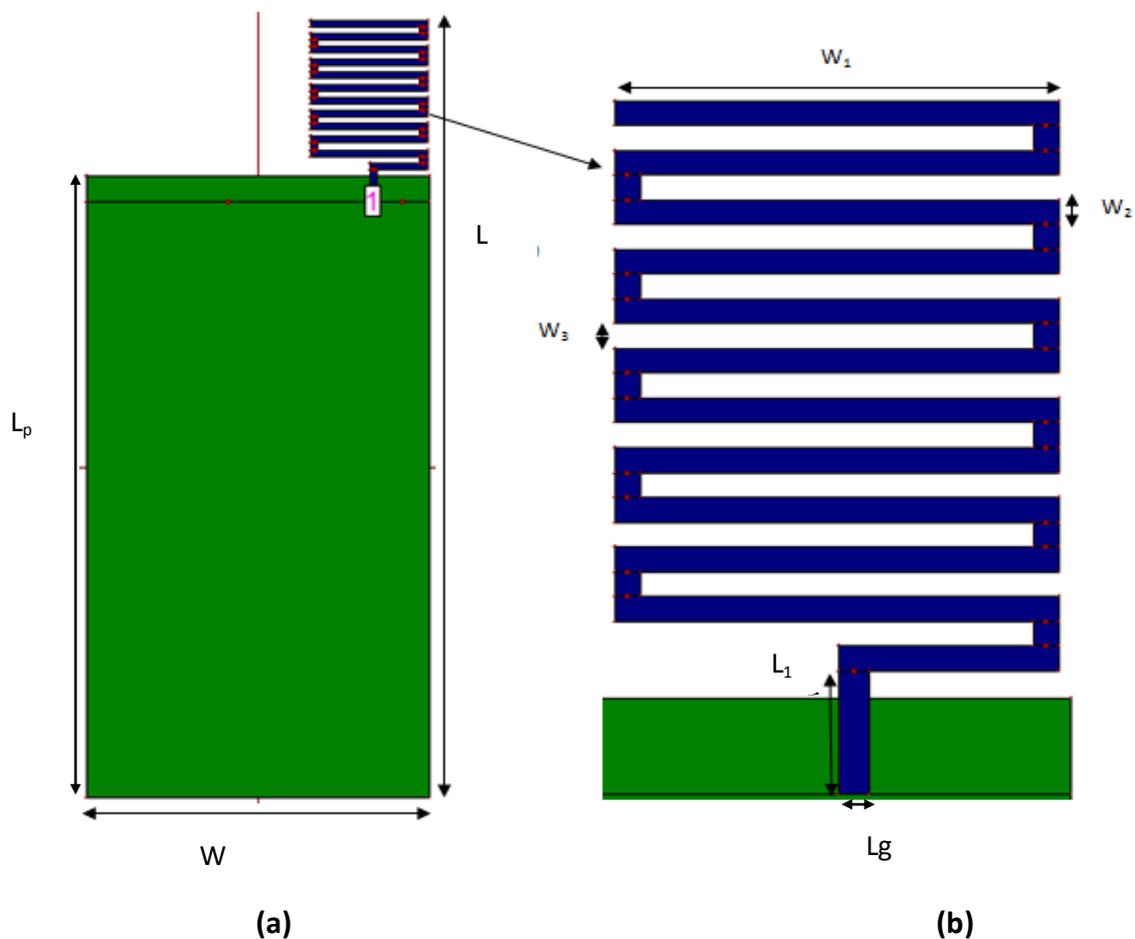


Figure 3.12 : (a) Antenne monopole compacte sous IE3D (b) agrandissement de la partie rayonnante

Pour un fonctionnement à 800 MHz, la partie rayonnante occupe un espace 24x50 mm². La dimension totale de l'antenne (plan de masse + partie rayonnante) égale à L= 120 mm x W =50 mm qui est compatible avec la dimension standard des Smartphones (120x50 mm²) [15]. La largeur de la ligne d'excitation (Lg) de type micro-ruban a été fixé à 1.13mm afin d'assurer une impédance caractéristique de 50 Ω.

En plus de réduire la taille de l'antenne, l'utilisation de méandre permet d'introduire d'autres degrés de liberté pour l'optimisation des performances globales de l'antenne. En effet, les variations des paramètres représentés sur la figure 3.12 (W_1 , W_2 , W_3) permettent d'ajuster plus finement le comportement de l'antenne. Des études paramétriques ont été effectuées pour comprendre les effets des différents paramètres dimensionnels. Cela nous a permis par la suite de bien optimiser l'antenne finale.

La figure 3.13 montre les coefficients de réflexion issus de l'étude paramétrique sur la largeur W_1 . L'étude est faite en variant cette largeur de 11mm à 23mm par des pas de 3mm tout en fixant les autres dimensions (L=120mm, W=50mm, $W_2=1$ mm, $W_3=1$ mm, $L_1=4$ mm, Lg=1.13mm).

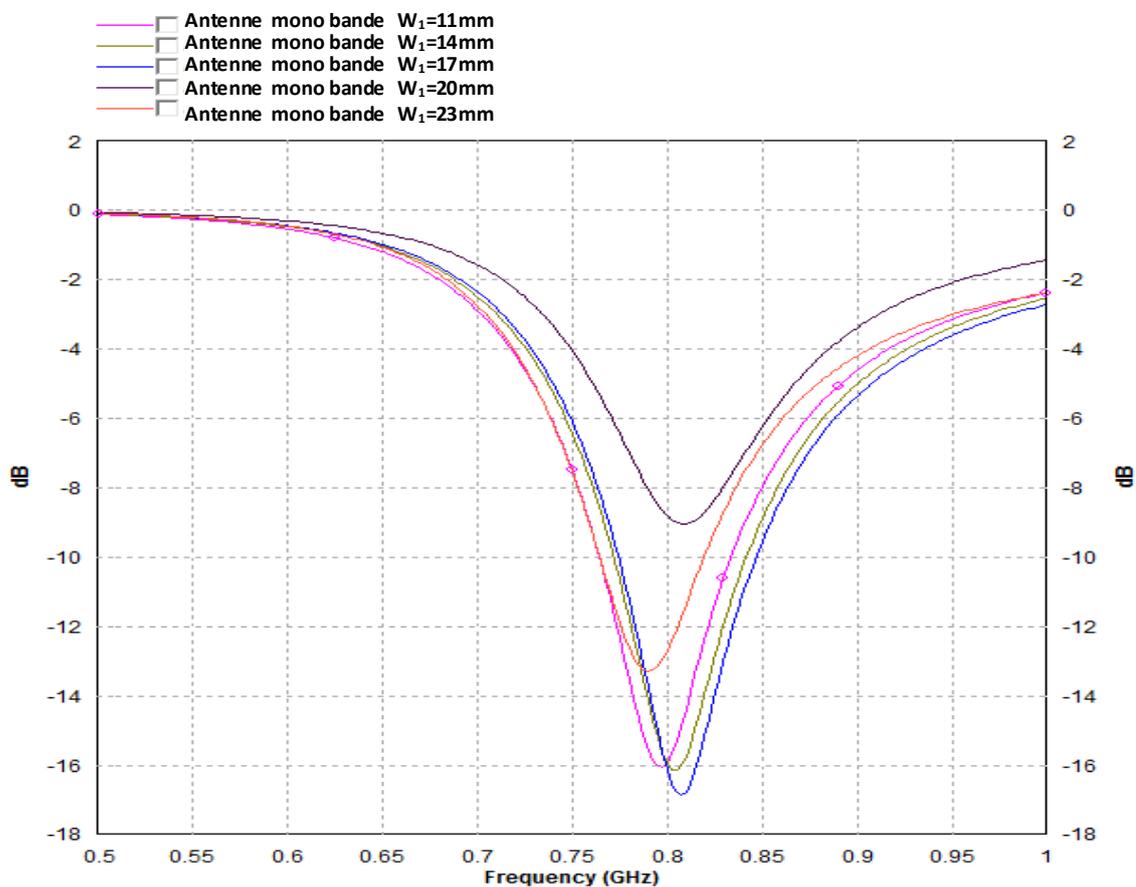


Figure 3.13: Coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_1

On constate que le meilleur résultat en termes d'adaptation est obtenu pour $W_1=17\text{mm}$ avec un $|S_{11}|=-17\text{ dB}$.

Ensuite, une étude paramétrique est effectuée sur les longueurs W_2 (largeur de brin) et W_3 (écart entre brins) en les prenant égales. La figure 3.14 donne les coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_2 et W_3 (tel que $W_2 = W_3$ et varie par pas de 0,5mm de 0,5mm à 1,5mm).

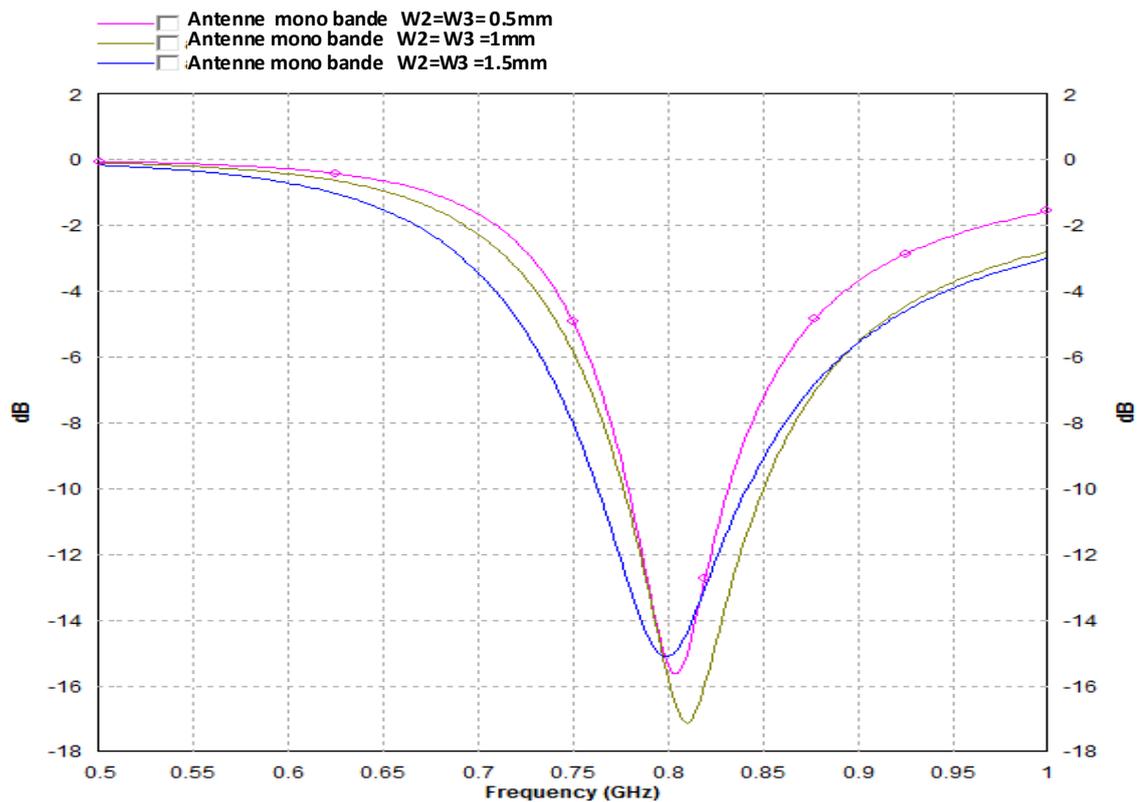


Figure 3.14 : Coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_2 et W_3

La variation du module du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence, montre que W_2 et W_3 influent légèrement sur l'adaptation de l'antenne. La meilleure adaptation est enregistrée pour $W_2=W_3=1\text{mm}$.

Afin d'étudier l'influence de l'endroit d'excitation de l'antenne, une étude a été menée sur la position de celle-ci. Trois positions ont été testées comme illustré sur la figure 3.15. Les coefficients de réflexion correspondants sont représentés sur la figure 3.16.

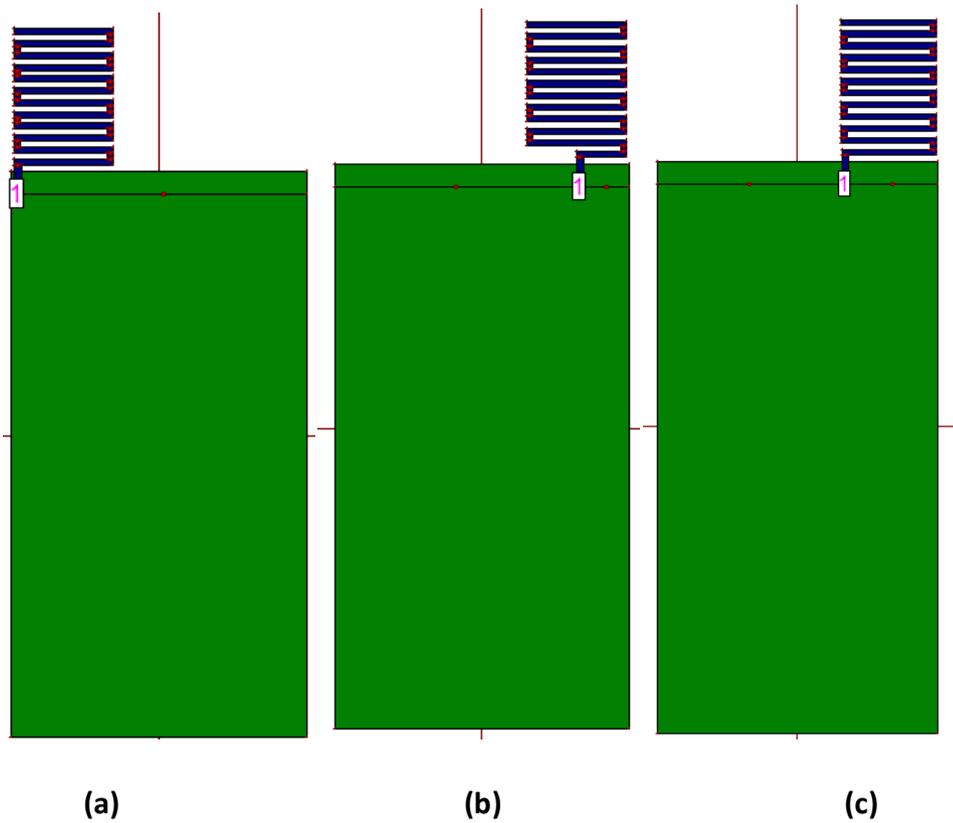


Figure 3.15 : Trois positions pour l'excitation de l'antenne monopole compacte

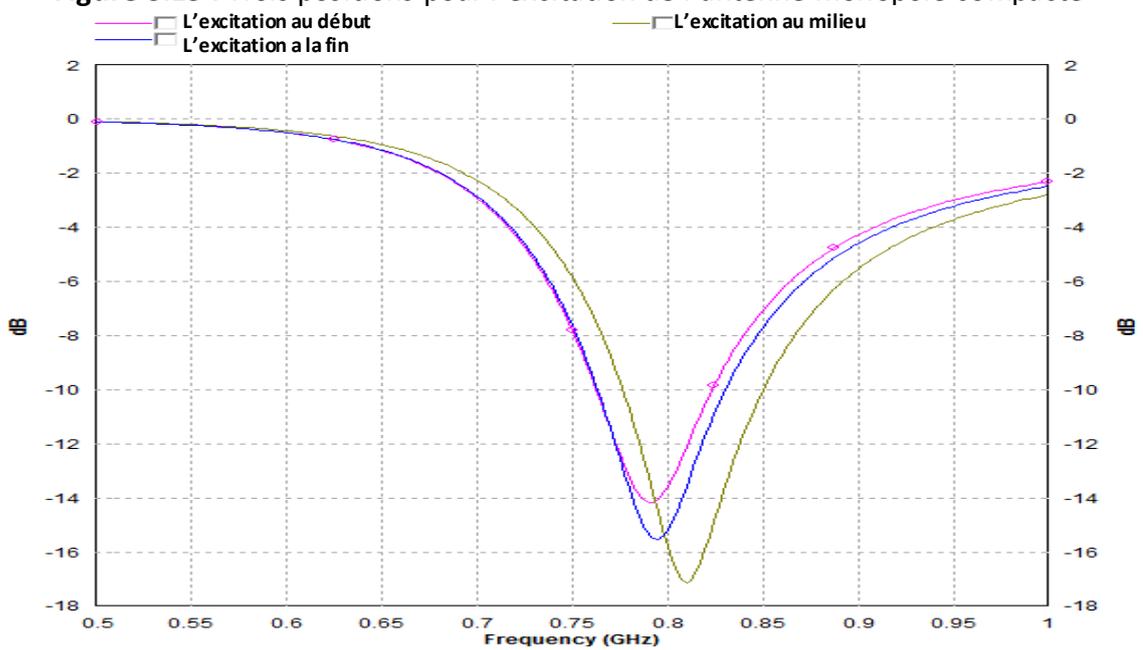


Figure 3.16: Coefficient de réflexion pour différentes positions de l'excitation de l'antenne

La figure 3.16 montre que l'excitation d'antenne a une influence sur le coefficient de réflexion S_{11} . Il est à noter que l'excitation au milieu de l'antenne (Figure 3.15.b) est celle qui possède la meilleure adaptation ($|S_{11}| = -17\text{dB}$).

En se reposant sur ces études paramétriques effectuées sur les paramètres structurels de l'antenne compacte, une solution optimisée fonctionnant à 800 MHz a été identifiée. Ces dimensions sont résumées dans le Tableau 3.3.

Paramètres	W	L	W ₁	L ₁	W ₂ =W ₃	Lg
Valeurs (mm)	50	120	17	4	1	1.13

Tableau3.3 : Dimensions de l'antenne monopole compacte optimisée

Les résultats de simulation obtenus pour l'antenne compacte optimisée sont montrés sur les figures 3.17 ,3.18 et 3.19. La figure 3.17 donne le coefficient de réflexion S₁₁.

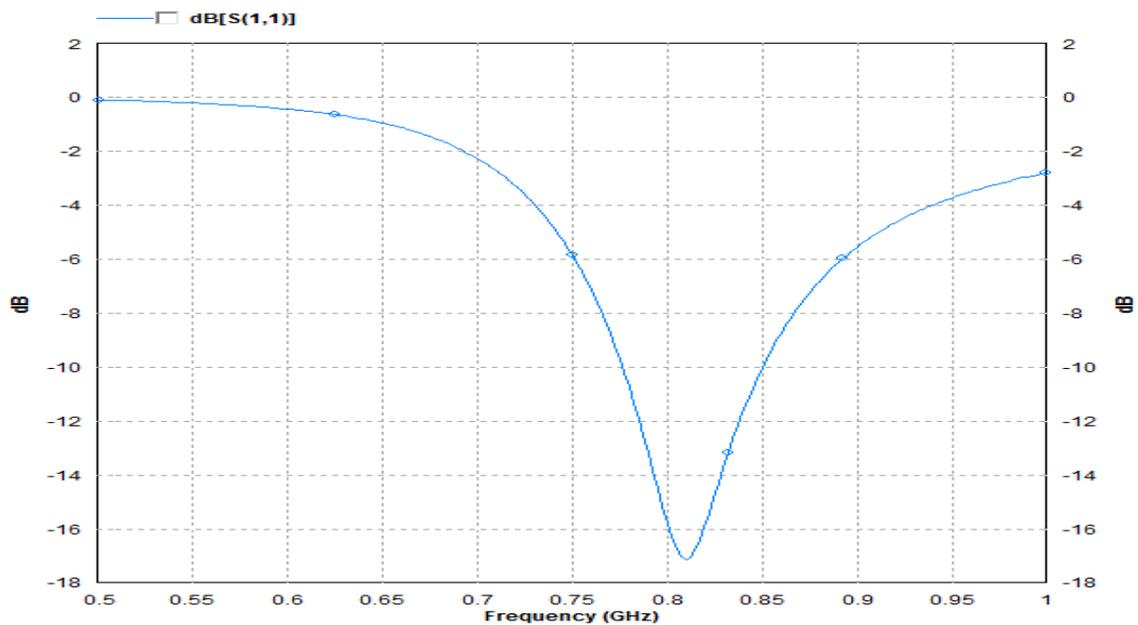


Figure 3.17: Coefficient de réflexion de l'antenne compacte optimisée

Il est à noter que l'antenne est bien adaptée à 800 Mhz car elle présente un ($|s_{11}| = -17$ dB).

Les figures 3.18 et 3.19 montrent le diagramme de rayonnement en 3D et 2D respectivement. De ces figures, le gain maximal de l'antenne est de 1.75 dBi et le rayonnement est de type quasi omnidirectionnel.

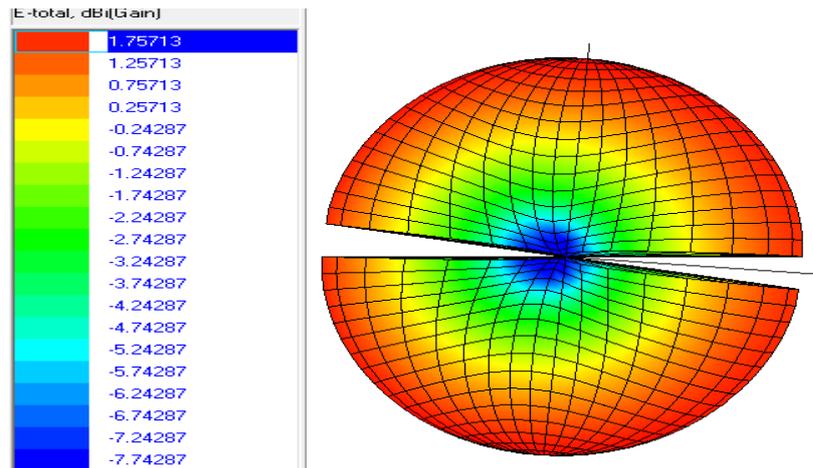


Figure 3.18: Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne monopole compacte

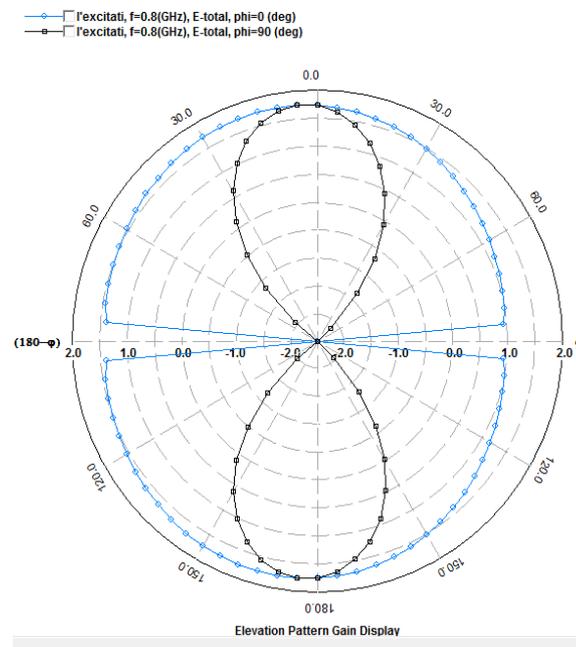


Figure 3. 19: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne monopole compacte

3.2.4 Comparaison des performances

Les performances des trois antennes mono-bande présentées précédemment à savoir l'antenne patch, monopole imprimé et monopole compacte ont été comparées sur le tableau 3.4.

Antenne	Patch	Monopole	monopole compacte
Dimension totale (mm ²)	228x178.86	171x50	120x50
|S ₁₁| (dB)	-17	-16	-17
Bande passante (%)	0.375	11.60	9.04
Type de diagramme	Unilatéral	Quasi-omnidirectionnel	Quasi-omnidirectionnel
Gain (dBi)	5.03	1.98	1.75

Tableau3.4 : Comparaison des performances des trois antennes conçues à 800 MHz

En plus d'être encombrante, l'antenne patch affiche une bande passante très étroite incompatible avec les largeurs des bandes du système LTE.

On constate que l'antenne monopole imprimée compactée à l'aide de méandre est celle qui présente l'encombrement le plus réduit tout en présentant des bonnes performances en termes d'adaptation, bande passante et rayonnement. Pour cette raison, cette antenne compacte sera retenue pour la suite de ce travail.

3.3 Antenne multi-bande pour LTE 800/1800/2600MHz

3.3.1 Conception et simulation

Il s'agit dans cette partie de concevoir une antenne tri-bande travaillant dans les bandes LTE européens : 800MHz ,1800 MHz, 2600MHz.

Notre point de départ était l'antenne monopole imprimée compacte fonctionnant à 800 MHz dimensionnée précédemment. Afin de rendre cette antenne multi-bande, nous lui avons ajouté un élément rayonnant supplémentaire comme indiqué sur la figure 3.20. Les dimensions de l'antenne ont été inchangées et elles sont égales à celles du tableau 3.4. Plusieurs études paramétriques sur cet élément additionnel ont été réalisées. La longueur de l'élément rayonnant additionnel (L_a) a été modifiée de 1 à 15 mm, la valeur optimale trouvée est de 15mm. La largeur de cet élément (W_a) a été variée de 0.5 à 2 mm, la valeur optimale est de 1mm. L'écart entre antenne et élément additionnel (e_a) a été modifié de 0.5 à 2 mm, la valeur optimale trouvée est de 0.5 mm. Les dimensions finales de l'antenne multi bande issues de l'étude paramétrique sont résumées sur le tableau 3.5

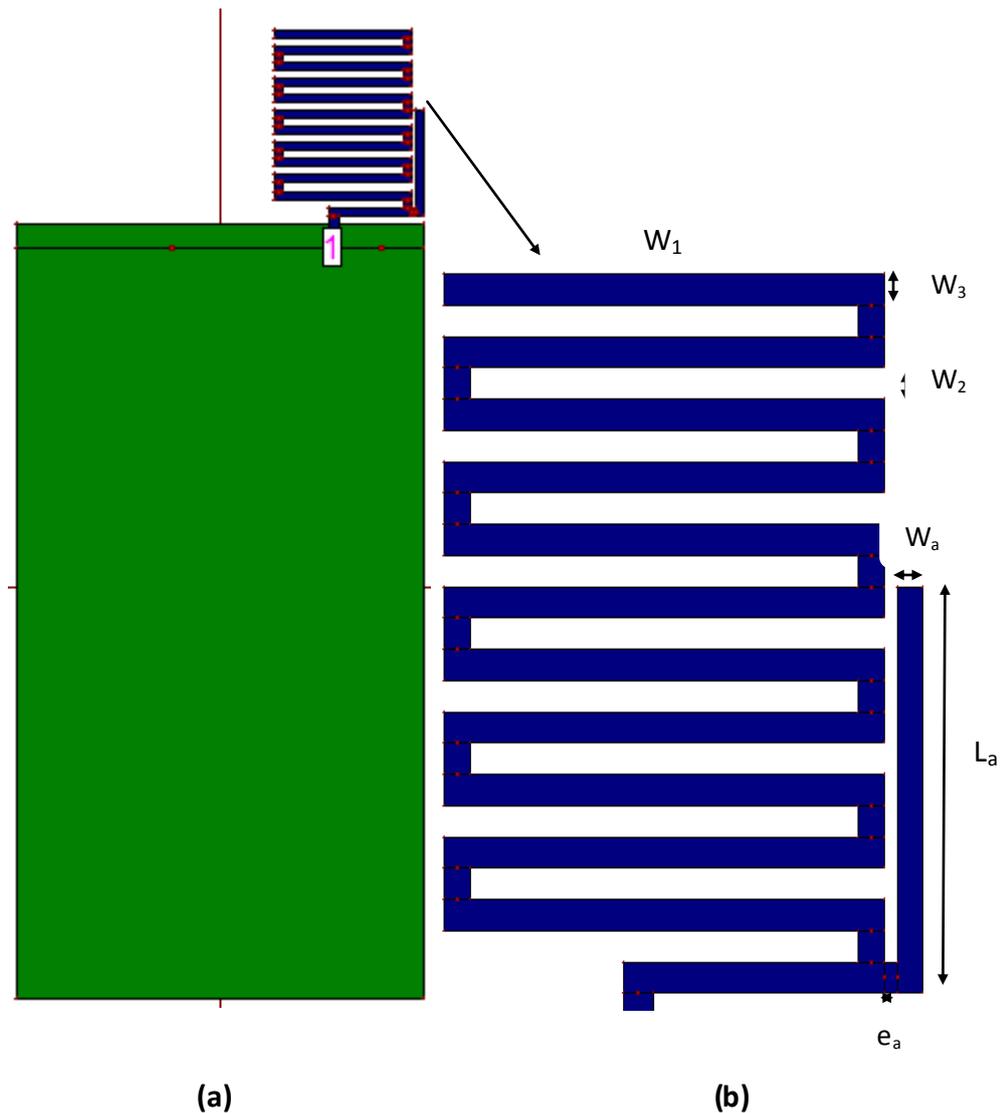


Figure 3.20 : Antenne monopole imprimée avec élément rayonnant additionnel

Paramètres	W	L	W_1	$W_2=W_3$	Lg	L_1	L_a	W_a	e_a
Valeurs (mm)	50	120	17	1	1.13	4	13	1	0.5

Tableau 3.5 : Dimensions de l'antenne monopole compacte tri-bande optimisée

Le coefficient de réflexion obtenu par simulation de l'antenne multi-bande optimisée est présenté sur la figure 3.21. On observe aux trois fréquences LTE 800MHz, 1800 MHz et 2600MHz un coefficient de réflexion ($|S_{11}|$) inférieur à -10 dB. Les bandes passantes des trois bandes sont récapitulées sur le tableau 3.6. On remarque une bande passante très étroite pour la bande 1800 MHz.

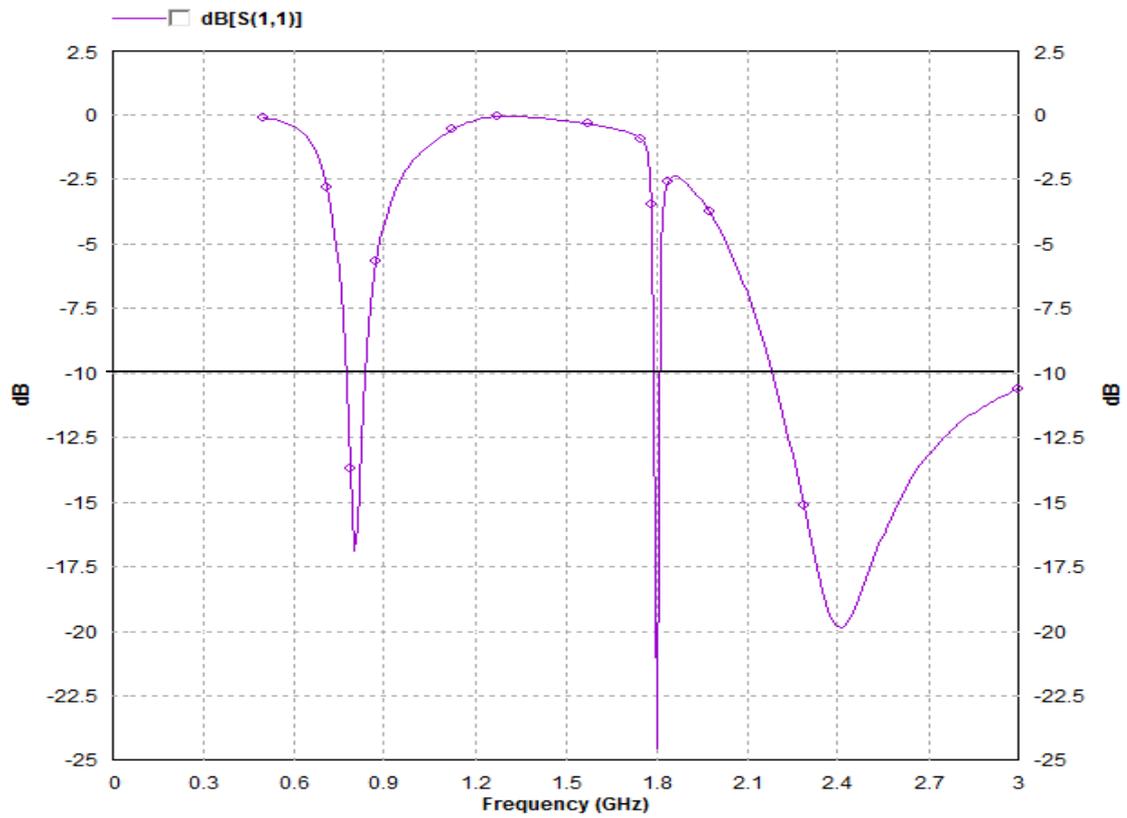
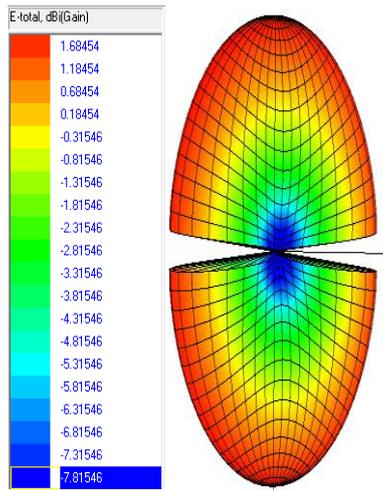


Figure 3.21: Coefficient de réflexion simulé de la structure tri-bande optimisée

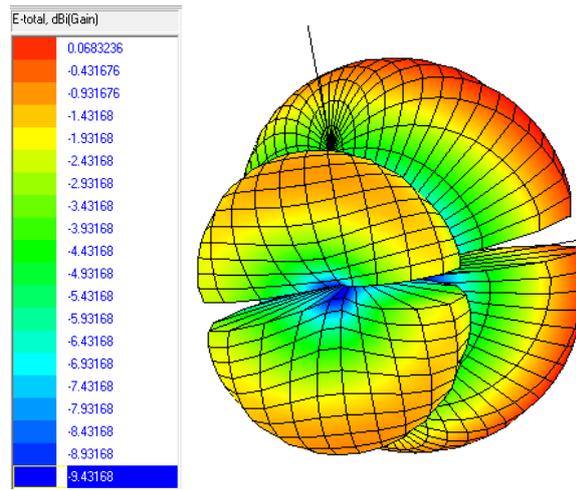
Fréquence (MHz)	800	1800	2600
S_{11} (dB)	-17	-25	-15
Bande passante relative (%)	8.71	1.05	22.69

Tableau3.6 : Performances fréquentielles de l'antenne tri-bande

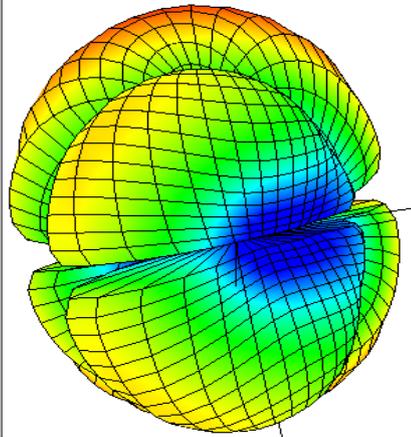
Les figures 3.22 et 3.23 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne tri-bande aux fréquences de fonctionnement 800 MHz ,1800 MHz et 2600 MHz respectivement.



f=800 MHz

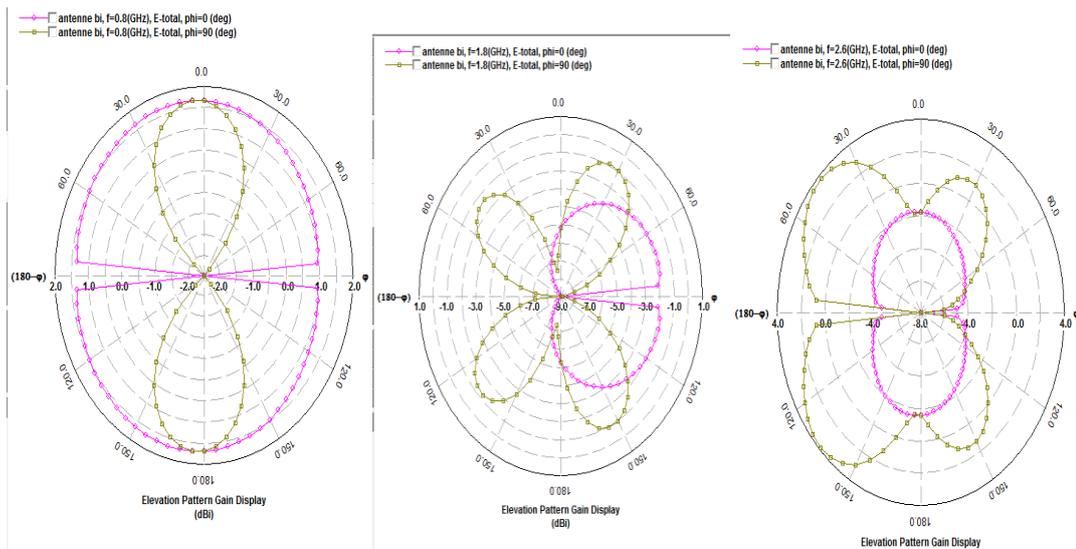


f= 1800 MHz



f=2600 MHz

Figure 3.22 : Représentation du diagramme de rayonnement en 3D



f= 800 MHz

f= 1800 MHz

f= 2600 MHz

Figure 3.23 : Représentation du diagramme de rayonnement en 2D

Pour les deux bandes hautes (1800 et 2600), les digrammes de rayonnement ne sont plus quasi-omnidirectionnels et présentent des lobes secondaires.

3.3.2 Réalisation de l'antenne multi-bande

Afin de confirmer le comportement multi bande de l'antenne décrite précédemment, nous avons décidé de la réaliser. Pour des raisons pratiques d'excitation, nous avons ramené l'excitation de l'antenne vers le bord le plus proche comme indiqué sur la figure 3.23. Ceci ne devrait pas perturber son fonctionnement du moment que la ligne micro-ruban est d'impédance caractéristique égale à 50Ω . Afin de vérifier cette hypothèse nous avons simulé cette nouvelle configuration et son coefficient de réflexion a été comparé avec celui de l'antenne initiale (voir Figure 3.24). De cette simulation, il est à noter que le prolongement de l'excitation vers le bord n'altère pas les deux fréquences basses 800 MHz et 1800 MHz. Cependant, un léger décalage a été enregistré à la fréquence haute 2600 MHz mais cela sans changer la bonne adaptation de l'antenne à cette fréquence.

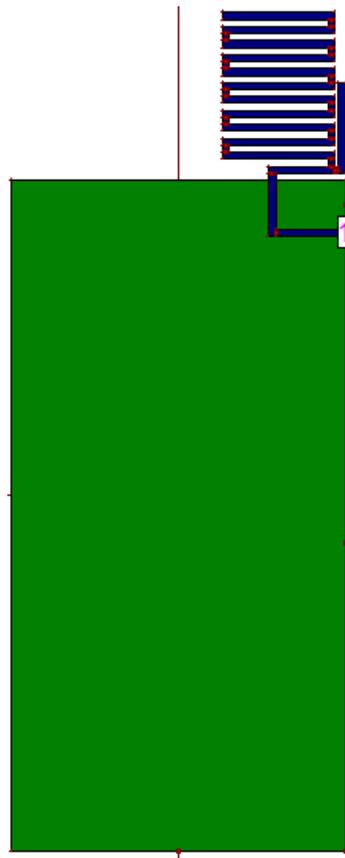


Figure 3.24: Nouvelle configuration facile à exciter de l'antenne multi-bande

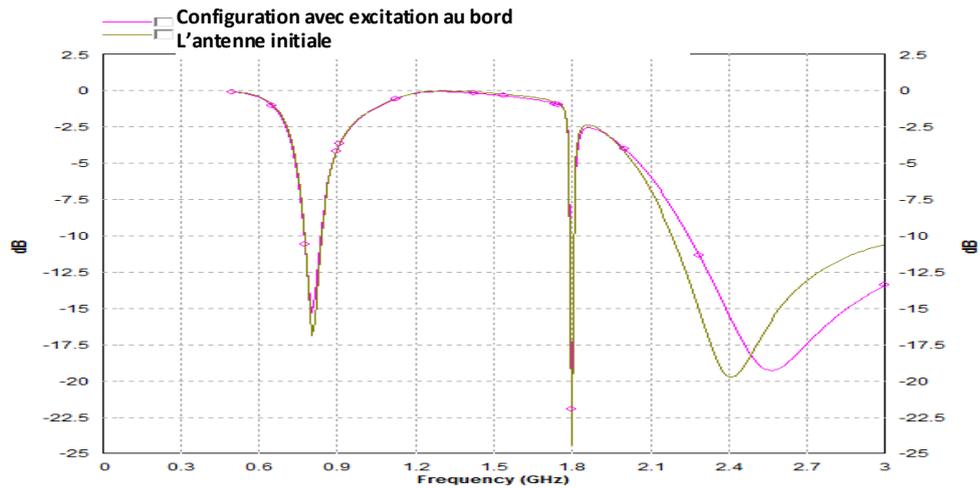


Figure 3.25 : Comparaison du coefficient de réflexion de l'antenne multi-bande initiale avec celle de la figure 3.24

Afin de réaliser maintenant l'antenne de la figure 3.24 sur le substrat de type Ro4003c disponible au laboratoire DIC, nous avons généré les masques (face avant et face arrière) illustrés par la figure 3.26. L'antenne a été réalisée par la société ALMITECH situé à Alger.

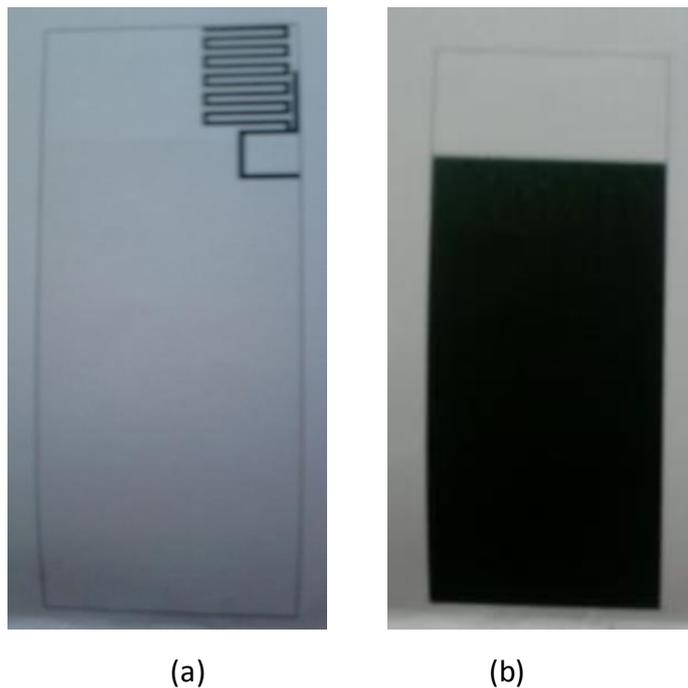
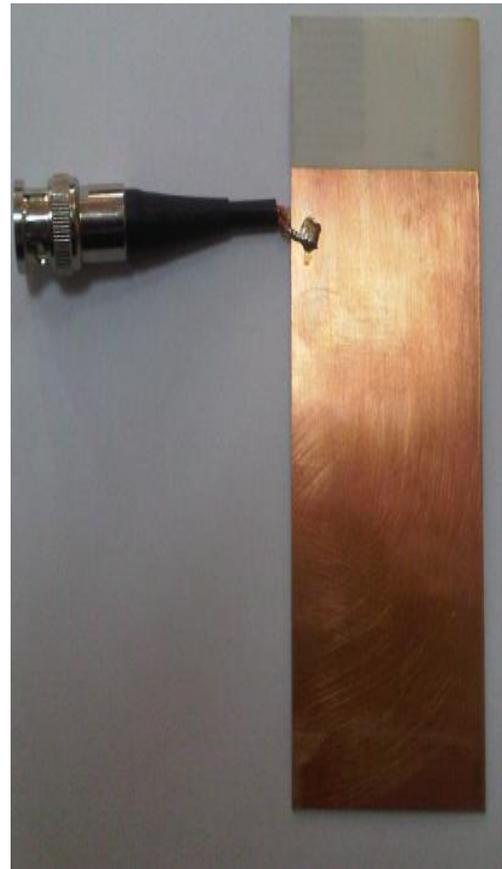


Figure 3.26 : Les masques de l'antenne à réaliser : (a) face avant (b) face arrière

Une fois le circuit imprimé de l'antenne récupéré, nous avons soudé un connecteur de type BNC femelle à l'endroit d'excitation de l'antenne comme illustré par la figure 3.27. Ce connecteur nous sera d'utilité par la suite lors de la mesure de cette antenne.



(a)



(b)

Figure 3.27: Photographie de l'antenne multi-bande compacte réalisée : (a) face avant et (b) face arrière

3.3.3 Validation expérimentale

Les mesures de cette partie ont été réalisées avec l'analyseur de réseau vectoriel ROHDE & SCHWARZ ZVL 3 GHz disponible au laboratoire DIC. L'antenne a été connectée directement au port 1 de cet analyseur comme montré sur la figure 3.28. Faute d'indisponibilité du kit de calibrage de cet analyseur, les mesures ont été effectuées sans calibrage préalable.



Figure 3.28: Photographie montrant la mesure de l'antenne

Après acquisition des données mesurées, le coefficient de réflexion mesuré a été comparé sur la figure 3.29 avec celui obtenu par simulation.

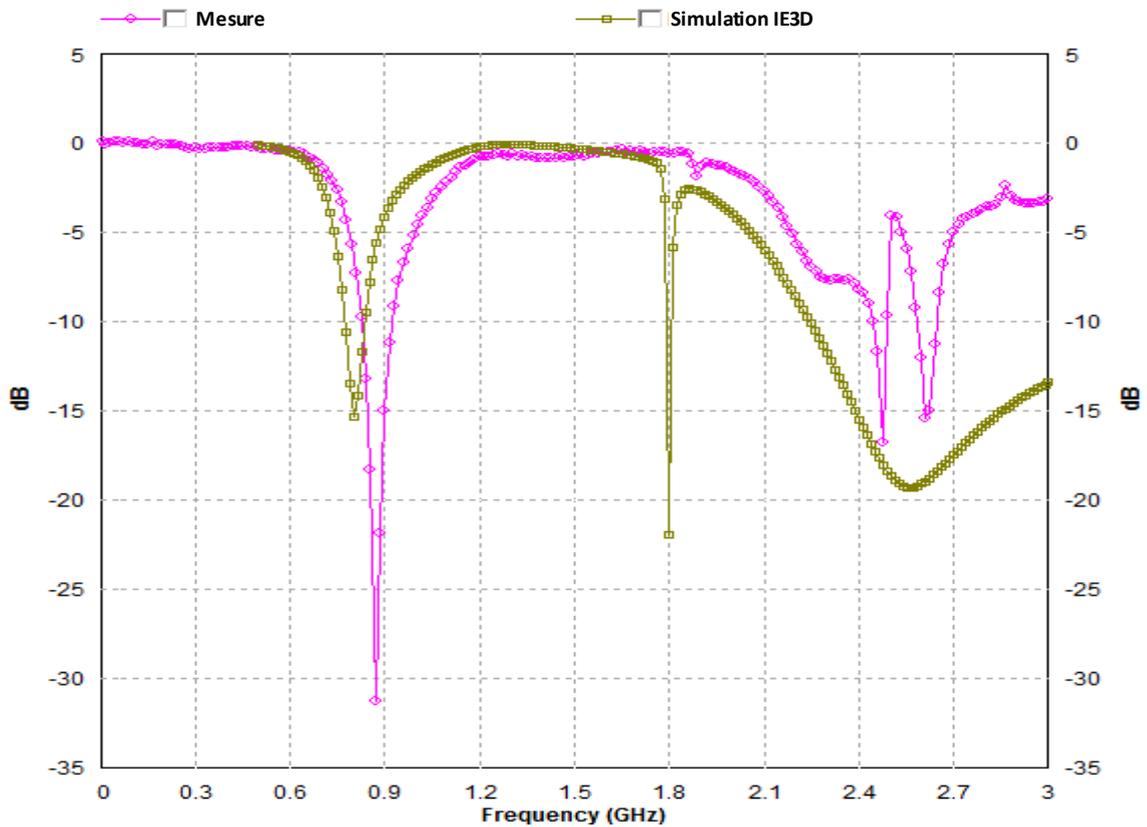


Figure 3.29 : Coefficient de réflexion simulé et mesure de l'antenne multi-bande

Comme déjà trouvé en simulation, la mesure de l'antenne montre un comportement tri-bande de l'antenne. Cependant, l'adaptation mesurée à la bande intermédiaire reste très insuffisante ($|S_{11}| = -2\text{dB}$) par rapport à celle prédite par simulation ($|S_{11}| < -20\text{dB}$). Pour la bande haute, la bande passante mesurée est bien inférieure à celle

donnée par simulation. Toutefois, la bande LTE 2600 est bien couverte avec une bonne adaptation ($|S_{11}| = -15\text{dB}$). Enfin pour la bande basse l'adaptation mesurée est meilleure à celle obtenue par simulation mais avec un décalage fréquentiel de 8.5%.

Ces désaccords entre mesure et simulation peuvent être dus au :

- (a) Qualité de réalisation de l'antenne ainsi qu'à celle du connecteur BNC soudé sur l'antenne.
- (b) L'absence de calibrage de l'analyseur de réseau.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionnée, réalisé et mesuré une antenne multi bande pour la couverture des bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Avant d'y arriver, nous avons considéré trois types d'antennes imprimées mono-bandes fonctionnant à 800 MHz : une antenne patch, monopole imprimé et enfin une antenne monopole imprimée compacte. Cette dernière a été modifiée avec succès afin de couvrir les trois bandes d'intérêt.

Dans le chapitre suivant, l'antenne tri-bande compacte dimensionnée été utilisée pour la construction de systèmes antennaires de type MIMO 2x1 et MIMO à quatre antennes.

Chapitre 4 : Conception et simulation d'un système multi-antennaire et multi-bande pour LTE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la problématique d'intégration de deux ou plusieurs antennes dans le même terminal mobile et les techniques permettant d'améliorer l'isolation entre antennes. Tout d'abord, nous nous sommes intéressés à un système construit à base de deux antennes monopoles imprimées multi bandes compactes placées une à côté de l'autre. Deux techniques d'isolation entre ces deux antennes ont été testées. La technique de ligne de neutralisation a été sélectionnée pour ses bonnes performances. Enfin une configuration à base de quatre antennes a été également envisagée et simulée.

4.2 Système multi-antennes multi-bande à deux antennes

Le système multi-antennaire multi-bande considéré ici est composé de deux antennes identiques ayant les mêmes dimensions que celles de l'antenne optimisée du chapitre précédent et partageant le même plan de masse (voir figure 4.1). Initialement, les deux antennes sont séparées de $G=13$ mm. Les dimensions du plan de masse sont identiques à celles d'une antenne simple, autrement dit 96×50 mm². Les dimensions des deux antennes sont celles du tableau 3.3. Pour des raisons de symétrie de la structure considérée, seulement deux paramètres S seront affichés : S_{11} pour le coefficient de réflexion et S_{12} pour l'isolation entre antennes. L'isolation est considérée suffisante si $|S_{12}| < -10$ dB.

La figure 4.2 donne le coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{12}|$ de la configuration MIMO de la figure 4.1

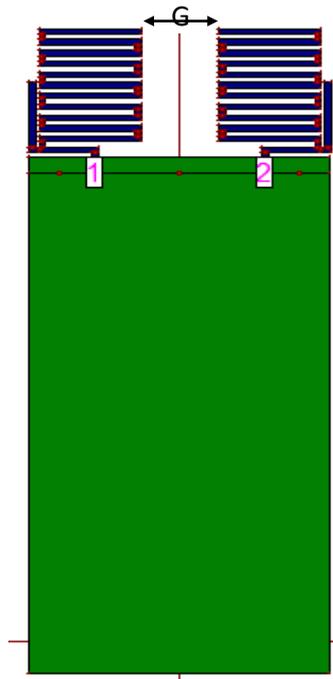


Figure 4.1 : Configuration de l'antenne MIMO2x1 sur IE3D

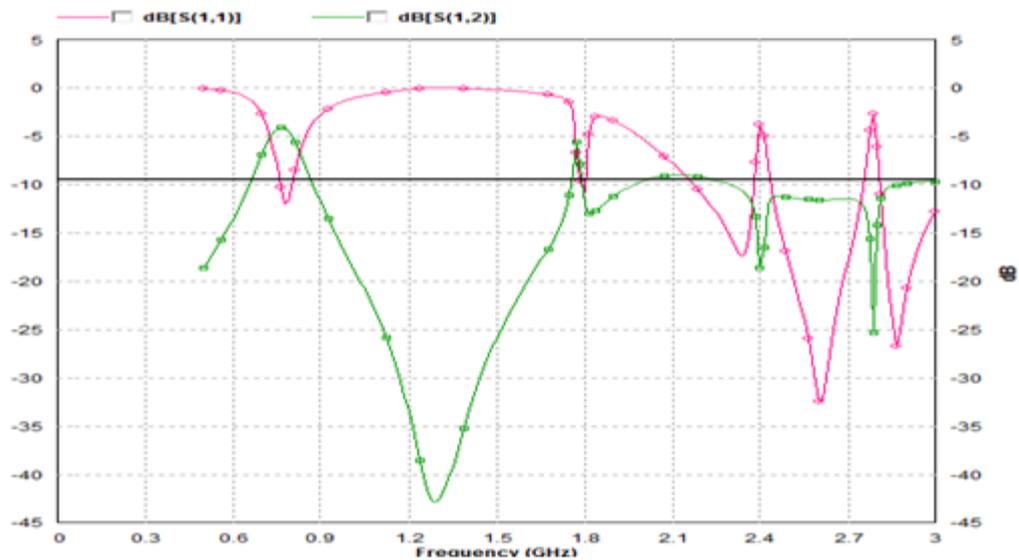


Figure 4.2 : Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{12}|$ du système à deux antennes de la figure 4.1

Il à noter que le comportement tri-bande d'une antenne seule n'a pas été affecté par la mise à proximité d'une autre antenne. Cependant, les performances en isolation entre antennes (correspondantes au $|S_{12}|$) sont insuffisantes et cela pour les trois bandes de fréquences. Donc il devient nécessaire d'améliorer l'isolation entre les antennes afin d'obtenir un système MIMO avec de bonnes performances. Pour la suite, deux techniques d'amélioration d'isolation seront décrites.

4.2.1 Technique de la ligne de séparation

Il s'agit d'améliorer l'isolation en ajoutant une ligne de séparation entre les deux antennes. Cette ligne est imprimée sur la face supérieure (face sur laquelle est imprimée l'antenne) et elle est connectée au plan de masse à l'aide d'un via (voir Figure 4.3). Plusieurs variantes de cette ligne peuvent être considérées comme le montre la figure 4.3.

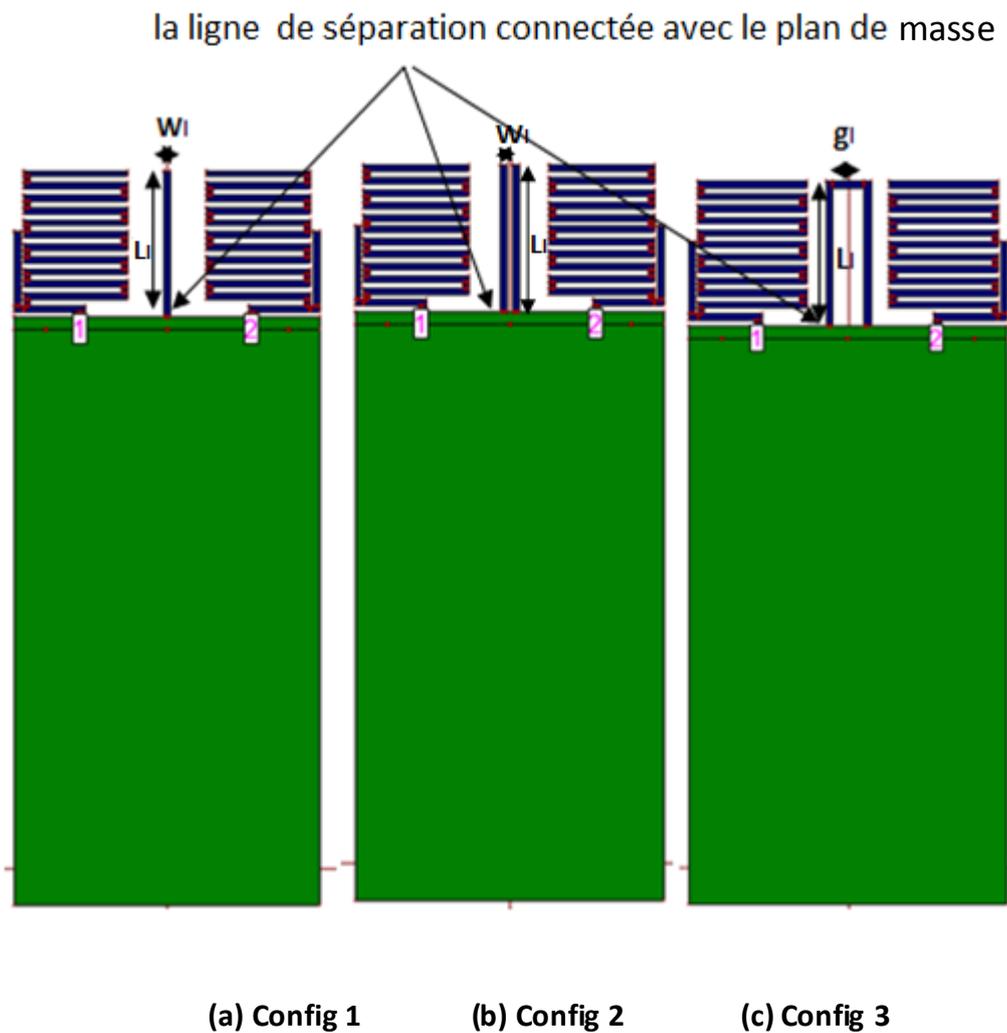


Figure 4.3 : Trois configurations de lignes de séparation pour l'amélioration de l'isolation entre antennes

Les résultats de simulation des trois configurations de la figure 4.3 sont illustrés par la figure 4.4. Ces résultats ont été obtenus pour un écart entre antennes constant de 13 mm et des lignes de séparation avec les dimensions: $W_1=1\text{mm}$, $L_1=24\text{mm}$ et $g_1=3\text{mm}$

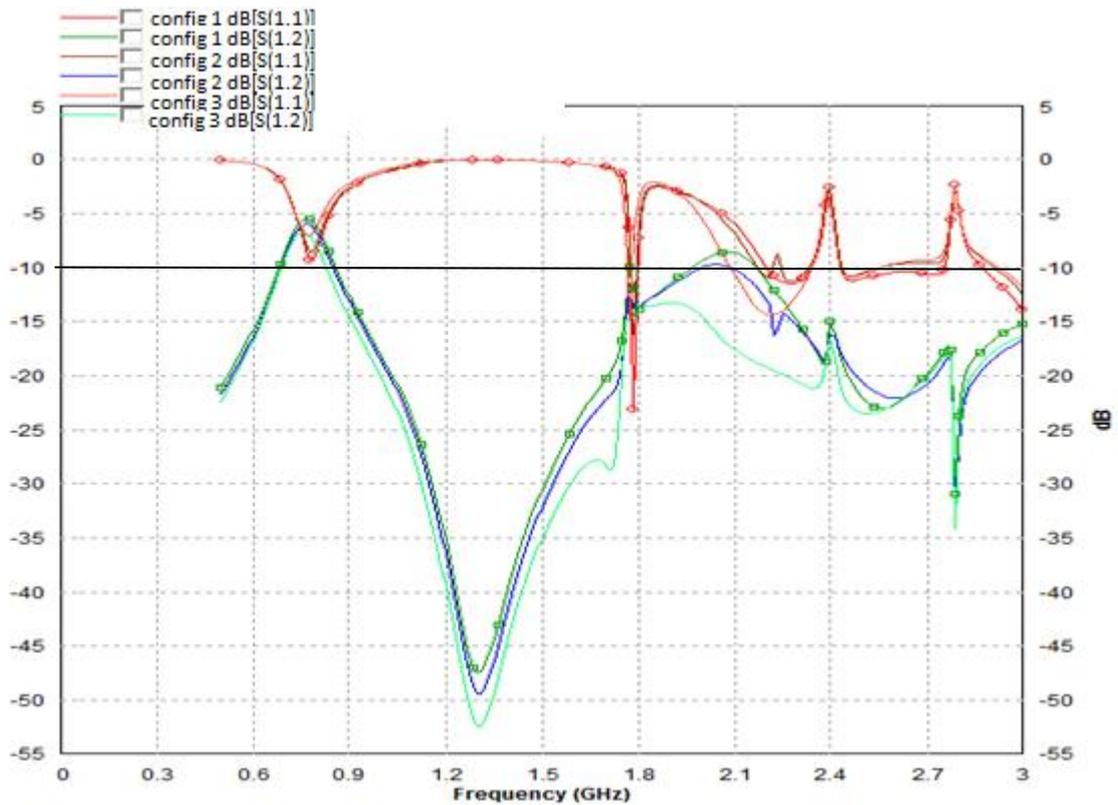


Figure 4.4 : Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolations $|S_{12}|$ des trois configurations de la figure 4.3

De la figure 4.4, on constate que la ligne de séparation dans les trois configurations a permis d'améliorer légèrement l'isolation dans les trois bandes. Cependant, l'isolation à la bande basse (la plus critique) reste insuffisante ($|S_{12}| = -7$ dB pour la configuration 3).

D'autres simulations réalisées (non présentées ici) en variant les différentes dimensions de lignes de séparation n'ont pas permis l'obtention d'un $|S_{12}| < -10$ pour les trois bandes de fréquences.

4.2.2 Technique de la ligne de neutralisation

Pour améliorer l'isolation de notre système à deux antennes, une ligne de neutralisation est insérée entre les antennes. Cette ligne est imprimée sur la face supérieure (face sur laquelle est imprimée l'antenne) et elle connecte électriquement les deux antennes (voir Figure 4.5). Plusieurs configurations de ligne de neutralisation peuvent être considérées (voir figure 4.5). L'écart entre antenne (G) est toujours constant et égal à 13 mm. Les longueurs totales des lignes de neutralisation (L_{tot}) pour

les trois configurations de la figure 4.5 sont données respectivement : $L_{tot1} = G$, $L_{tot2} = 2L_r + 2W_n + L_m$, $L_{tot3} = 3L_r + 4W_n + 2L_k$

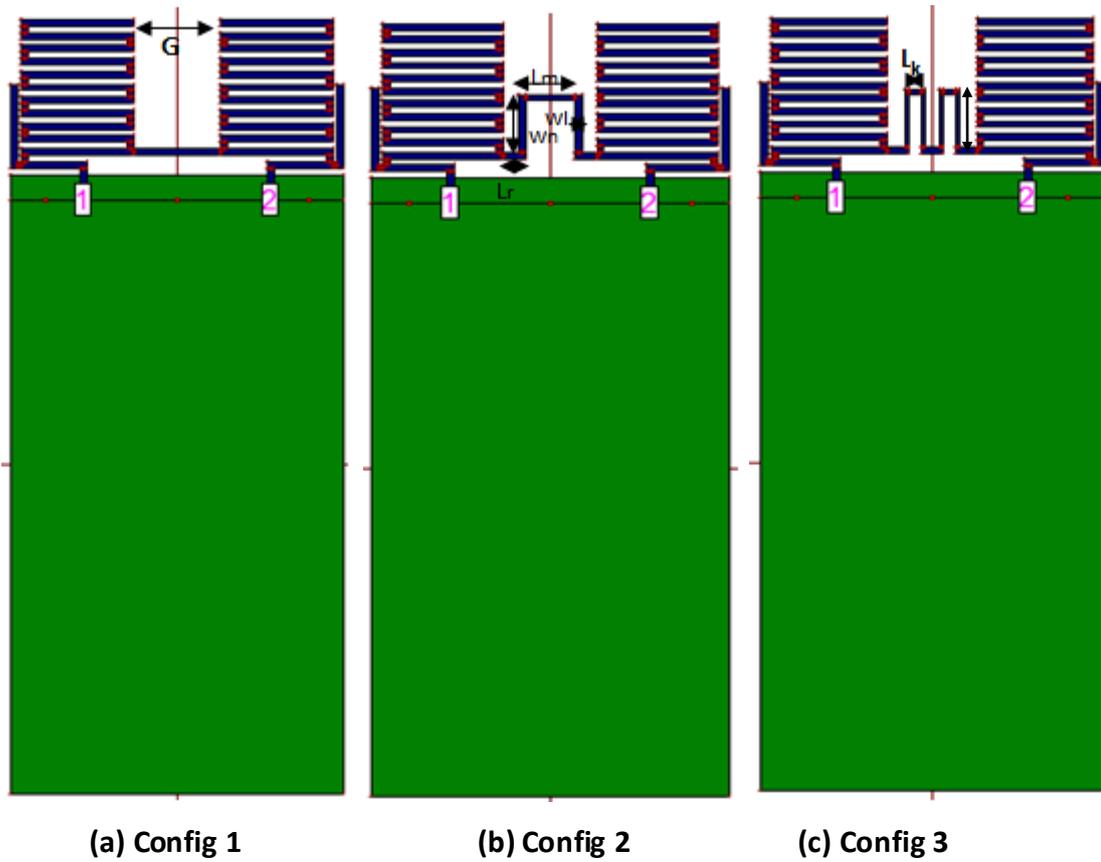


Figure 4.5 : Plusieurs configurations de lignes de neutralisation

Dans la suite les trois configurations seront simulées et leurs performances seront comparées.

4.2.2. a Configuration 1

Cette configuration (Figure 4.5 (a)) a été simulée en prenant $W_l = 0.5$ mm.

Les résultats de simulation obtenus pour cette configuration sont illustrés par la figure 4.6.

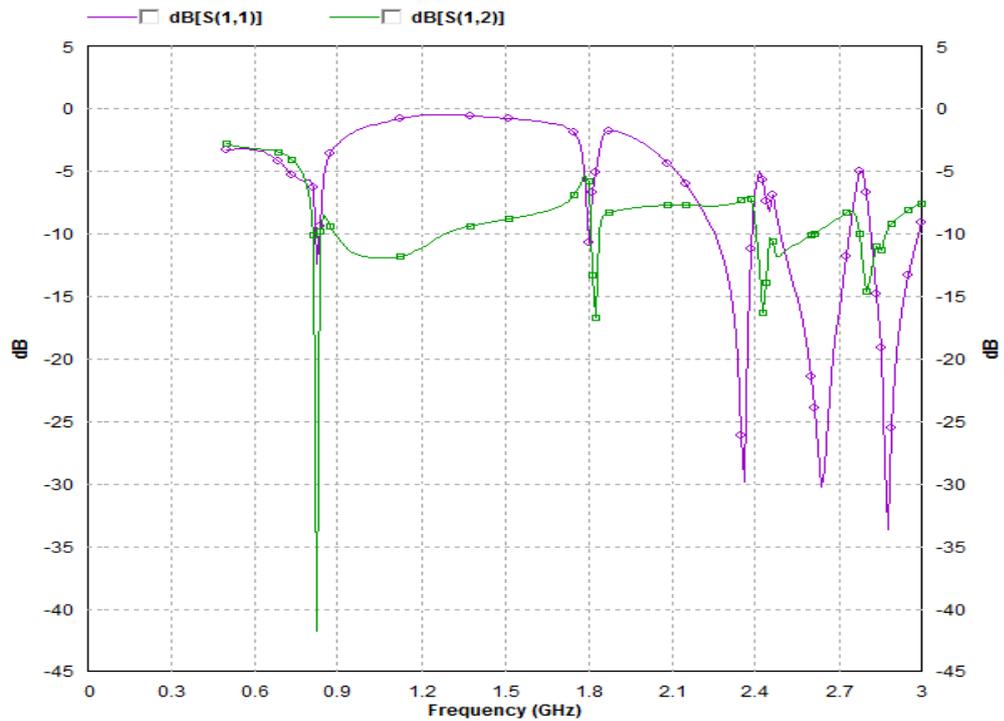
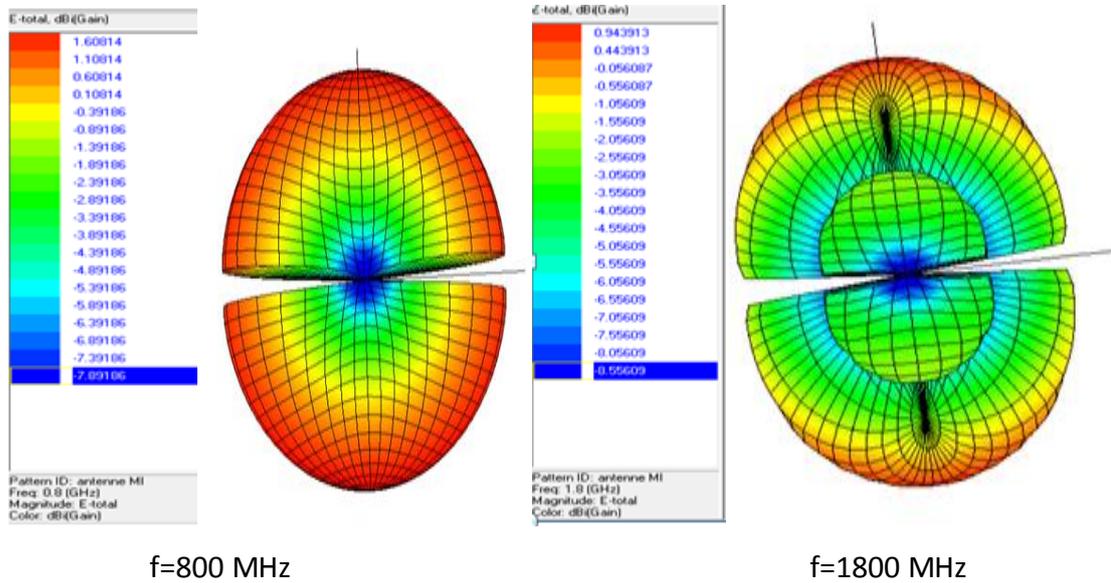
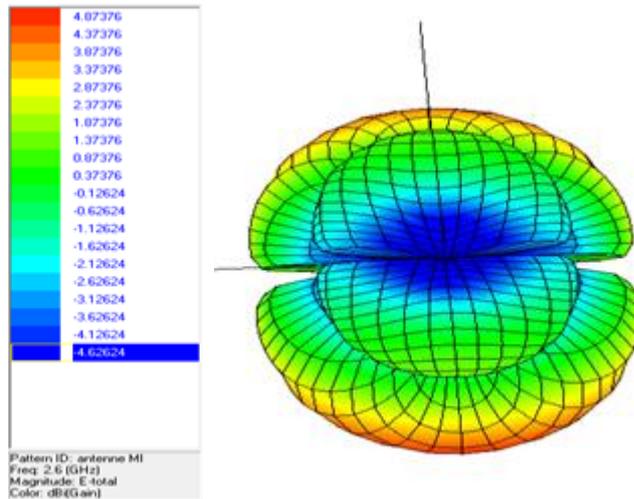


Figure 4.6 : Coefficients de réflexion $|s_{11}|$ et isolation $|s_{12}|$ de la configuration 1 de la figure 4.5

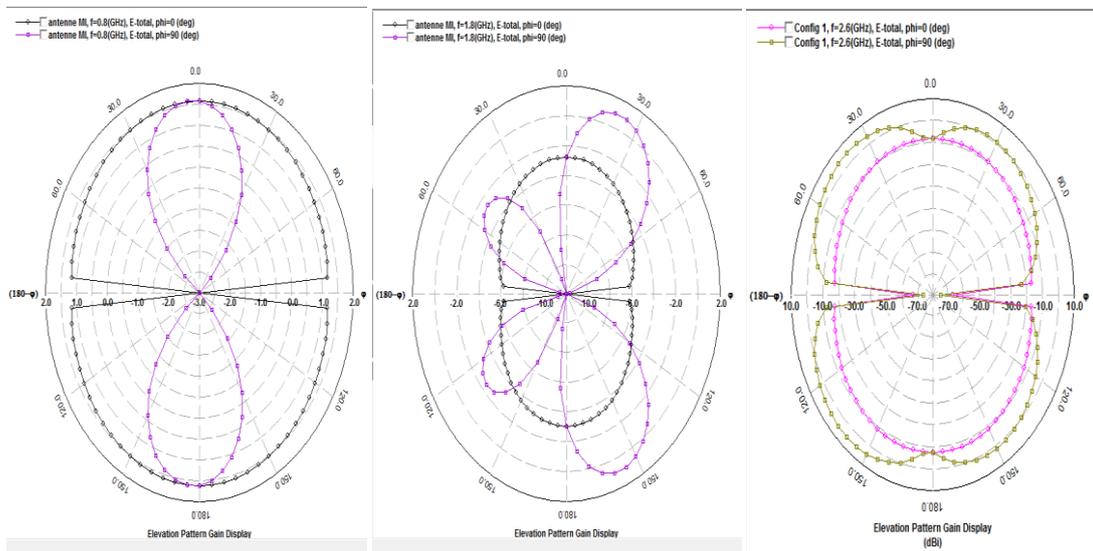
Les figures 4.7 et 4.8 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de la configuration 1 aux fréquences 800, 1800 et 2600 MHz respectivement.





f=2600 MHz

Figure 4.7 : Le diagramme de rayonnement 3D de la Configuration 1



f=800 MHz

f=1800 MHz

f=2600 MHz

Figure 4.8 : Le diagramme de rayonnement 2D de la Configuration 1

4.2.2. b Configuration 2

Après plusieurs études paramétriques sur cette configuration (Figure 4.5 (b)), les dimensions optimales de la ligne de neutralisation pour l'obtention d'une bonne isolation sont : $L_r=3\text{mm}$, $W_n=10\text{mm}$, $L_m=7\text{mm}$ et la largeur $W_l=0.5\text{mm}$.

Le coefficient de réflexion et l'isolation de cette configuration sont présentés dans la figure 4.9.

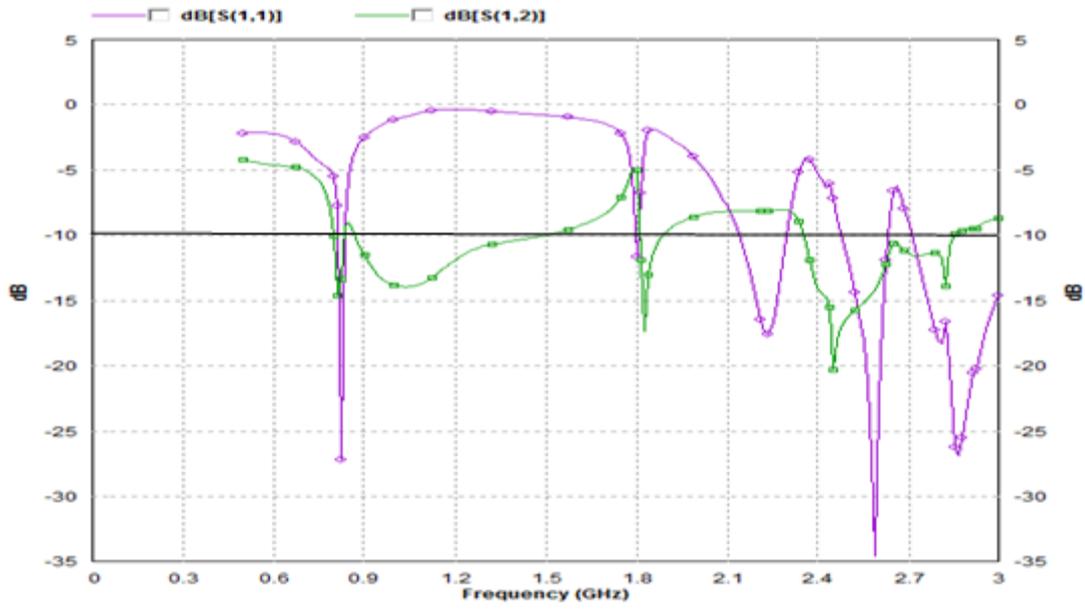
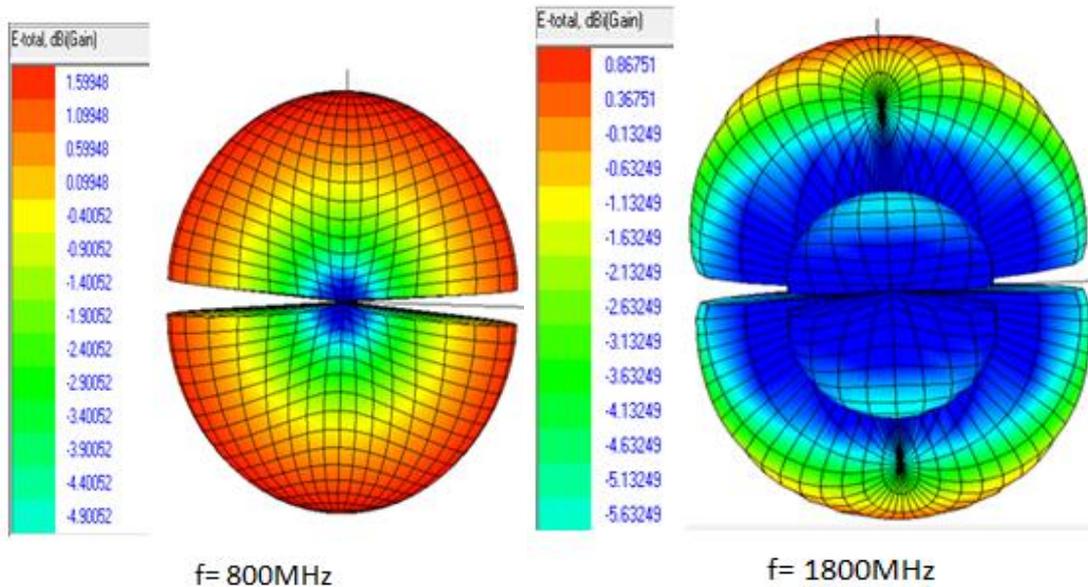


Figure 4.9 : Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolation $|S_{12}|$ de la configuration 2 de la figure 4.5

Les figures 4.10 et 4.11 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de la configuration 2 aux fréquences 800, 1800 et 2600 MHz respectivement.



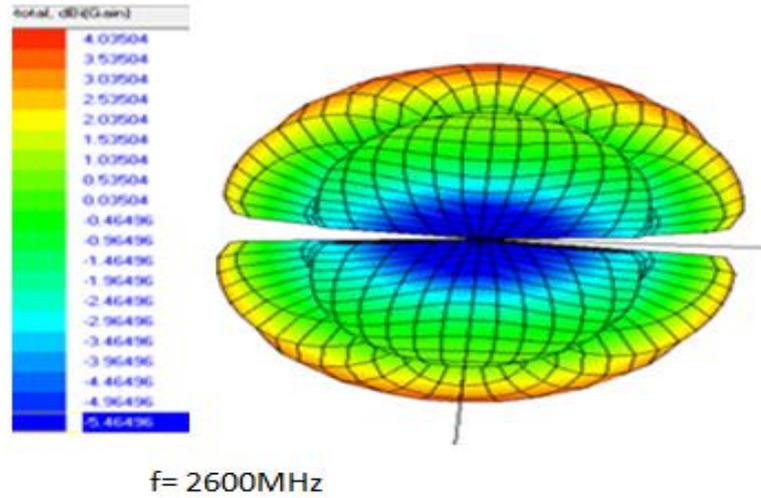


Figure 4.10 : Le diagramme de rayonnement 3D de la configuration2

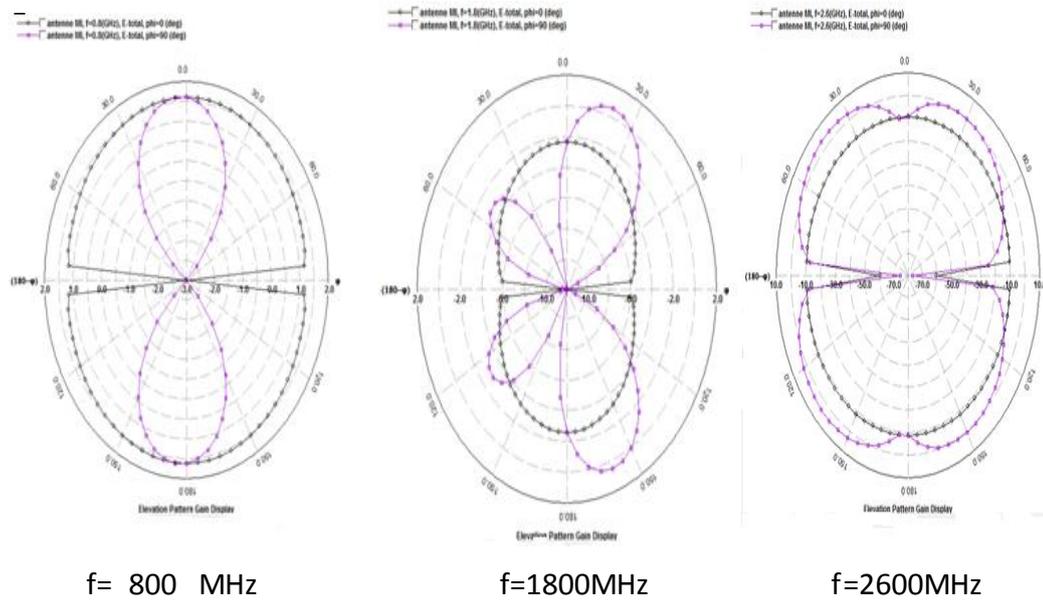


Figure 4.11 : Le diagramme de rayonnement 2D de la configurationb2

4.2.2.c Configuration 3

Après plusieurs études paramétriques sur cette configuration (Figure 4.5 (c)), les dimensions optimales de la ligne de neutralisation pour l'obtention d'une bonne isolation sont : $L_r = 3 \text{ mm}$, $W_n = 10\text{mm}$, $L_k = 2.5\text{mm}$ et la largeur $W_1 = 0.5\text{mm}$.

Le coefficient de réflexion et l'isolation de cette configuration sont présentés dans la figure 4.12.

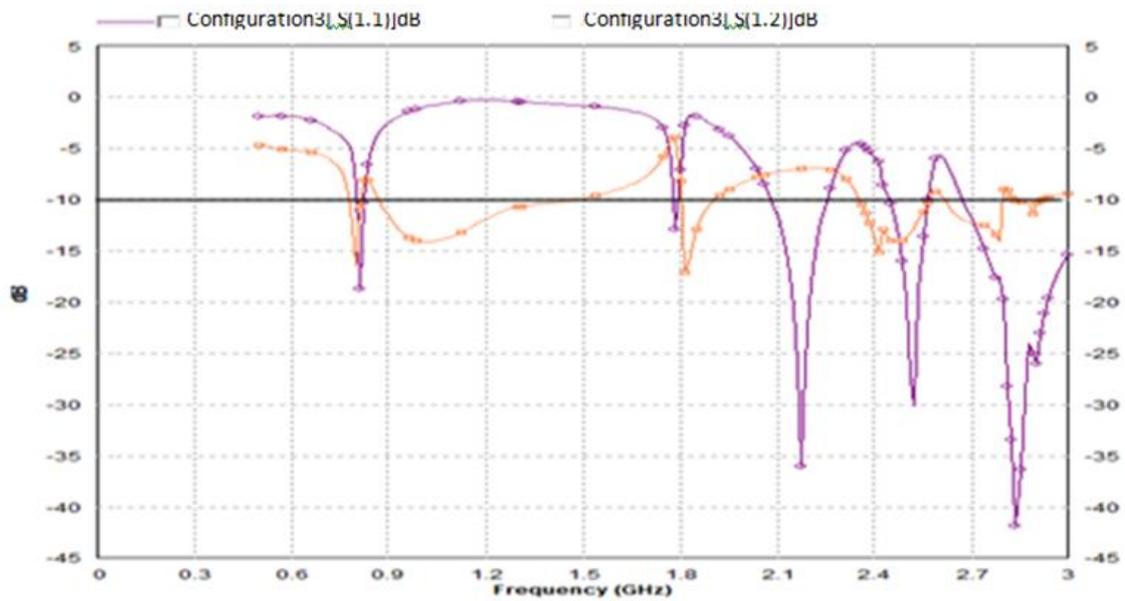
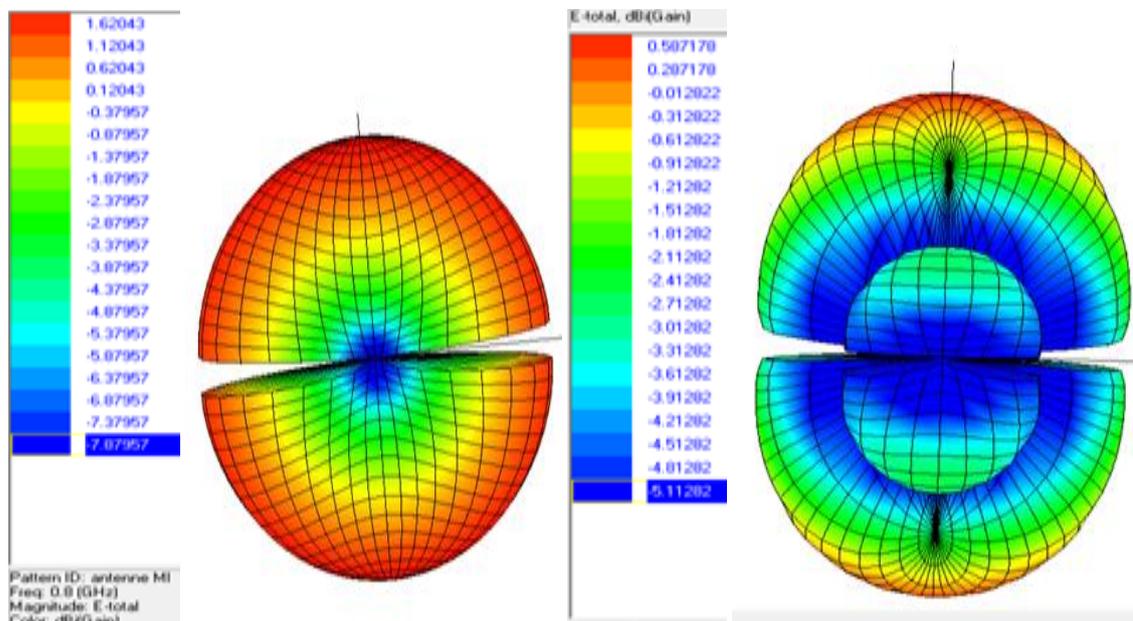


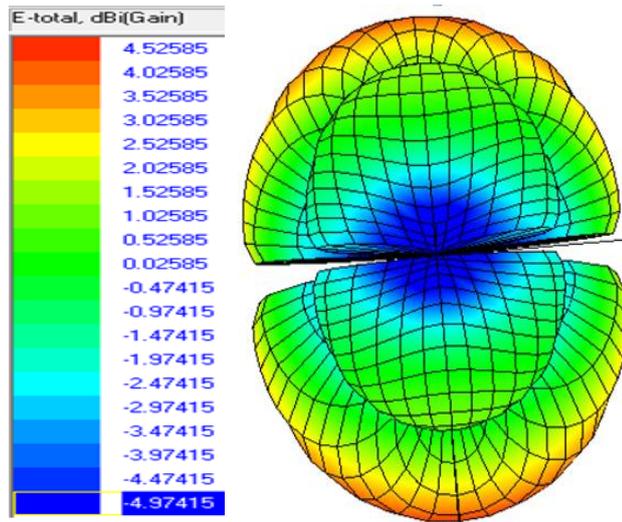
Figure 4.12: Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolations $|s_{12}|$ de configuration3 de la figure 4.10

Les figures 4.13 et 4.14 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de la configuration 3 optimale aux fréquences 800, 1800 et 2600 MHz



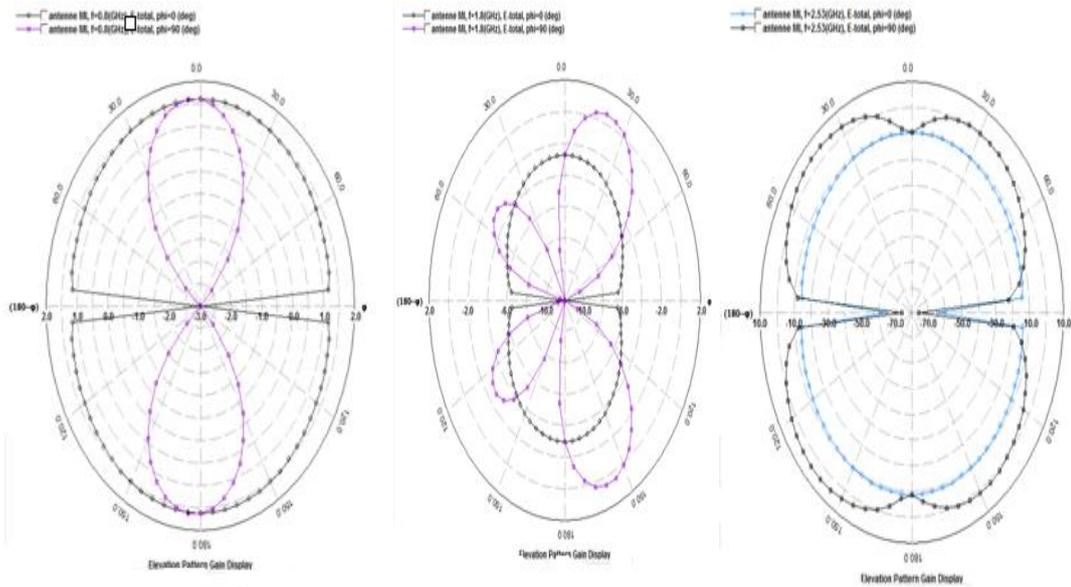
f=800 MHz

f=1800 MHz



f=2600 MHz

Figure 4.13: le diagramme de rayonnement 3D de la configuration 3



f= 800 MHz

f= 1800 MHz

f= 2600 MHz

Figure 4.14 : le diagramme de rayonnement 3D de la configuration3

4.2.2.d Comparaison des performances des trois configurations

Les performances des trois configurations présentées précédemment sont comparées sur les figures 4.15 et 4.16.

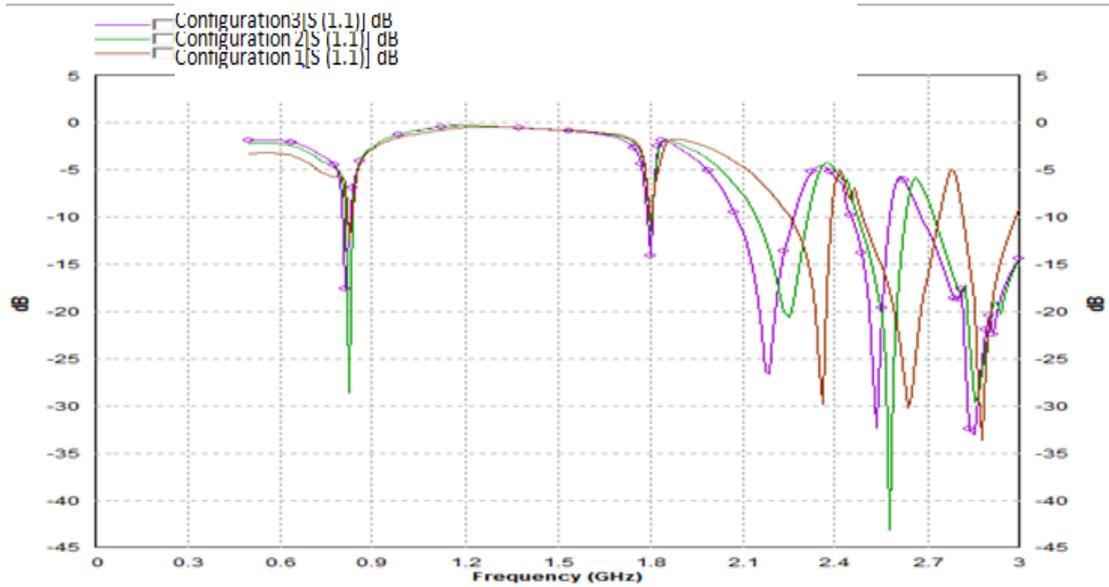


Figure 4.15: Comparaison des Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ des trois configurations de la figure 4.5

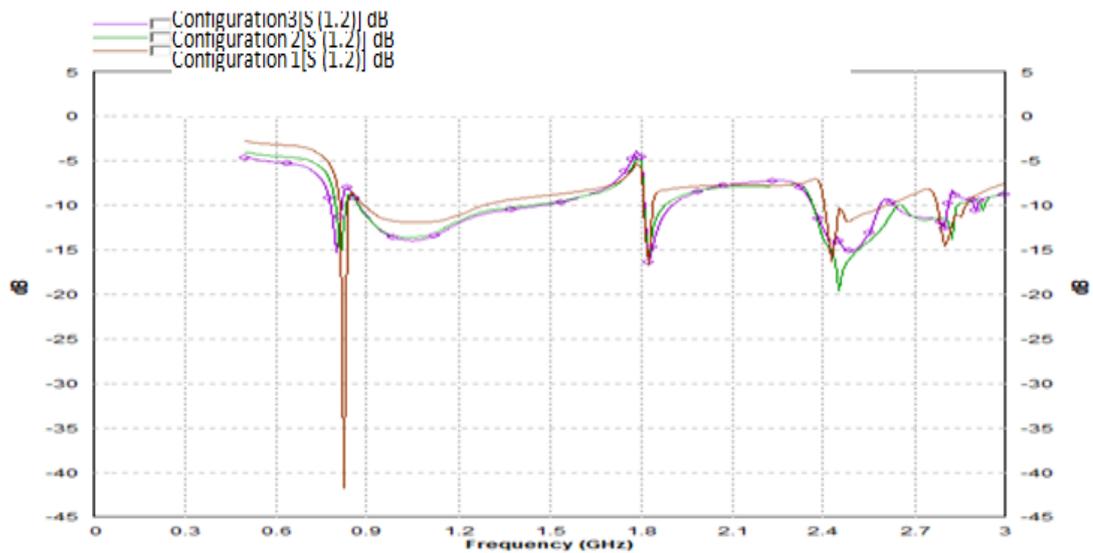


Figure 4.16 : Comparaison des isolations $|S_{12}|$ des trois configurations de la figure 4.5

D'après ces résultats, la configuration 2 est celle qui présente le meilleur compromis entre adaptation et isolation et cela dans les trois bandes d'intérêt.

Les performances finales de cette configuration sont résumées sur le tableau 4.1.

Fréquence [MHz]	800		1800		2600	
Les coefficients [dB]	S_{11}	S_{12}	S_{11}	S_{12}	S_{11}	S_{12}
Les config						
Config2	-29	-15	-13	-15	-43	-15

Tableau 4.1 : Performances fréquentielles de la configuration2

Pour la suite, un système antenne à base de 4 antennes sera construit en utilisant la configuration optimale de cette partie.

4.3 Système MIMO à quatre antennes

Le système MIMO à 4 antennes est basé sur l'utilisation de deux systèmes MIMO 2x1 de la configuration 2 (ligne de neutralisation) comme illustré par la figure 4.20. Afin de le système soit compatible avec la taille de Smartphone fixé (120x 50 mm²), le plan de masse a par conséquent été réduit (72 x 50 mm²).

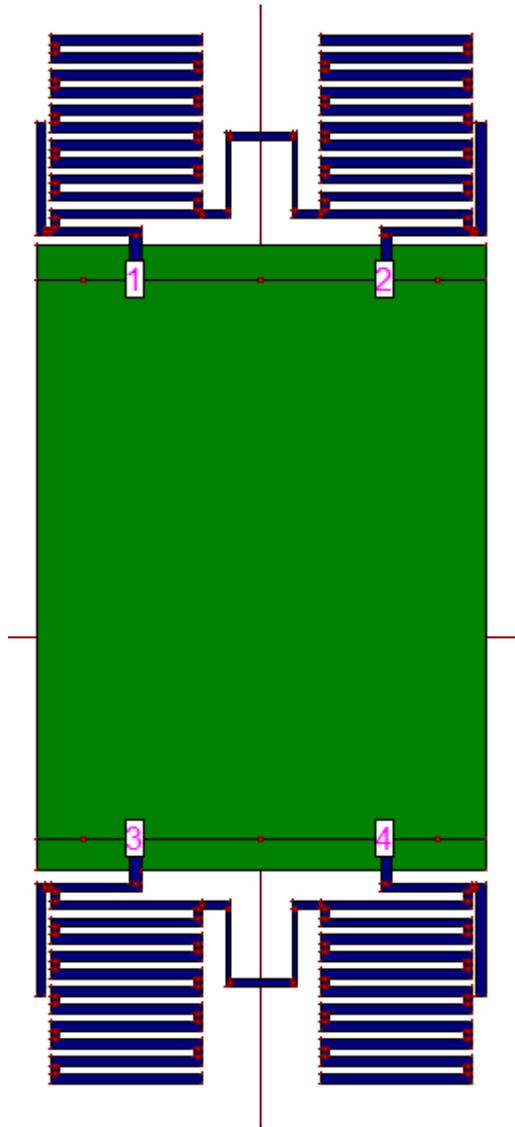


Figure 4.17 : Système MIMO à quatre antennes

Les résultats obtenus pour les coefficients S_{11} , S_{22} , S_{33} et S_{44} sont illustrés dans la Figure 4.18.

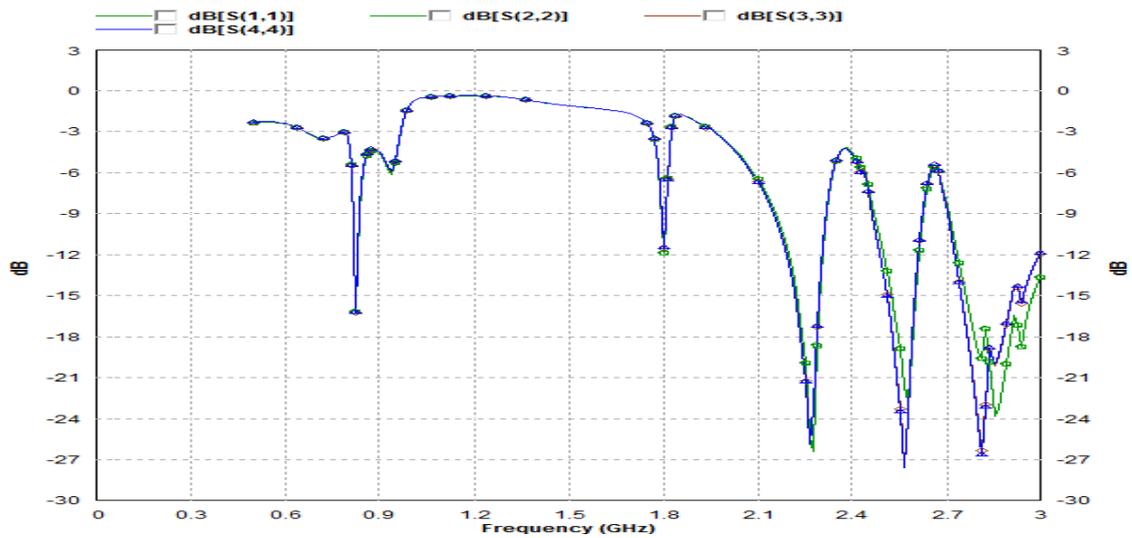


Figure 4.18 : Comportement du S_{11} , S_{22} , S_{33} et S_{44}

Les résultats obtenus pour les coefficients S_{12} , S_{13} et S_{14} sont illustrés dans la Figure 4.19.

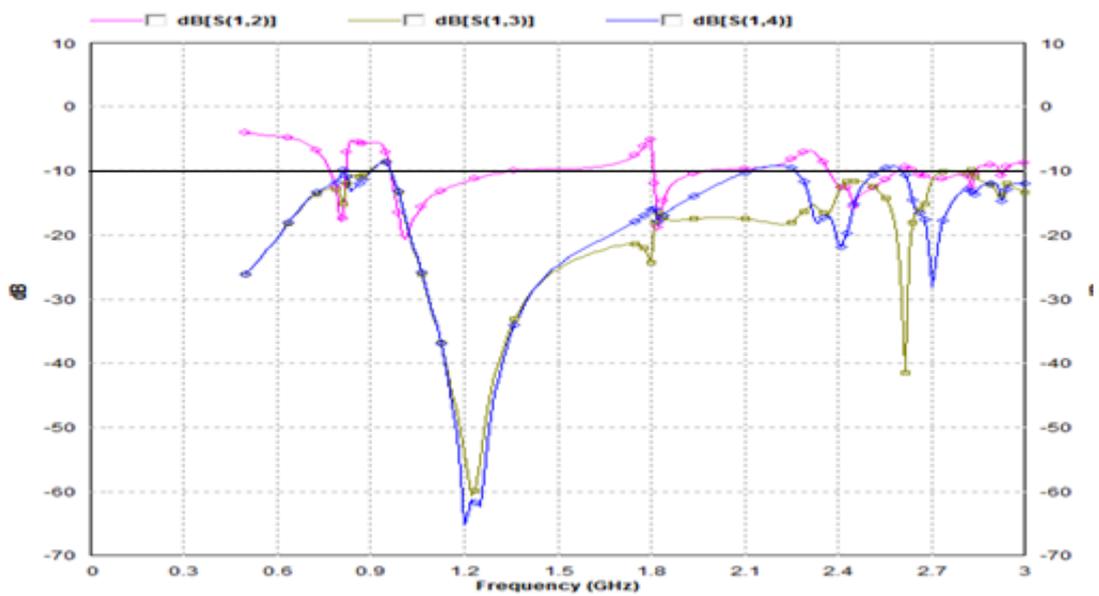


Figure 4.19 : comportement du S_{12} , S_{13} et S_{14}

Les performances du système à quatre antennes aux trois fréquences LTE sont résumées dans le tableau 4.2

Fréquence [MHz]	800				1800				2600			
coefficients de réflexions [dB]	S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{44}	S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{44}	S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{44}
	-16				-12				-27			
isolation [dB]	S_{12}	S_{13}	S_{14}	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$
	-17	-15	-14	-19	-25	-15	-10	-41	-10			

Tableau 4.2: Performances fréquentielles de l'antenne MIMO à quatre antennes

Il est à noter que les performances globales (adaptation et isolation) obtenues par simulation du système MIMO à quatre antennes sont très satisfaisantes.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné et simulé un système multi-antennaire multi-bande fonctionnant dans les bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Afin d'avoir des bonnes performances en termes d'isolation deux techniques ont été investiguées : ligne de séparation et ligne de neutralisation. Cette dernière a été sélectionnée pour ses bonnes performances et deux systèmes multi-antennaires à base de cette ligne ont été conçus : une configuration 2x1 et configuration à quatre antennes.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'études ont portés sur la conception et simulation d'un système antenne MIMO multi bande pour LTE.

La première partie, décrit brièvement quelques généralités sur les antennes en donnant leurs caractéristiques principales. Ensuite, le principe de la technique MIMO ainsi que son architecture ont été présentés.

Dans le second chapitre, a permis de décrire le principe de la norme LTE, leur bande de fréquence ainsi que l'architecture de cette norme.

Le troisième chapitre présente la conception et simulation de l'antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Dans un premier temps, une antenne mono-bande compacte fonctionnant dans la bande LTE 800 MHz a été dimensionnée. La taille compacte de cette antenne a été obtenue en utilisant des profils irréguliers de type méandre. La taille de cette antenne ne dépassant pas les 120x50 mm² (dimension standard des Smartphone). En modifiant l'antenne mono-bande, une solution tri-bande compacte couvrant la bande LTE 800/1800/2600 MHz a été conçue, réalisée et mesurée.

Enfin, dans le quatrième chapitre, deux systèmes antennaires MIMO 2x1 et MIMO à quatre antennes à base de cette antenne multi-bande ont été conçus et simulés.

A.1 Présentation d'IE3D de Zeland

IE3D de Zelande est un outil électromagnétique complet pour la simulation, l'optimisation et la conception en 3D des antennes et des circuits numériques. L'IE3D a été adopté comme une norme industrielle dans la simulation électromagnétique. Depuis son introduction officielle en 1993 à IEEE International Micro-wave Symposium (IMS IEEE 1993), des améliorations ont été apporté au logiciel IE3D [27].

L'IE3D est devenu l'outil de simulation électromagnétique le plus polyvalent. Il est facile à utiliser, efficace et précis. Il est largement utilisé pour la conception de circuits hyperfréquences/millimétriques, interconnexion et packaging de circuits intégrés CI, antennes planaires, antennes filaires et autres antennes radiofréquence sans fils [28,2]. La Figure A .1 montre l'interface principale du logiciel IE3D

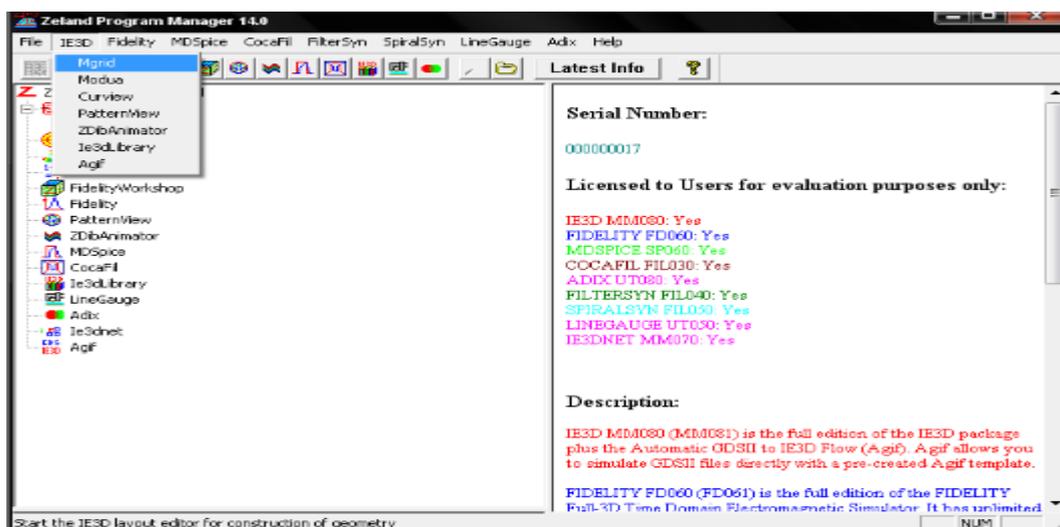


Figure A.1 : Interface principale de l'IE3D

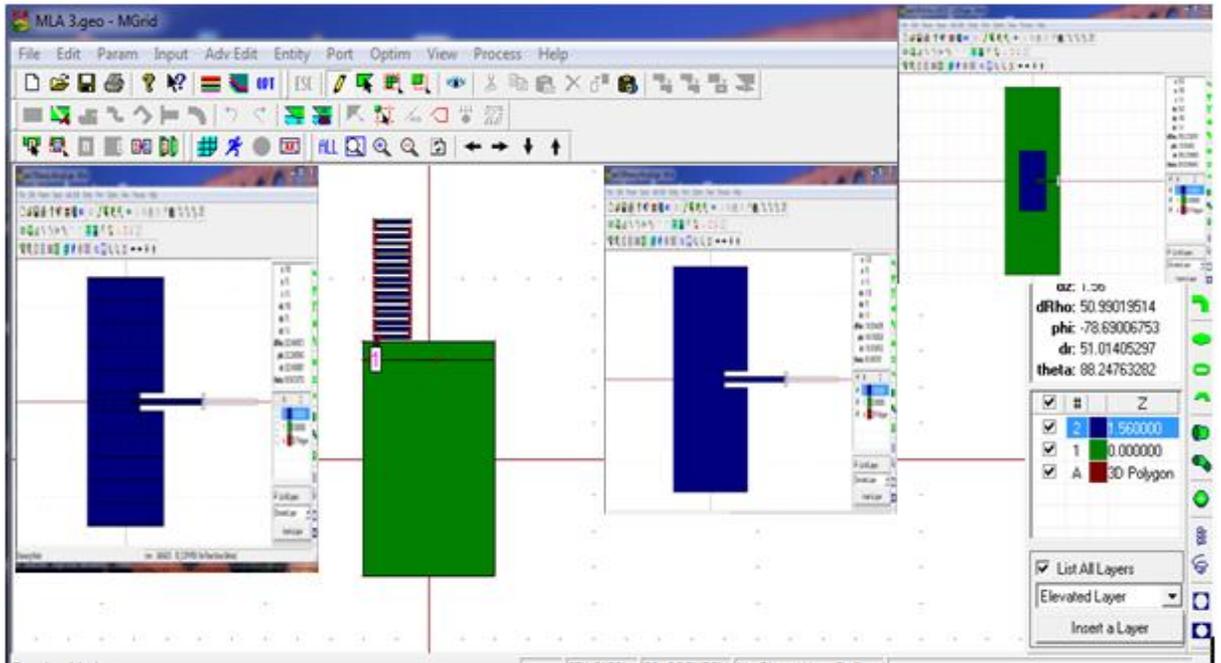


Figure A.2: Différentes fenêtres d'IE3D

A.2 Résultats de simulation

Une fois la simulation terminée, de nombreuses sorties de résultats sont autorisées. Nous avons simulé une structure d'un patch avec IE3D. Les différents graphes que nous pouvons visualiser telle que l'abaque de Smith, le VSWR (dB) et d'autres paramètres sont représentés dans ce qui suit :

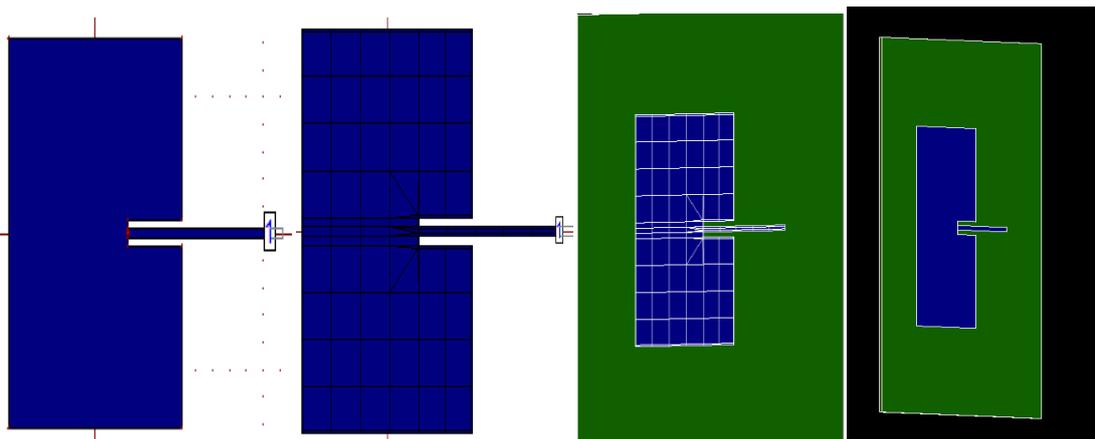


Figure A.3: Différentes états d'une structure en 2D et 3D

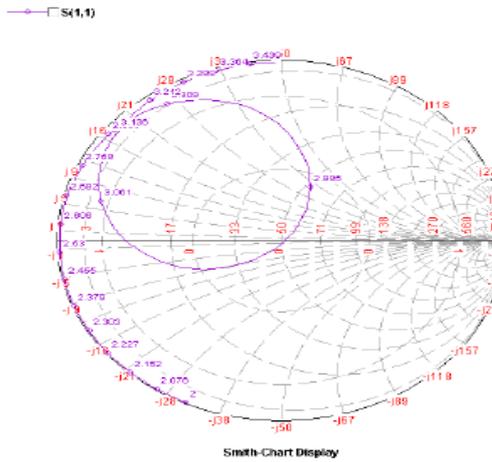


Figure A.4: Abaque de Smith

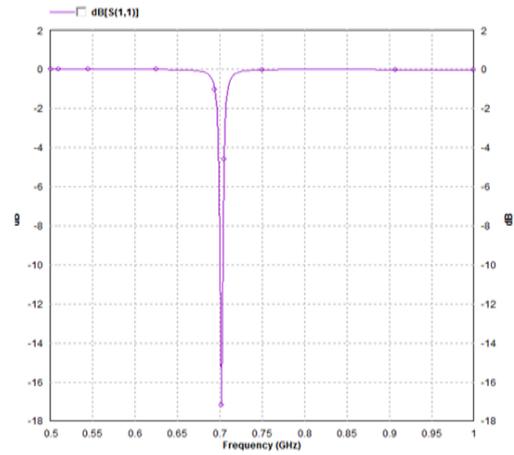


Figure A.5: coefficient de réflexion S11 en dB

A.3 Visualisation de la distribution de courant et le diagramme de rayonnement

On peut aussi visualiser la distribution de courant des structures après simulation ainsi que le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D.

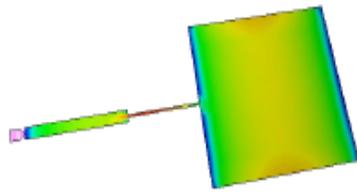


Figure A.7: la distribution de courant

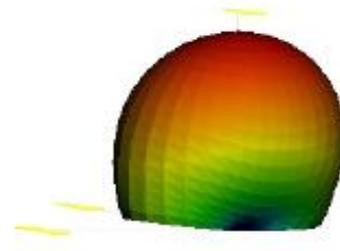


Figure A.8 : le diagramme de rayonnement 3D

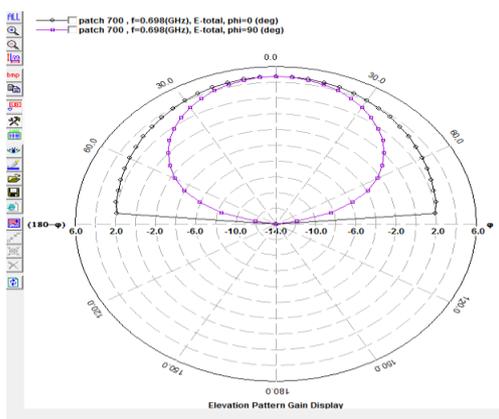


Figure A.9 : le diagramme de rayonnement 2D
(Planaire)

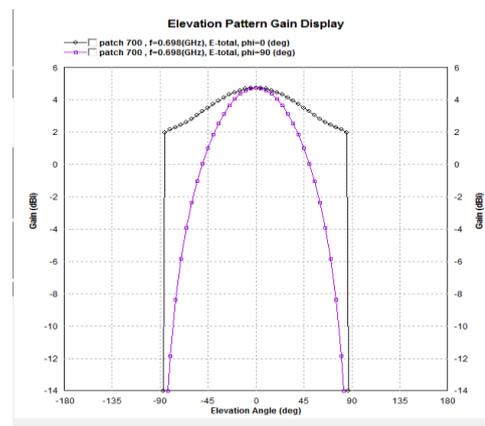


Figure A.10 : le diagramme de rayonnement 2D
(Cartésienne)

Bibliographie

- [1] Ameziane Djamel : « *Etude et Optimisation d'Antennes Fractales Plaquées* », Mémoire de Magister de Télécommunications, 2008-2009
- [2] « Antennes », Alexandre Boyer, support de cours, disponible sur : www.alexandre-boyer.fr
- [3] Bitchikh Mounira , « les antennes ultra large bande dans le domaine des communications mobile », thèse de doctorat en électronique, mars 2014.
- [4] Dhaou Bouchouich, « Etude de faisabilité de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante », Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'université François – Rabelais, 22 novembre 2010
- [5] Aliou Diallo : « Système Multi-Antennes pour diversité et MIMO », Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences spécialité Electronique de l'université de Nice-Sophia Antipolis, 28 Novembre 2007
- [6] Ferouani Souhila : « Etude et Implémentation d'un Système MIMO dans un Contexte OFDM », Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister, 2010
- [7] E. Jammazi « Dimensionnement et Planification d'un réseau 4G LTE pour Tunisie Télécom », L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès ,2013
- [8] T. Nguyen : « Evolution de la couche RRC de la plateforme Open Air vers les nouvelles normes LTE », Mémoire de PFE, Septembre 2010
- [9] M. Daoud : « Dimensionnement et planification d'un réseau Advanced – LTE », Mémoire de PFE, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, 2012-2013
- [10] Ibra Dioum: « Conception de systèmes multi-antennaires pour techniques de diversité et MIMO - Application aux petits objets nomades communicants », Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences, l'Université de Nice-Sophia Antipolis (France) ,2013
- [11] http://4.bp.blogspot.com/-aGSnzeLy8c4/Uib_409x-2I/LTE.gif

- [12] Attalah Mohamed Amine : «Performance de l'interface Radio des réseaux LTE », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master Académique ,2013
- [13] [http://www. Arcep.fr/uploads/tx_gsavis/11-119.pdf](http://www.Arcep.fr/uploads/tx_gsavis/11-119.pdf)
- [14] <http://www.reseau4g.info/4g-lte/les-frequences>
- [15] Ibra Dioum, Aliou Diallo, Cyril Luxey, Sidi Mohamed Farsi :« Compact Dual-Band Monopole Antenna for LTE Mobile Phones», 2010 Loughborough Antennas & Propagation Conference, 8-9 November 2010, Loughborough, UK
- [16] Mohammad S. Sharawi, Sheikh S. Iqbal, and Yanal S. Faouri: « An 800 MHz 2 1 Compact MIMO Antenna System for LTE Handsets », IEEE transactions on antennas and propagation, vol.59, No. 8, august 2011
- [17] Gyubok Par, Minchan Kim, Taesik Yang, Joo Byun, and Austin S. Kim : « The Compact Quad-band Mobile Handset Antenna for the LTE700 MIMO Application », IEEE Antennas and propagation Society International Symposium, 2009.APSURSI409
- [18] sang-jin Eom, joong-hee lee, Austin kim, seong-ook park :«Broadband internal antenna for 700MHz LTE application with distributed feeder», Asia pacific Microwave Conference ,APMC 2009.
- [19] Lila Mouffok, Anne Claire Lepage, Julien Sarrazin, Xavier Begaud: «Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications», Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2012
- [20] Risto Valkonen, Mikko Kaltiokallio, Clemens Icheln: « Capacitive coupling element antennas for multi-standard mobile handsets», IEEE transactions on antennas and propagation, vol.61, no.5, 2013
- [21] Yonghun Cheon, Jungyub Lee, and Joonghee Lee: « Quad-Band Monopole Antenna Including LTE 700 MHz with Magneto-Dielectric Material », IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 11, 2012
- [22] Lila Mouffok, Anne Claire lepage, Julien sarrazin, and Xavier Begaud, :« Compact Dual-Band Dual-polarized Antenna for MIMO LTE Application », International journal of Antenna and propagation Volume 2012,Hindawi publishing Corporation.
- [23] Rashid Ahmad Bhatti, Soongyu Yi, and Seong-Ook: « Compact Antenna Array with Port Decoupling for LTE-Standardized Mobile Phones», IEEE Antennas And wireless propagation Letters, vol. 8, 2009

- [24] Jui-Han Lu, Senior Member: « Planar Compact LTE/WWAN Monopole Antenna for Tablet Computer Application », IEEE Antennas and wireless propagation letters, vol.12
- [25] kebbab Radhwane : «Conception d'antennes ultra large bande en technologie imprimée», Thèse de magister de télécommunication, en 2010
- [26] « Antenna theory analysis and design», C.A.Balanis, 2nd edition John Wiley and Sons, 1997
- [27] M. IE3d, Manuel IE3d version 14, Zeland software
- [28] [www.ctsystemes .com](http://www.ctsystemes.com)
- [29] [www. Zeland .com](http://www.Zeland.com)

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

CHAKAL Asma

&

TABOUCHE Yassmine

pour l'obtention du diplôme Master en Électronique option Télécommunication & Réseau

Thème

Conception et simulation d'un système antenne MIMO multi bande pour LTE

Proposé par : Dr HEBIB Sami

Année Universitaire 2013-2014

ملخص:

يتطلب دمج اثنين أو أكثر في نفس هوائيات المحطة المتنقلة . بالإضافة إلى كونها صغيرة الحجم، LTE في MIMO باستخدام تقنية تعض هذه الورقة تصميم و محاكاة لنظامين هوائي متعدد. LTE ينبغي لهذا النظام الهوائي متعددة تشمل أيضا نطاقات متعددة من الفرقة: يستند أولا على هوائيين في حين الثنائية من 4 هوائيات طبعت أنظمة الهوائي متعدد الفرقة كلا الابتدائية ضغط باستخدام تسكع من نوع الاحتكار. نتائج القياس للهوائي تأكيد هذا الأداء الجيد التي حصلت عليها محاكاة الكهرومغناطيسي.

كلمات المفاتيح: نظام الهوائي، متعدد الفرقة التعرج MIMO, LTE

Résumé :

L'utilisation de la technologie MIMO dans la norme LTE nécessite l'intégration de deux voire plusieurs antennes sur le même terminal mobile. De plus d'être compacte, ce système multi antenne doit également couvrir plusieurs bandes du LTE. Ce travail présente la conception et la simulation de deux systèmes antennaires multi-bandes : le premier est à base de deux antennes tandis que le second est composé de 4 antennes. L'antenne élémentaire multi-bande de ces deux systèmes est de type monopole imprimé compacté à l'aide de méandre. Les résultats de mesure de cette antenne de cette antenne confirment les bonnes performances obtenues par simulation électromagnétiques.

Mots clés : MIMO, LTE, système antenne, multi-bande, Méandre

Abstract : Using MIMO technology in LTE requires the integration of two or more antennas on the same mobile terminal .In addition to being compact, this multi antenna system should also cover multiple bands of LTE. This work presents the design and simulation of two multi-band antenna systems: the first is based on two antennas while the second is composed of 4 antennas. Multi-band antenna systems are miniaturized using meander line technique. The measurement results of the elementary antenna confirm the good performance obtained by electromagnetic simulation.

Keywords : MIMO ,LTE, Antenna system, Multi-band Meander

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que nous réservons cette page en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements et mes profondes reconnaissances vont spécialement à notre encadreur Mr **SAMI HEBIB** pour sa disponibilité, son aide, sa précieuse directive, son dévouement, Ses qualités humaines et scientifiques, sa patience, ses conseils généraux et pour la qualité de son encadrement aussi bien technique que morale, qui nous a permis de mener à terme ce projet de fin d'études. MERCI.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à l'ensemble du jury qui a accepté de juger ce travail.

Dédicaces

A mon père

Pour son grand amour, sa patience et ses considérables sacrifices

Pour me parvenir à ce niveau

A ma mère

Pour son grand amour, ses sacrifices et toute l'affection

qu'elle ma toujours offerte

*A mes frères **Sid ali** et mes sœurs **Wahiba, Faiza, zinab et douaa***

*A celui qui sera un jour prochain ma seconde moitié **Hamza***

*A mes chers amis **Asmaa, Ouidad***

*A mon binôme et ma sœur **Asma***

*Ma tantes **Siham***

*A tous mes amis et étudiants de ma promotion **R&T***

A tous ceux qui j'aime et qui m'aiment

yasmine

Dédicaces

A mon père et ma mère, aucune dédicace ne peut exprimer ce que je dois pour leurs efforts et leurs amours sans mesure, tous les sacrifices, les soutiens, Que Dieu les protège et leurs préserve bonheur et santé.

A mes sœurs: khadidja, Houda et Rihame.

A mes frères: Abderrazzak, Oussama, Aymane et Ayoub.

*A mon mari : **Mounir***

A mes meilleurs amis : Asmaa, yasmine, ouidad et wissam

A tous ceux que j'aime.

A tous ceux qui m'aiment.

Asma

Liste des acronymes et abréviations

1G	: Première Génération
2G	: Seconde Génération
3G	: Troisième Génération
3GPP	: Third Generation Partnership Project
4G	: Quatrième Génération
FDD	: Frequency Division Duplex
FR4	: Flame resistant 4
GSM	: Global System for Mobile communication
GPRS	: General Packet Radio Service
IE3D	: Integrated Electromagnetic 3D
LTE	: Long Term Evolution
MIMO	: Multiple Input Multiple Output
MISO	: Multiple Input Single Output
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation
QoS	: Quality of Service
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
SC-FDMA	: Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SISO	: Single Input Single Output
SIMO	: Single Input Multiple Output
TDD	: Time Division Duplex
UMTS	: Universel Mobile Télécommunications System

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : Généralités sur les antennes et la technique MIMO.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur les antennes	3
1.2.1 Définition d'une antenne.....	3
1.2.2Caractéristiques principales	5
1.2.2. a. Impédance d'entrée.....	5
1.2.2. b. Coefficient de réflexion	5
1.2.2. c. Directivité	6
1.2.2. d. Gain	6
1.2.2. e. Diagramme de rayonnement	7
1.2.2. f. Angle d'ouverture à - 3 dB	7
1.2.2. g. Différentes zone de rayonnement	8
1.3 Technique MIMO	9
1.3.1 Principe de la technique MIMO	9
1.3.2 Architecture MIMO	10
1.3.2.a Système SISO	10
1.3.2.b Système MISO	10
1.3.2.c Système SIMO	10
1.3.2.d Système MIMO	10
1.4 Conclusion	11
CHAPITRE 2 : Généralités sur la norme LTE	12
2.1 Introduction	12
2.2 L'évolution vers le 4G	12
2.3 Généralités sue la norme LTE.....	13
2.3.1 LTE (Long Term Evolution).....	13
2.3.2 Terminaux	15
2.3.3 Architecture du réseau LTE	15
2.4 Les bandes de fréquence pour différentes régions du monde	16

2.5 Etat de l'art sur les antennes compactes LTE.....	17
2.6 Conclusion	20
CHAPITRE 3 : Conception d'une antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE	
800/1800/2600 MHz.....	21
3.1 Introduction	21
3.2 Antenne mono- bande pour LTE 800	21
3.2.1 Antenne patch	22
3.2.1.a Rappels sur les antennes rectangulaires.....	22
3.2.1.b Simulation électromagnétique de l'antenne patch	24
3.2.2 Antenne monopole imprimée	27
3.2.3 Antenne monopole imprimée compacte	31
3.2.4 comparaison des performances	36
3.3 Antenne multi bande pour LTE 800/1800/2600 MHz	37
3.3.1 Conception et simulation	37
3.3.2 Réalisation de l'antenne multi –bande	41
3.3.3 Validation expérimentale	43
3.4 Conclusion	45
CHAPITRE 4 : Conception et simulation d'un système multi-antennaire et multi-bande	46
pour LTE	
4.1 Introduction	46
4.2 Système multi-antennaire et multi-bande à deux antennes.....	46
4.2.1 Technique de la ligne de séparation	48
4.2.2 Technique de la ligne de neutralisation	49
4.2.2.a Configuration 1	50
4.2.2.b Configuration 2	52
4.2.2.c Configuration 3	54
4.2.2.d Comparaison des performances des trois configurations.....	56
4.3 Système MIMO à quatre antennes	59
4.4 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Annexe	63
Bibliographie	65

Liste des figures

Figure 1.1 : Quelques types d'antennes	4
Figure 1.2 : Antenne en mode émetteur.....	5
Figure 1.3 : Différentes manières de représenter le diagramme de rayonnement.....	7
Figure 1.4 : Diagramme de rayonnement montrant l'angle d'ouverture à -3dB	8
Figure 1.5 : Zones de rayonnement d'une antenne	8
Figure 1.6 : Principe de la technique MIMO	10
Figure 1.7 : Différence entre SISO, SIMO, MISO et MIMO	11
Figure 2.1 : Pays équipés 2014 de réseaux mobiles LTE : réseaux commerciaux en rouge, réseaux en cours de déploiement en bleu foncé, réseaux en test en bleu clair	15
Figure 2.2 : Architecture générale du réseau LTE	16
Figure 2.3 : Bandes de fréquences allouées à la norme LTE	17
Figure 3.1 : Exemple d'une antenne patch de type rectangulaire	22
Figure 3.2 : Géométrie d'antenne patch sous IE3D.....	24
Figure 3.3 : Coefficient de réflexion d'antenne patch avec dimensions théoriques.....	25
Figure 3.4 : Coefficient de réflexion d'antenne patch optimisée.....	26

Figure 3.5 :	Représentation du diagramme de rayonnement en 3D.....	26
Figure 3.6 :	Représentation du diagramme de rayonnement en 2D.....	27
Figure 3.7 :	La configuration de l'antenne monopole imprimé	28
Figure 3.8 :	Le coefficient de réflexion d'antenne monopole imprimé théorique.....	29
Figure 3.9 :	Le Coefficient de réflexion de l'antenne monopole optimisée	29
Figure 3.10:	Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne monopole imprimée.....	30
Figure 3.11 :	Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne monopole imprimée.....	30
Figure 3.12 :	(a) Antenne monopole compacte sous IE3D (b) agrandissement de la partie rayonnante	31
Figure 3.13:	Coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_1	32
Figure 3.14 :	Coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_2 et W_3	33
Figure 3.15:	Trois positions pour l'excitation de l'antenne monopole compacte	34
Figure 3.16:	Coefficient de réflexion pour différentes positions de l'excitation de l'antenne.....	34
Figure 3.17:	Coefficient de réflexion de l'antenne compacte optimisée	35
Figure 3.18 :	Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne monopole compacte.....	36
Figure 3.19:	Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne monopole compacte.....	36

Figure 3.20: Antenne monopole imprimée avec élément rayonnant additionnel	
.....	38
Figure 3.21: Coefficient de réflexion simulé de la structure tri-bande optimisée	.....39
Figure 3.22 : Représentation du diagramme de rayonnement en 3D	.....40
Figure 3.23: Représentation du diagramme de rayonnement en 2D	.....40
Figure 3.24: Nouvelle configuration facile à exciter de l'antenne multi-bande	.....41
Figure 3.25 : Comparaison du coefficient de réflexion de l'antenne multi-bande initiale avec celle de la figure 3.23	.....42
Figure 3.26: Les masques de l'antenne à réaliser : (a) face avant (b) face arrière	.....42
Figure 3.27: Photographie de l'antenne multi-bande compacte réalisée : (a) face avant et (b) face arrière	.....43
Figure 3.28: Photographie montrant la mesure de l'antenne	.....44
Figure 3.29 : Coefficient de réflexion simulé et mesure de l'antenne multi-bande	.....44
Figure 4.1 : Configuration de l'antenne MIMO2x1 sur IE3D	.....47
Figure 4.2 : Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{12}|$ du système à deux antennes de la figure 4.1	.....47
Figure 4.3 : Trois configurations de lignes de séparation pour l'amélioration de l'isolation entre antennes	.....48

Figure 4.4 : Coefficients de réflexion $|s_{11}|$ et isolations $|s_{12}|$ des trois configurations de la figure	4.3
.....	49
Figure 4.5 : Plusieurs configurations de lignes de neutralisation	
.....	50
Figure 4.6 : Coefficients de réflexion $|s_{11}|$ et isolations $|s_{12}|$ de configuration1 de la figure	
4.5.....	51
Figure 4.7 : Le diagramme de rayonnement 3D de la Configuration 1	
.....	52
Figure 4.8 : Le diagramme de rayonnement 2D de la Configuration 1	
.....	52
Figure 4.9 : Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolations $|s_{12}|$ de configuration2 de la figure	
4.5.....	53
Figure 4.10 : Le diagramme de rayonnement 3D de la configuration 2	
.....	52
Figure 4.11 : Le diagramme de rayonnement 2D de la configuration 2	
.....	54
Figure 4.12 : Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolations $|s_{12}|$ de configuration3 de la figure	
4.10.....	55
Figure 4.13 : le diagramme de rayonnement 3D de la configuration 3	
.....	56
Figure 4.14 : le diagramme de rayonnement 2D de la configuration 3	
.....	56
Figure 4.15 : Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ de Comparaison des performances des trois configurations de la figure	
4.5.....	57
Figure 4.16 : isolations $|S_{12}|$ de Comparaison des performances des trois configurations de la figure	4.5
.....	57

Figure 4.17 :	Antenne MIMO à quatre antennes.....	59
Figure 4.18 :	Comportement du S_{11} , S_{22} , S_{33} et S_{44}	60
Figure 4.19 :	comportement du S_{12} , S_{13} et S_{14}	60
Figure A.1 :	Interface principale de l'IE3D.....	63
Figure A.2 :	Différentes fenêtres d'IE3D.....	64
Figure A.3 :	Différents états d'une structure en 2D et 3D.....	64
Figure A.4 :	Abaque de Smith.....	65
Figure A.5 :	Coefficient de réflexion S_{11} en dB.....	65
Figure A.6 :	La distribution de courant.....	65
Figure A.7 :	Le diagramme de rayonnement 3D.....	65
Figure A.8 :	Le diagramme de rayonnement 2D.....	66
Figure A.9 :	Le diagramme de rayonnement 2D.....	66

Liste des tableaux

Tableau 2.1 :	Caractéristiques	LTE
.....		15
Tableau 2.2 :	Classes des	terminaux
LTE.....		15
Tableau 2.3 :	Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes	
LTE.....		19
Tableau 3.1 :	Dimensions théoriques de l'antenne patch pour	
LTE800.....		25
Tableau 3.2 :	Dimension de l'antenne patch après optimisation sur	
IE3D.....		25
Tableau 3.3 :	Dimensions de l'antenne monopole compacte optimisée	
.....		35
Tableau 3.4 :	Comparaison des performances des trois antennes conçues à 800	
MHz.....		37
Tableau 3.5 :	Dimensions de l'antenne monopole compacte tri-bande	
optimisée.....		38
Tableau 3.6 :	Performances fréquentielles de l'antenne tri-	
bande.....		39
Tableau 4.1 :	Performances fréquentielles de la configuration	
2.....		58
Tableau 4.2 :	Performances fréquentielles de l'antenne MIMO à quatre antennes	
.....		60

Introduction générale

Aujourd'hui, les systèmes de communication sans fil sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive des câbles. Bien que les connexions à haut-débit de type ADSL se multiplient dans le monde, elles ne permettent pas la souplesse d'utilisation que procure un réseau radio sans fil. Pour améliorer la qualité de service qu'ils offrent, les chercheurs préparent l'arrivée de la future génération baptisée 4^{ème} génération (4G)

Les différents systèmes de communication mis en place auront donc besoin d'antennes de plus en plus compactes, fonctionnant sur une ou plusieurs fréquences, permettant notamment d'assurer la compatibilité des différentes normes ou d'accéder à de nombreux services à partir du même appareil.

Le but de ce stage est donc de concevoir dans un premier temps une antenne multi-bande couvrant les bandes LTE (800-1800-2600) pour l'Europe. Cette antenne doit être compatible avec dimension standard d'un Smartphone (120 x 50mm²). Dans un second temps, deux systèmes antennaires MIMO 2x1 et MIMO à quatre antennes seront conçues en utilisant comme brique de base l'antenne multi-bande précédente.

Ce rapport est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, des généralités sur les antennes et leurs caractéristiques ainsi que la technique MIMO et son principe sont donnés.

Dans le second chapitre nous présenterons la norme LTE, son principe de fonctionnement, son architecture ainsi que ses bandes de fréquence. Dans la littérature scientifique, plusieurs antennes ont été proposées pour le système LTE.

Le troisième chapitre sera consacré pour la simulation et pour la réalisation d'une antenne tri-bande compacte fonctionnant dans les trois bandes LTE réservées pour l'Europe (800/1800/2600 MHz).

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons dimensionné et simulé un système multi-antennaire multi-bande fonctionnant dans les bandes LTE

800/1800/2600 MHz. Afin d'avoir des bonnes performances en termes d'isolation deux techniques ont été investiguées : ligne de séparation et ligne de neutralisation. Cette dernière a été sélectionnée pour ses bonnes performances et deux systèmes multi-antennaires à base de cette ligne ont été conçus : une configuration 2x1 et configuration à quatre antennes.

1.1 Introduction :

Un dispositif permettant de transformer une onde électrique en une onde électromagnétique, et vice et versa, est appelé ANTENNE. En d'autres mots, l'antenne permet d'assurer la transmission d'énergie entre une source et l'espace libre dans lequel cette énergie va se propager. L'utilisation de deux antennes, l'une en émission et l'autre en réception permet de transmettre des informations sans avoir besoin d'éléments porteurs comme des fils, des guides, etc...

Dans ce chapitre, nous avons en premier lieu présenté quelques généralités sur les antennes et leur caractéristique. Ensuite, nous présentons la technique MIMO, son principe ainsi que son architecture.

1.2 Généralités sur les antennes [1-2]

Les systèmes de télécommunications utilisés permettant généralement l'échange d'informations dans différents milieux naturels, peuvent être décomposés en deux parties : une partie servant au traitement des signaux électriques contenant les informations à transmettre et une seconde partie permet la transformation de ces signaux électriques en ondes électromagnétique rayonnées dans l'espace. Cette dernière fonction est réalisée par des dispositifs appelés « antennes ».

1.2.1 Définition d'une antenne

Une antenne est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement.

Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une

onde rayonnée dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un dispositif qui permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques. Elle transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception.

Il y a beaucoup de types d'antennes Figure 1.1 présenté Quelques types d'antennes :

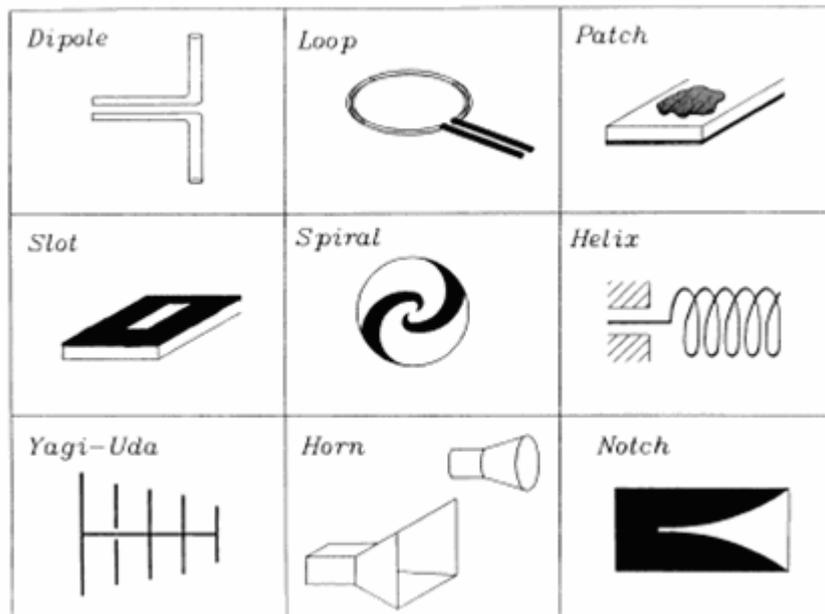


Figure 1.1 : Quelques types d'antennes [3]

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

- ❖ permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation
- ❖ assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- ❖ transmettre le plus fidèlement possible une information

Par ailleurs, afin de décrire les caractéristiques et les performances des antennes, divers paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont classés en deux groupes. Le premier groupe caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique (Z_{in} et S_{11}) et le second groupe s'intéresse à ses propriétés de rayonnement, tel que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain.

1.2.2 Caractéristiques principales [1-4]

Généralement, ces paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'apprécier la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation mais nous ne définirons que les trois principaux, à savoir l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et le rapport d'onde stationnaire.

1.2.2.a. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée (notée Z_e) est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes. Elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présenté à l'entrée (voir figure 1.2).

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (1.1)$$

où :

R = Résistance de l'antenne

X = Réactance de l'antenne

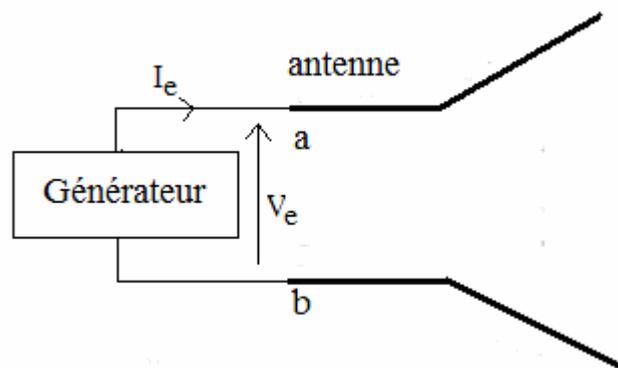


Figure 1.2 : Antenne en mode émetteur [3]

1.2.2.b. Coefficient de réflexion

On dit qu'une antenne est parfaitement adaptée lorsque son impédance d'entrée (Z_e) est égale à l'impédance de la ligne d'alimentation (Z_c), sinon on démontre qu'il apparaît un coefficient de réflexion Γ (ou S_{11}).

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} = \frac{\text{Onde réfléchie}}{\text{Onde incidente}} \quad (1.2)$$

Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11} \text{ (dB)} = 20 \log_{10} (|\Gamma|) \quad (1.3)$$

1.2.2.c. Directivité

La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope (P_r).

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{p(\theta, \phi)}{P_r} \quad (1.4)$$

La directivité maximale que l'on appelle souvent directivité est donnée par :

$$D_0 = \text{MAX}(D(\theta, \phi)) \quad (1.5)$$

La directivité, grandeur sans dimension, est généralement exprimée par sa valeur en décibels :

$$D \text{ |}_{\text{dB}} = 10 \log D_0 \quad (1.6)$$

1.2.2.d. Gain

Le gain $G(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_A} \quad (1.7)$$

P_A = puissance fournie par l'émetteur.

Généralement la valeur maximum de $G(\theta, \phi)$ prend la dénomination du gain de l'antenne.

$$G_0 = \text{MAX}(G(\theta, \phi)) \quad (1.8)$$

Le gain peut être exprimé en décibels :

$$G \text{ |}_{\text{dB}} = 10 \log G_0 \quad (1.9)$$

Une antenne isotrope n'a pas de gain, donc $G = 0$ dB. (C'est une antenne imaginaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions).

Une antenne dipôle possède un gain de 2,15 dB par rapport à l'antenne isotrope. On dit aussi qu'elle a un gain de 2,15 dBi.

1.2.2.e. Diagramme de rayonnement

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, ϕ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. La fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \phi)$ est donnée comme suit :

$$r(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{p_0(\theta, \phi)} \quad (1.12)$$

← Puissance rayonnée dans une direction quelconque
← Puissance rayonnée max

La figure 1.3 montre plusieurs types de représentation de diagrammes de rayonnement.

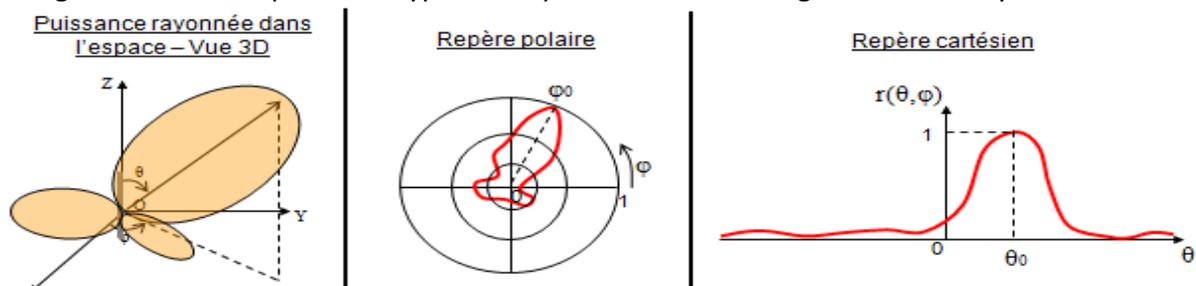


Figure 1.3 : Différentes manières de représenter le diagramme de rayonnement [4]

1.2.2.f. Angle d'ouverture à -3dB

L'angle d'ouverture à -3 dB caractérise la largeur du lobe principal. Il représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Un exemple d'un diagramme de rayonnement avec son angle d'ouverture est illustré par la figure 1.4.

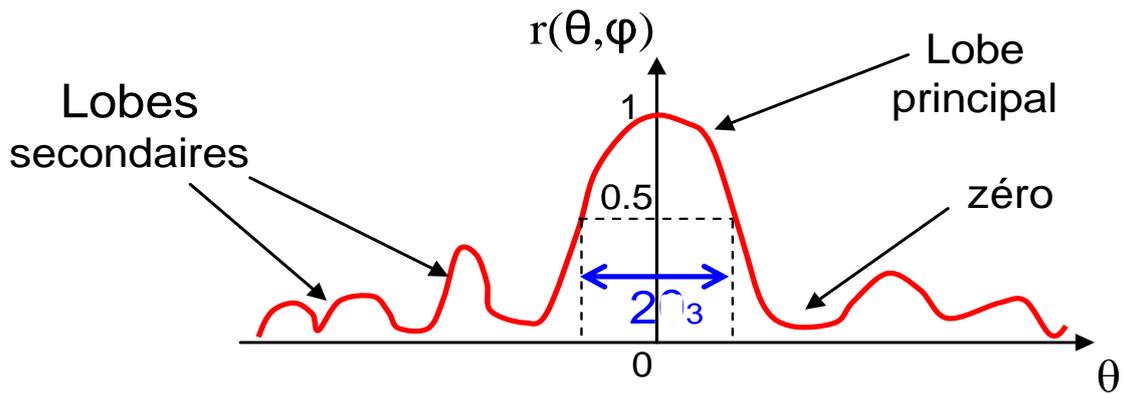


Figure 1.4 : Diagramme de rayonnement montrant l'angle d'ouverture à -3dB [3]

1.2.2.g. Différentes zones de rayonnement

On distingue trois zones de rayonnement d'une antenne : zone de Rayleigh, zone de Fresnel et zone de Fraunhofer. La figure 1.5 montre la variation de la densité de puissance en fonction de la distance r pour les trois zones. D représente le diamètre de la surface équivalente de l'antenne tandis que λ est la longueur d'onde.

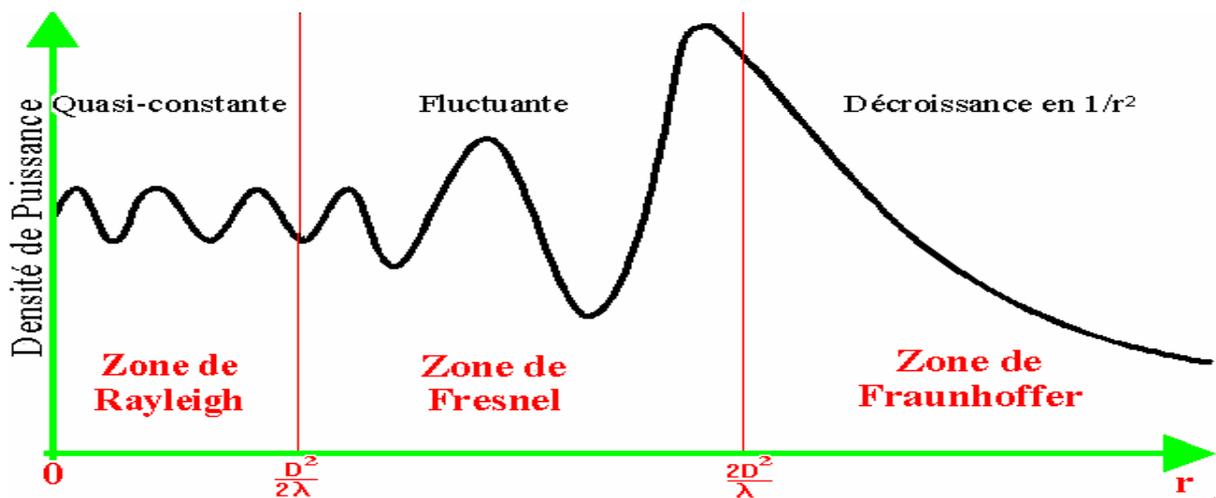


Figure 1.5 : Zones de rayonnement d'une antenne [4]

➤ 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), r

$< \frac{D^2}{2\lambda}$ la densité de puissance est quasi constante.

➤ **Zone de Fresnel :**

Dans la seconde zone, i.e., $\frac{D^2}{2\lambda} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$, la densité de puissance est fluctuante.

➤ **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'onde (quasiment) plane.

Dans cette zone, i.e., $r > \frac{2D^2}{\lambda}$, la densité de puissance décroît en $1/r^2$.

1.3 Technique MIMO

1.3.1 Principe de la technique MIMO [5]

Multiple-Input Multiple-Output ou MIMO est une technique utilisée dans les réseaux sans fil et les réseaux mobiles permettant des transferts de données à plus longue portée et à plus grande vitesse. En effet, dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (Single-Input Single-Output ou SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output) (figure 1.6). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes.

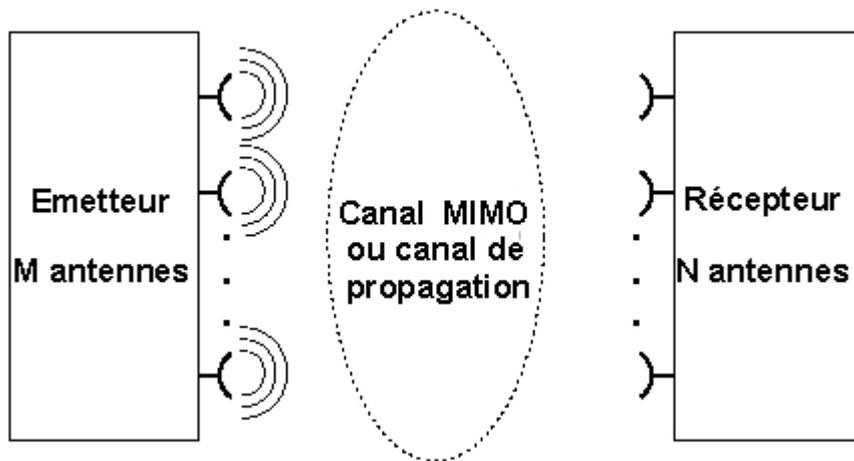


Figure 1.6: Principe de la technique MIMO [5]

1.3.2 Architecture MIMO [6]

De part le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer plusieurs configurations (systèmes). Cependant, ces architectures et particulièrement l'architecture MIMO, utilisent différentes fonctions de traitement du signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc. Ceci afin de permettre une meilleure performance du dispositif antenne.

1.3.2.a Système SISO (Single Input Single Output)

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception.

1.3.2.b Système MISO (Multiple Input Single Output)

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire Plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception.

1.3.2.c Système SIMO (Single Input Multiple Output)

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal.

1.3.2.d Système MIMO

La technologie MIMO permet de :

- Augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception.
- Contrer l'évanouissement du canal.
- Minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal.

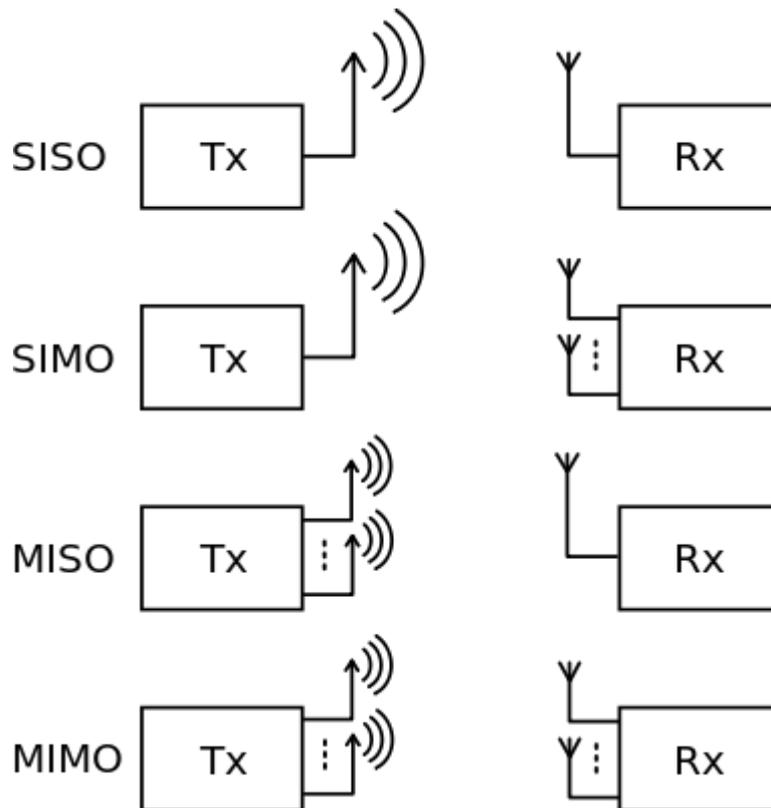


Figure 1.7 : Différence entre SISO, SIMO, MISO et MIMO [7]

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement quelques généralités sur les antennes en donnant leurs caractéristiques principales. Ensuite, le principe de la technique MIMO ainsi que son architecture ont été présentés.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la norme LTE la dernière génération de réseaux mobile.

Chapitre 2 Généralités sur la norme LTE

2.1 Introduction

La norme LTE (Long Term Evolution) est la norme de communication mobile qui est proposée par l'organisme 3GPP (3rd Generation Partnership Project) dans le contexte de la 4G. Le LTE définit l'évolution technologique des réseaux de télécommunications cellulaires pour les années à venir. Le LTE propose des débits élevés, et un meilleur niveau de QoS pour ses abonnés en introduisant de nouvelles architectures du réseau et en employant des nouvelles technologies comme l'OFDMA, le SC-FDMA et le MIMO. Maintenant, le LTE a été choisi par la plupart des opérateurs de téléphonie mobile dans le monde [8].

Dans ce chapitre, l'évolution vers le 4G et la norme LTE sera détaillée dans un premier temps. son architecture et ses bandes de fréquence

2.2 L'évolution vers le 4G [9]

Un réseau mobile est un réseau de communication composé de cellules, généralement considérées de la forme hexagonale. Ces cellules sont toutes juxtaposées l'une à l'autre afin d'assurer une meilleure couverture de la zone géographique considérée. Ces cellules peuvent être de tailles variables. En se basant sur cette répartition cellulaire, les réseaux mobiles opèrent en mode infrastructure, où tous les échanges transitent par un point d'accès, la station de base, desservant chacune une cellule sur une couverture sans fil donnée. Plusieurs générations de réseaux mobiles se sont défilées à travers le temps. Ce sont la 1G avec un mode de transmission analogique, la 2G qui marqua le passage à l'ère numérique, la 3G qui permet d'intégrer des services de voix et de données, ces dernières années, les recherches portent surtout sur l'analyse des réseaux de quatrième génération (4G).

2.3 Généralités sur la norme LTE

2.3.1 LTE (Long Term Evolution) [7]-[10]

Le LTE est une des technologies de la quatrième génération des communications mobiles développé sur différentes bandes de fréquences, Le LTE est concrètement la future évolution des systèmes de télécommunications mobiles et améliore la capacité et la rapidité des réseaux de téléphonie mobile par l'utilisation de différentes technologies comme la technique MIMO.

Les nouvelles normes LTE visent à améliorer l'efficacité spectrale, à diminuer la latence, à augmenter la performance du réseau, à offrir des débits élevés en situation de mobilité à grande ou faible vitesse, à permettre et à faciliter l'interconnexion et l'interopérabilité entre différentes technologies existantes et à réduire les coûts de déploiement et d'exploitation en introduisant de nouvelles architectures et technologies.

Le LTE est basé sur des techniques radios telles que la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant, la technique SC-FDMA (Single Carrier –Frequency Division Multiple Access) Pour le sens montant et la technique MIMO Pour l'émission-réception.

Les largeurs de bande du LTE peuvent s'étendre de 4 à 20 MHz en liaison montante comme en liaison descendante, ce qui permet à un opérateur d'adapter cette technologie aux bandes de fréquence qu'il possède. En outre, l'architecture MIMO contribue à augmenter les débits de transfert de données du LTE en autorisant plusieurs chemins de signaux.

Le LTE annonce un changement majeur dans la connexion mobile : des vitesses de connexion équivalentes à 100/50Mbps, davantage de services, une latence plus faible, une structure simplifiée et une optimisation du réseau pour les échanges de données sans séparation du canal audio à commutation de circuit, la figure 1.6 Montre le déploiement en 2014 de la norme LTE dans le monde.

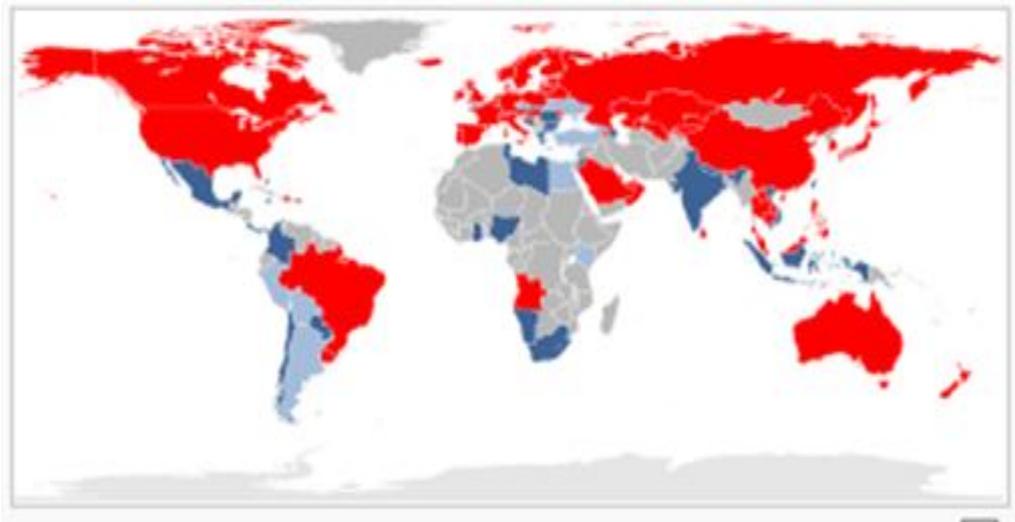


Figure 2. 1: Pays équipés 2014 de réseaux mobiles LTE : réseaux commerciaux en rouge, réseaux en cours de déploiement en bleu foncé, réseaux en test en bleu clair [11]

Le tableau suivant illustre quelques caractéristiques de la technologie LTE :

Caractéristique	Description
Flexibilité de la bande passante :	La norme LTE permet une bande passante extensible de 1,4 à 20 MHz, offrant une flexibilité à l'opérateur lors de l'utilisation du spectre.
Orthogonalité du DownLink et UpLink :	La liaison montante et la liaison descendante des utilisateurs, sont orthogonales entre elles (pas d'interférence intracellulaire)
Modulation et codage adaptatif :	Selon la qualité du canal, le LTE utilise les schémas de modulation et après plusieurs des systèmes de codage dans chaque modulation : <ul style="list-style-type: none"> • Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) • 16-Etat Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) • 64-Etat Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM)

FDD et TDD :	LTE utilise FDD et TDD.
La technologie d'antenne :	La technologie MIMO est utilisée dans la liaison descendante pour permettre d'améliorer le débit

Tableau 2.1 :Caractéristiques LTE [7]

2.3.2 Terminaux [12]

Les terminaux LTE peuvent être des téléphones (Smartphones), des tablettes, des clés-Modems USB ou tout autre type d'équipements fixes ou mobiles (GPS, ordinateur, écran vidéo, ...).Le 3GPPa défini 5 classes de terminaux LTE correspondant aux débits maximaux (montant et descendant) que doit supporter l'équipement et au type d'antenne qu'il intègre. Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques de ses classes:

Catégorie		1	2	3	4	5
Débit (Mbps)	DownLink	10	50	100	150	300
	UpLink	5	25	50	50	75
Bande passante		1.4 à 20 MHz				
Modulations	Downlink	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	Uplink	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Antennes	MIMO 2*2	non	oui			
	MIMI+O 4*4	Non				oui

Tableau 2.2 : Classes des terminaux LTE [12]

2.3.3 Architecture du réseau LTE [13]

Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences hertziennes, y compris dans les cellules radio mitoyennes, grâce aux codages radio OFDMA et SC-FDMA. Ceci permet d'affecter à chaque cellule une largeur spectrale plus importante, variant de 3 à 20 MHz et donc d'avoir une bande passante plus importante et plus de débit dans chaque cellule. La figure (1.7) représente l'architecture générale du réseau LTE et la figure (1.8) Représente la modulation OFDMA et SC-FDMA.

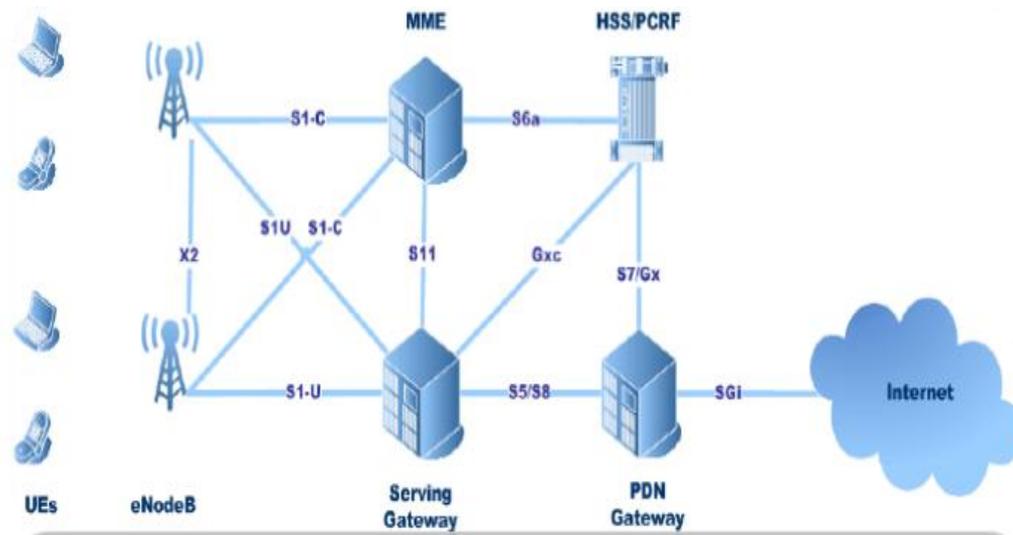


Figure 2.2 : Architecture générale du réseau LTE [12]

2.4 Les bandes de fréquence pour différentes régions du monde

La norme LTE couvre une gamme de plusieurs bandes différentes, dont chacune est désignée à la fois par une fréquence et un numéro de bande. En Amérique du Nord, 700, 850, 1900, 1700/2100 (AWS) et 2600 MHz; 2500 MHz en Amérique du Sud; 800, 900, 1800, 2600 MHz en Europe; 800, 1800 et 2600 MHz en Asie; et 1800 MHz et 2300 MHz en Australie et la Nouvelle-Zélande. En conséquence, les téléphones d'un pays peuvent ne pas fonctionner dans d'autres pays. Les utilisateurs auront besoin d'un téléphone capable multi-bande pour l'itinérance internationale [14].

La figure 2.5 fait la synthèse des bandes de fréquences allouées pour le standard LTE pour différentes régions du monde.

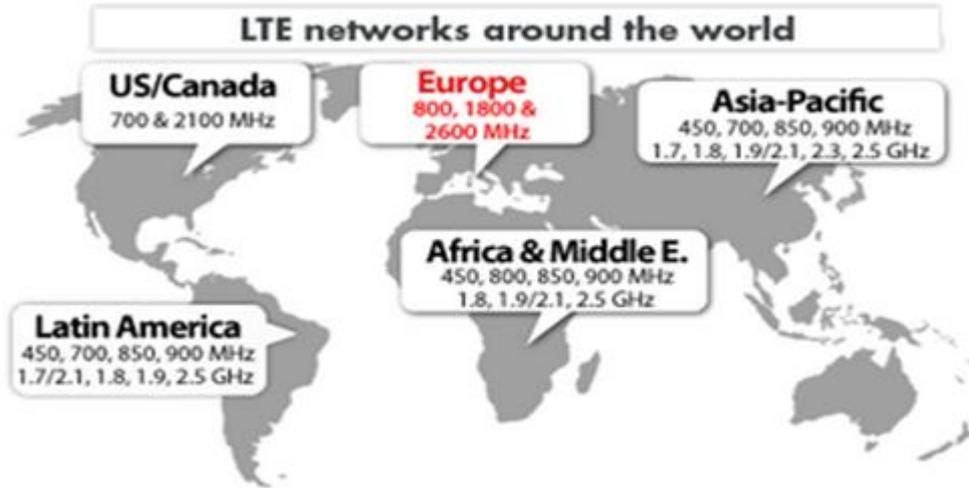
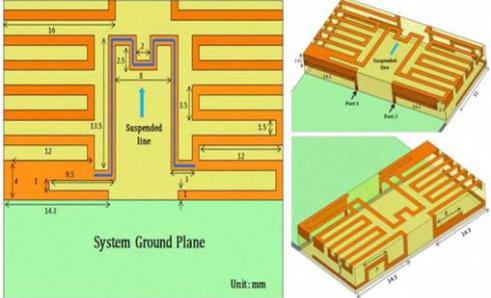
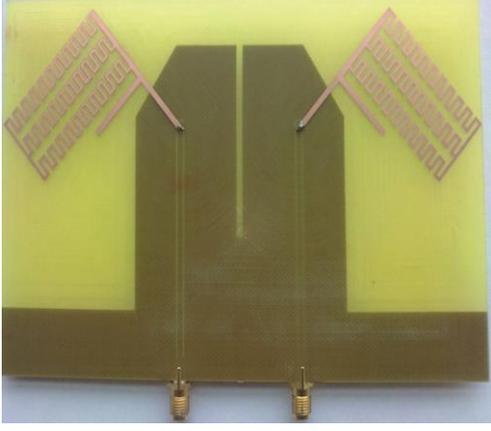
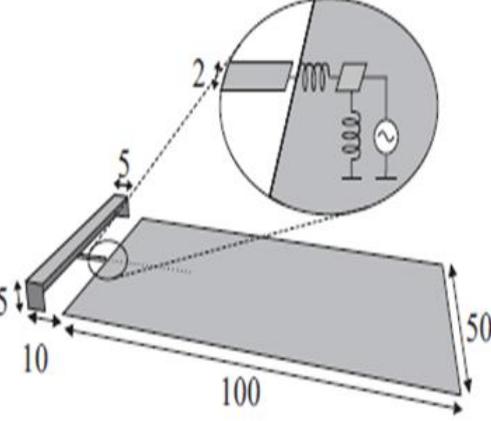


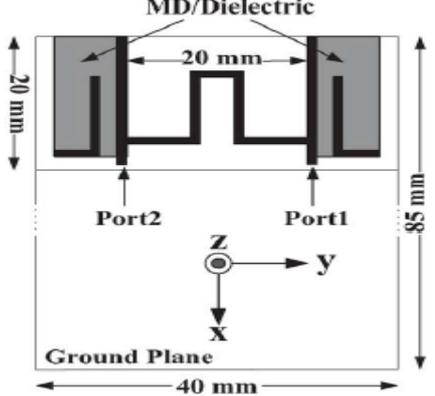
Figure 2.3 : Bandes de fréquences allouées à la norme LTE

2.5 Etat de l'art sur les antennes compactes LTE

Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes sont résumés dans le Tableau 2.3.

Titre de la publication	Fréquence MHz	Taille	Aperçu de l'antenne	Référence
Compact Dual-Band Monopole Antenna for LTE Mobile Phones	700 et 2500	120x50 mm ²		[15]
An 800 MHz compact MIMO Antenna System For LTE Handsets	760	40x50 mm ²		[16]

<p>The Compact Quad-band Mobile Handset Antenna for the LTE700 MIMO Application</p>	<p>700</p>	<p>40x20x5 mm³</p>		<p>[17]</p>
<p>Broadband internal antenna for 700 Mhz LTE application With distributed feeder</p>	<p>700</p>	<p>59x5.9 x6.2 mm³</p>		<p>[18]</p>
<p>Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications</p>	<p>700 et 2500</p>	<p>150x90 mm²</p>		<p>[19]</p>
<p>Capacitive coupling element antennas for multi-standard mobile handsets</p>	<p>700 et 2500</p>	<p>50x100 mm²</p>		<p>[20]</p>

<p>Quad-Band Monopole Antenna Including LTE 700 Mhz With Magneto-Dielectric Material</p>	<p>700</p>	<p>40x85 mm²</p>		<p>[21]</p>
------------------------------------------------------------------------------------------	------------	-----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------

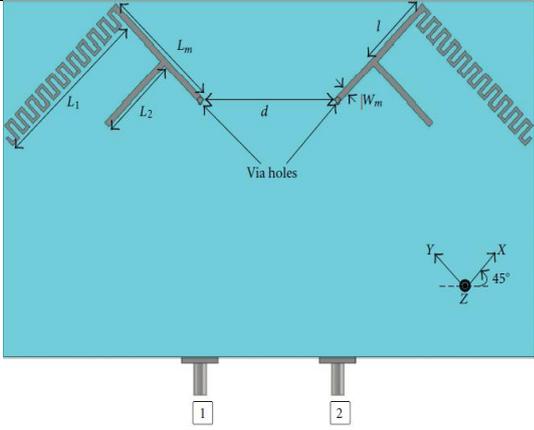
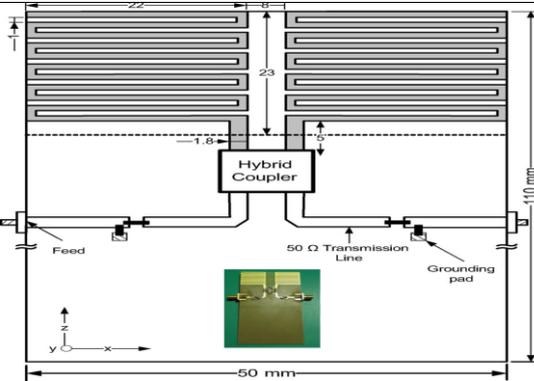
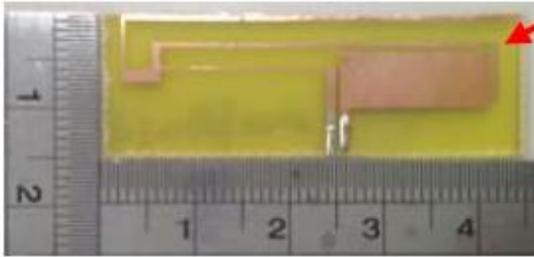
<p>Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications</p>	<p>700–862 Et 2.5-2.69</p>	<p>140 × 83 mm²</p>		<p>[22]</p>
<p>Compact Antenna Array With Port Decoupling For LTE-Standardized Mobile Phones</p>	<p>710</p>	<p>110x 50 mm²</p>		<p>[23]</p>
<p>Planar Compact LTE/WWAN Monopole Antenna for Tablet Computer Application</p>	<p>700 et 2690</p>	<p>45 × 15 mm²</p>		<p>[24]</p>

Tableau 2.3 : Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes LTE

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction générale au standard LTE, son principe de fonctionnement ainsi que son architecture et Les bandes de fréquence allouées pour cette norme. Dans la littérature scientifique, plusieurs antennes ont été proposées pour le système LTE. La problématique était principalement la couverture de plusieurs bandes et la réduction de l'encombrement des antennes. Dans le chapitre suivant, nous présenterons la Conception d'une antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE 800/1800/2600 MHz.

Chapitre 3 : Conception d'une antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE 800/1800/2600 MHz

3.1 Introduction

La multiplicité des bandes dans les systèmes de télécommunication mobile a engendré des besoins d'antennes multi-bandes performantes et surtout de taille réduite afin d'être facilement intégrées dans les terminaux mobiles de plus en plus compacts.

Il s'agit dans ce chapitre de concevoir une antenne tri-bande compacte fonctionnant dans les trois bandes LTE réservées pour l'Europe (800/1800/2600 MHz). Cette antenne doit présenter une taille compacte ($<120 \times 50 \text{mm}^2$) afin qu'elle puisse être intégrée dans des terminaux mobile de taille d'un Smartphone.

Notre choix s'est porté sur quelques antennes imprimées omniprésentes dans notre vie quotidienne et très utilisées dans différents domaines à savoir l'antenne patch et l'antenne monopole imprimée. Afin de satisfaire les spécifications en termes de taille, cette dernière a été compactée à l'aide de profils irréguliers de type Méandre. Le comportement multi-bande a été obtenu en ajoutant un élément annexe à cette antenne.

Nous terminons ce chapitre par la réalisation du prototype retenu. Les résultats de mesure confirment les bonnes performances prédites par la simulation.

3.2 Antenne mono-bande pour LTE800

Dans cette partie on s'intéressera à la conception d'une antenne mono-bande travaillant dans la bande européenne la plus basse du système LTE à savoir 800 MHz. La fréquence de fonctionnement étant inversement proportionnelle à la taille de l'antenne, le choix de la bande 800 MHz permet d'estimer dans une certaine mesure la taille maximale occupée par l'antenne.

L'outil de conception utilisé est IE3D adapté à la simulation électromagnétique des antennes imprimées. Plus de détails sur cet outil sont présentés en Annexe.

Trois antennes imprimées ont été dimensionnées à 800 MHz : une antenne patch, une antenne monopole imprimé et enfin une antenne monopole imprimée compacte. Enfin, les performances et la taille des ces trois antennes ont été comparés.

3.2.1 Antenne patch

3.2.1.a. Rappels sur les antennes patch rectangulaires [25]

Une antenne patch, dans sa forme la plus simple, consiste en un élément rayonnant d'un côté du substrat diélectrique et d'un plan de masse de l'autre côté. Dans sa version rectangulaire (voir figure 3.1), cette antenne est constituée d'un élément rayonnant de forme rectangulaire de longueur L et de largeur W , imprimé sur un substrat d'une épaisseur h et de permittivité ϵ_r . L'élément rayonnant peut être alimenté de plusieurs façons : ligne micro-ruban, ligne coaxiale ou par coulage. La figure 3.1 montre la technique d'excitation à l'aide de ligne micro-ruban.

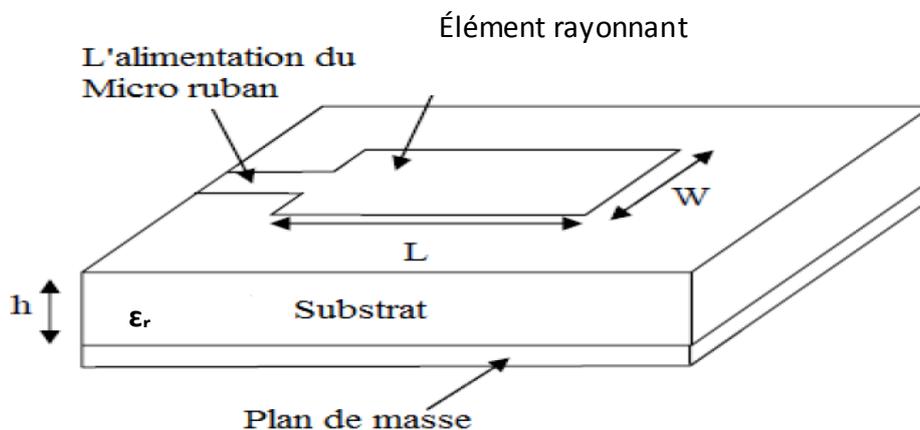


Figure 3.1 : Exemple d'une antenne patch de type rectangulaire [25]

Nous savons que la propagation des ondes dans un linge micro-ruban s'effectue, à la fois, dans le milieu diélectrique et dans l'air.

L'expression de la permittivité effective (ϵ_{reff}) est donnée par Balanis [26] comme suit :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} - \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \quad (3.1)$$

avec

ϵ_{reff} : Constante diélectrique effective

ϵ_r : Constante diélectrique

h : Epaisseur du substrat diélectrique

W : Largeur du patch

L'expression de la fréquence de résonance du mode (m,n) est donnée comme suit :

$$f_{m,n} = \sqrt{\left(\frac{m}{W_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (3.2)$$

m et n : modes de cavités, entiers >0

L_{eff} : longueur effective du patch

W_{eff} : largeur effective du patch

et

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.813\right)} \quad (3.3)$$

Δw s'obtient en remplaçant la largeur W par la longueur L dans l'équation (3.3).

La largeur du patch W est donnée comme suit :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (3.4)$$

Où le terme f_{01} représente la fréquence du mode fondamentale de l'antenne.

Pour permettre un bon rendement de l'antenne , une longueur pratique est égale à :

$$L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

L'équation qui sert à déterminer l'impédance d'entrée du patch à une distance y_0 du bord du patch est la suivante :

$$\text{Rin}(y = y_0) = \frac{1}{2G_r} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (3.6)$$

Avec

$$G_r = \frac{w}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2\right] \quad (3.7)$$

Et

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3.8)$$

Tel que λ_0 est la longueur d'onde en espace libre.

3.2.1.b. Simulation électromagnétique de l'antenne patch

Le substrat choisi pour la simulation de cette antenne est de type FR4 avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$ et une épaisseur $h=1.6\text{mm}$. Les dimensions analytiques d'un patch fonctionnant à 800 Mhz issues des équations de la partie précédente sont résumées dans le tableau 3.1. La largeur de la ligne d'excitation (W_f) de type micro-ruban a été prise égale 3.05mm afin d'assurer une impédance caractéristique de 50 Ω .

Le modèle de simulation sur IE3D du patch est montré par la figure 3.2.

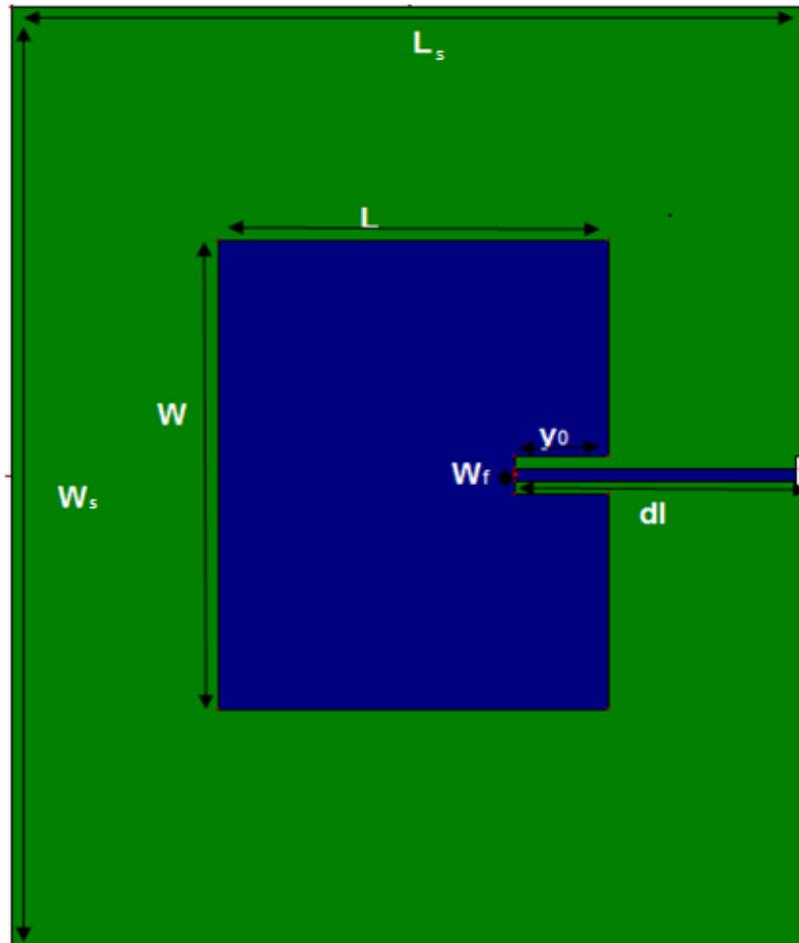


Figure 3.2 : Géométrie d'antenne patch sous IE3D

Paramètres	W	L	Y_0	dl	W_f	W_s	L_s
Valeurs (mm)	114	89.24	20	64	3.05	228	178.86

Tableau 3.1 : Dimensions théoriques de l'antenne patch pour LTE800

La simulation a été réalisée avec plan de masse de dimension finie. Nous avons choisi un plan de masse de grandeur deux fois supérieure à la dimension du patch.

Le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne patch ayant les dimensions théoriques du tableau 3.1 est illustré par la figure 3.3.

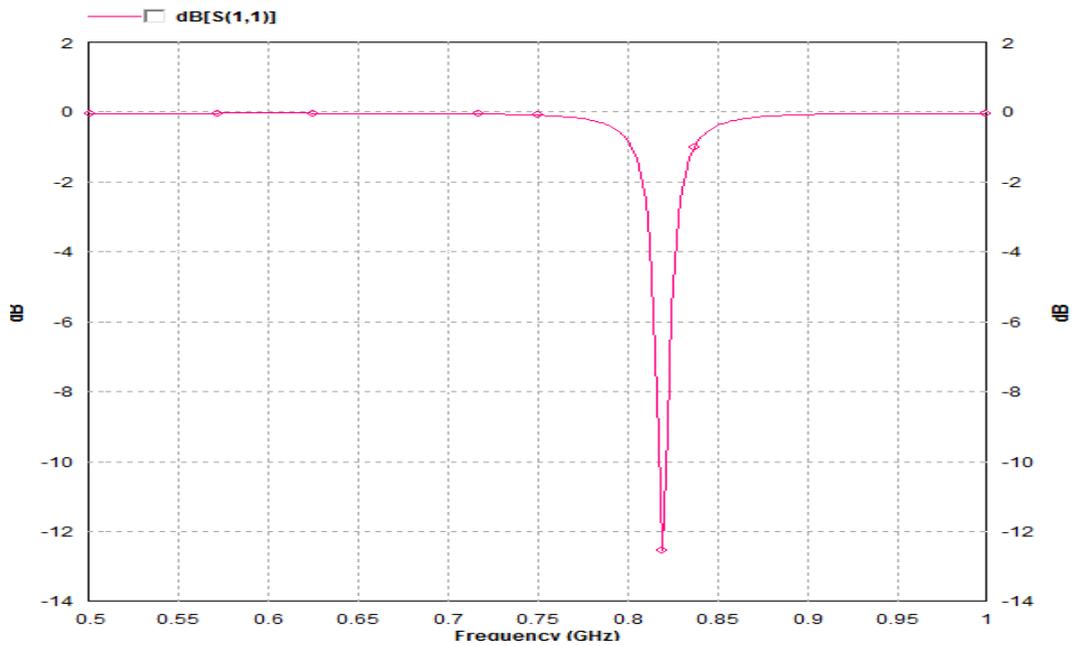


Figure 3.3 : Coefficient de réflexion d'antenne patch avec dimensions théoriques

La figure 3.3 montre un décalage de la fréquence de fonctionnement. En effet, au lieu d'obtenir une fréquence centrée sur 800 Mhz, la simulation indique une fréquence de 830 Mhz. Les nouvelles dimensions optimisées pour retrouver la fréquence de fonctionnement sont données dans le tableau 3.2.

Paramètre	W	L	W_f	d_l	Y_0	W_s	L_s
Valeurs (mm)	114	91.94	3.05	66	22	228	178.86

Tableau 3.2 : Dimension de l'antenne patch après optimisation sur IE3D

Les résultats obtenus pour le comportement du coefficient de réflexion sont illustrés dans la figure 3.4.

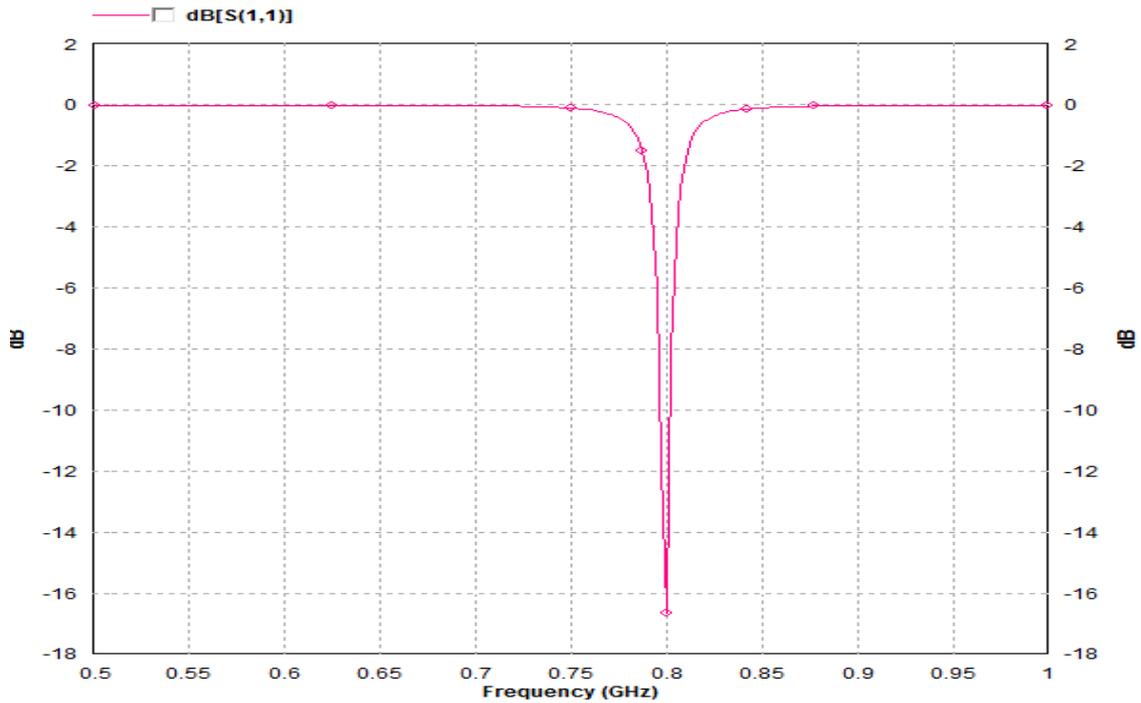


Figure 3.4 : Coefficient de réflexion d'antenne patch optimisée

L'analyse de ces résultats (figure 3.4), indique que la fréquence est maintenant centrée à 800 MHz avec une bonne adaptation ($|S_{11}|_{dB} = -17$ dB), et avec une bande passante assez étroite 0.375%.

Les figures 3.5 et 3.6 montrent les diagrammes de rayonnement 3D et 2D respectivement. Le gain maximal de cette antenne est de 5.03 dBi

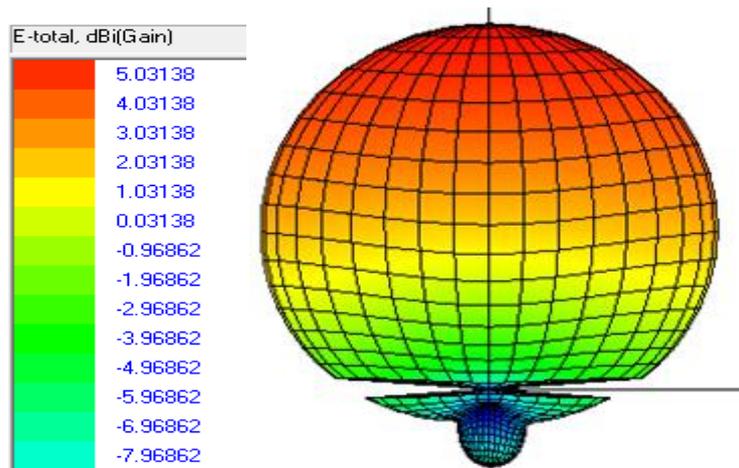


Figure 3.5 : Représentation du diagramme de rayonnement en 3D

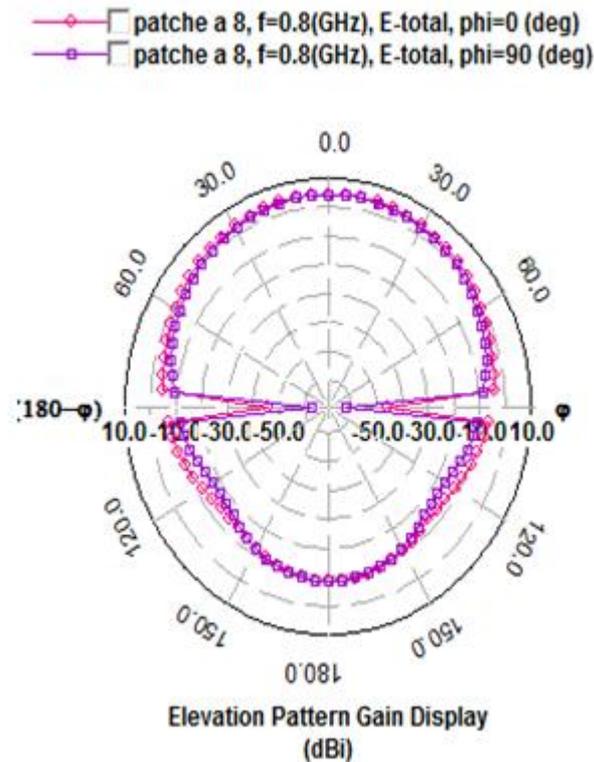


Figure 3.6 : Représentation du diagramme de rayonnement en 2D

Le diagramme de rayonnement obtenu est celui d'une antenne patch classique avec un rayonnement unilatéral dû à la présence d'un plan de masse au dessous de l'antenne.

Malgré les bonnes performances affichées par l'antenne patch, sa dimension ($228 \times 178.86 \text{mm}^2$) reste très encombrante et ne permet pas ainsi son intégration dans les Smartphones actuels.

Pour cette raison, nous nous intéresserons dans la suite à un autre type d'antenne qui est le monopole imprimé.

3.2.2 Antenne monopole imprimée

Une des antennes les plus largement utilisées et cela dès la création des systèmes de communication mobiles est l'antenne monopole. Les antennes monopoles ont une forme très simple, d'un fouet d'une hauteur de $\lambda/4$ au-dessus d'un plan de masse, théoriquement infini.

Pour des raisons d'intégration et de fabrication aisée des versions monopoles imprimés peuvent également être utilisés. La figure 3.7 montre une antenne monopole imprimée sous l'interface d'IE3D. Elle rayonne en polarisation linéaire et avec un diagramme de rayonnement quasi-omnidirectionnel.

Le substrat utilisé pour la conception de l'antenne monopole imprimée est de type Ro4003c de permittivité relative $\epsilon_r = 3.55$ et d'épaisseur $h = 0.508$ mm.

Dans un premier temps, nous avons simulé une antenne monopole imprimée de longueur $L_1 = \lambda/4$ (voir Figure 3.7). Tel que λ est la longueur d'onde en espace libre à 800 MHz. Ceci donne une longueur L_1 égale à 93mm. La dimension du plan de masse a été prise égale à $L_p = 96$ mm x $W = 50$ mm tandis que la largeur (W_1) du monopôle est fixée à 0.5 mm. Le coefficient de réflexion correspondant est illustré par la figure 3.8.

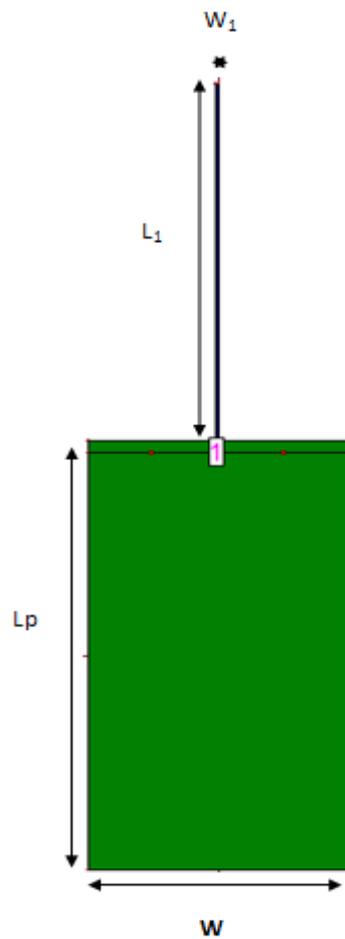


Figure 3.7 : La configuration de l'antenne monopole imprimé

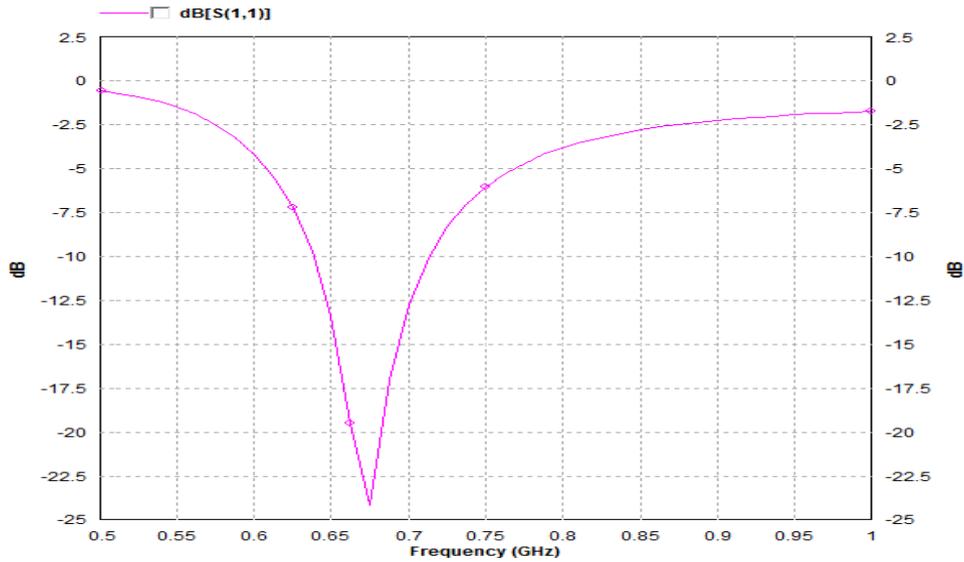


Figure 3.8 : Le coefficient de réflexion d'antenne monopole imprimé théorique

Dans la figure 3.8, on remarque que la fréquence de résonance est centrée sur 675 MHz au lieu des 800 MHz attendus. L'ajustement de la longueur L_1 (premier responsable de la fréquence de résonance) est donc nécessaire afin de corriger ce décalage. La nouvelle longueur obtenue par simulation est $L_1=75$ mm. Le nouveau coefficient de réflexion de l'antenne est présenté par la figure 3.9.

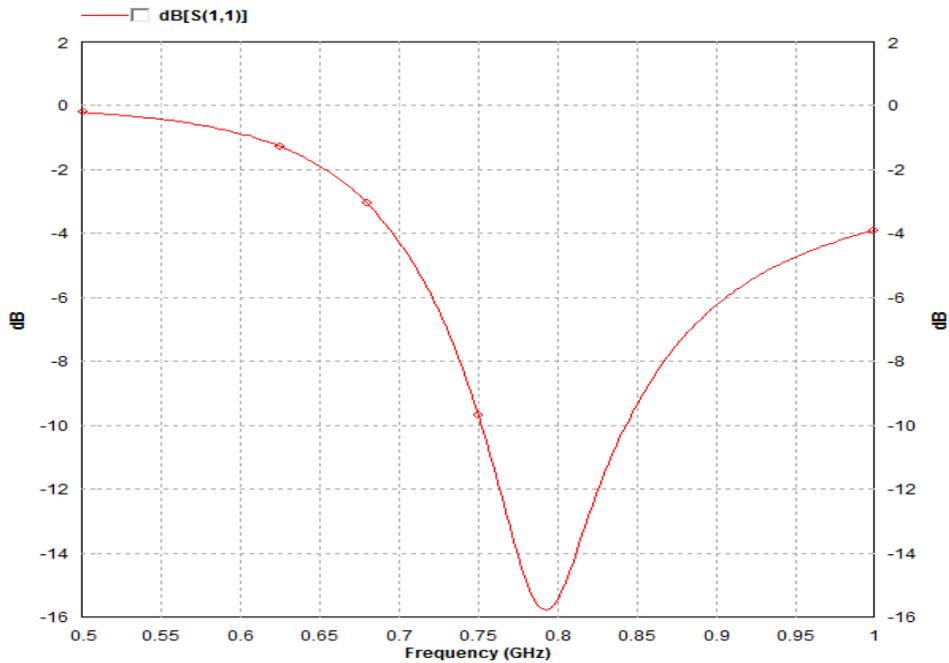


Figure 3.9 : Le Coefficient de réflexion de l'antenne monopole optimisée

A la fréquence de résonance, i.e., 800MHz, on enregistre un coefficient de réflexion $|S_{11}| = -16$ dB et une bande passante de 11.60%.

Les figures 3.10 et 3.11 montrent le diagramme de rayonnement de l'antenne monopole à 800 Mhz en 3D et 2D respectivement.

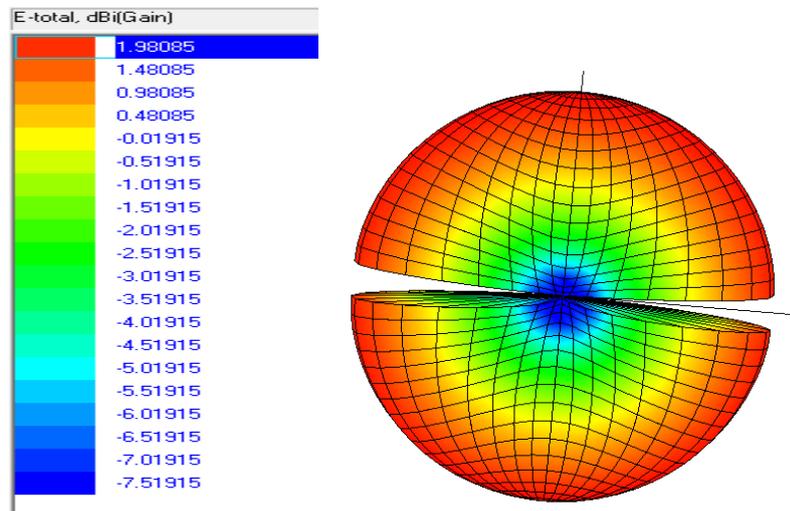


Figure 3.10: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne monopole imprimée

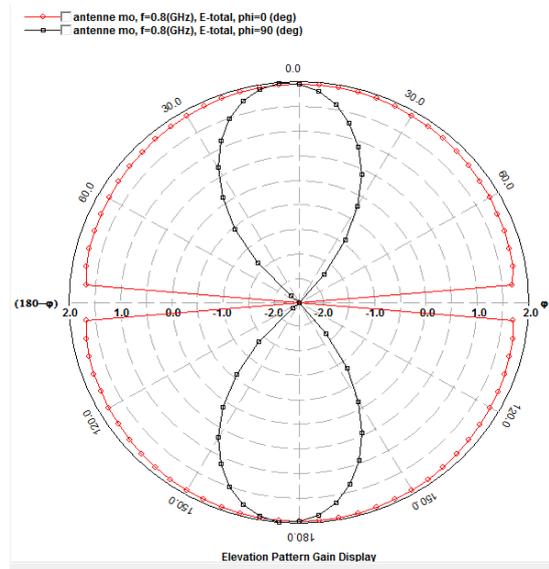


Figure 3.11 : Diagramme de rayonnement 2D de l'antenne monopole imprimée

A partir des figure 3.10 et 3.11, on constate un gain maximal de l'antenne de 1.98 dBi avec un rayonnement de type omnidirectionnel.

Malgré les bonnes performances obtenues par l'antenne monopole, sa dimension totale ($171 \times 50 \text{ mm}^2$) reste encombrante et ne permet pas ainsi son intégration dans les Smartphones actuels. Afin de remédier à cet inconvénient, nous avons proposé dans la partie suivante l'utilisation de la technique du méandre pour la réduction de la taille du monopole.

3.2.3 Antenne monopôle imprimée compacte

Dans cette partie, l'antenne proposée est un monopole imprimé compactée à l'aide de profils irréguliers de type méandre. L'utilisation de tels profils permet de réduire significativement la taille de l'antenne tout en gardant sa longueur électrique presque inchangée (proche d'un quart de longueur d'onde). La figure 3.12 montre la structure de l'antenne monopole compacte. Le substrat utilisé est le même que celui de l'antenne monopole simple précédente ($\epsilon_r = 3.55$ et épaisseur = 0,508 mm). Egalement, les dimensions du plan de masse restent inchangées (taille : $L_p = 96 \text{ mm} \times W = 50 \text{ mm}$).

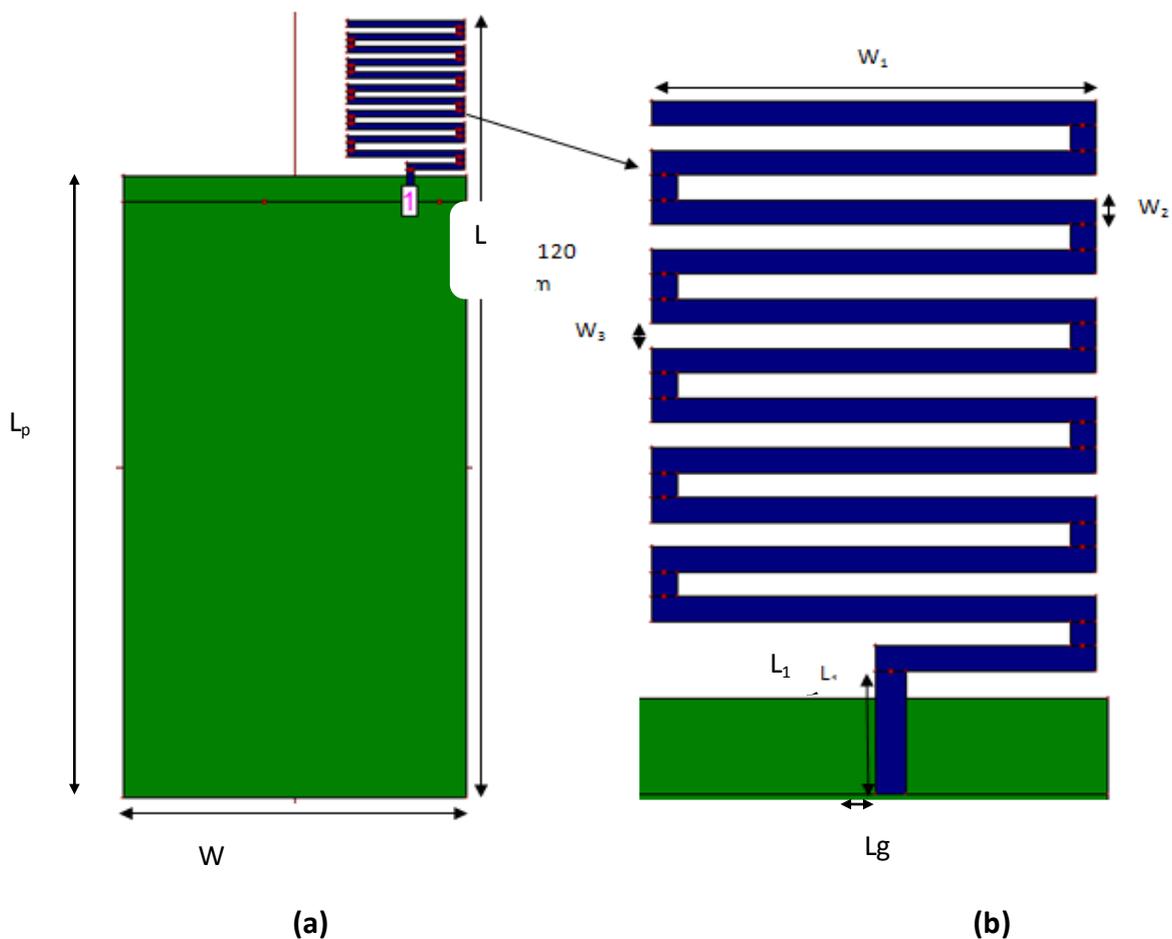


Figure 3.12 : (a) Antenne monopole compacte sous IE3D (b) agrandissement de la partie rayonnante

Pour un fonctionnement à 800 MHz, la partie rayonnante occupe un espace $24 \times 50 \text{ mm}^2$. La dimension totale de l'antenne (plan de masse + partie rayonnante) égale à $L = 120 \text{ mm} \times W = 50 \text{ mm}$ qui est compatible avec la dimension standard des Smartphones ($120 \times 50 \text{ mm}^2$) [15]. La largeur de la ligne d'excitation (L_g) de type micro-ruban a été fixé à 1.13 mm afin d'assurer une impédance caractéristique de 50Ω .

En plus de réduire la taille de l'antenne, l'utilisation de méandre permet d'introduire d'autres degrés de liberté pour l'optimisation des performances globales de l'antenne. En effet, les variations des paramètres représentés sur la figure 3.12 (W_1, W_2, W_3) permettent d'ajuster plus finement le comportement de l'antenne. Des études paramétriques ont été effectuées pour comprendre les effets des différents paramètres dimensionnels. Cela nous a permis par la suite de bien optimiser l'antenne finale.

La figure 3.13 montre les coefficients de réflexion issus de l'étude paramétrique sur la largeur W_1 . L'étude est faite en variant cette largeur de 11 mm à 23 mm par des pas de 3 mm tout en fixant les autres dimensions ($L=120 \text{ mm}$, $W=50 \text{ mm}$, $W_2=1 \text{ mm}$, $W_3=1 \text{ mm}$, $L_1=4 \text{ mm}$, $L_g=1.13 \text{ mm}$).

Antenne mono bande $W_1=11 \text{ mm}$
Antenne mono bande $W_1=14 \text{ mm}$
Antenne mono bande $W_1=17 \text{ mm}$
Antenne mono bande $W_1=20 \text{ mm}$
Antenne mono bande $W_1=23 \text{ mm}$

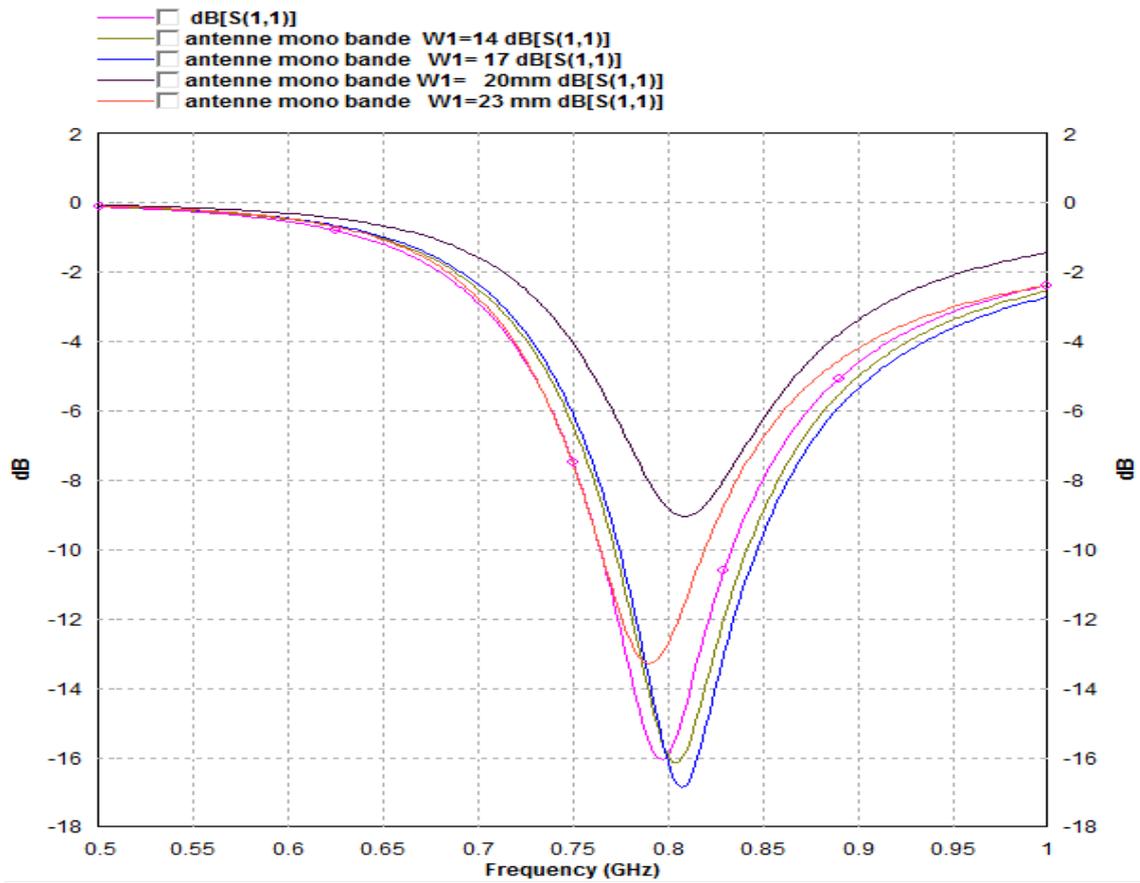


Figure 3.13: Coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_1

On constate que le meilleur résultat en termes d'adaptation est obtenu pour $W_1=17$ mm avec un $|S_{11}|=-17$ dB.

Ensuite, une étude paramétrique est effectuée sur les longueurs W_2 (largeur de brin) et W_3 (écart entre brins) en les prenant égales. La figure 3.14 donne les coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_2 et W_3 (tel que $W_2 = W_3$ et varient par pas de 0,5mm de 0,5mm à 1,5mm).

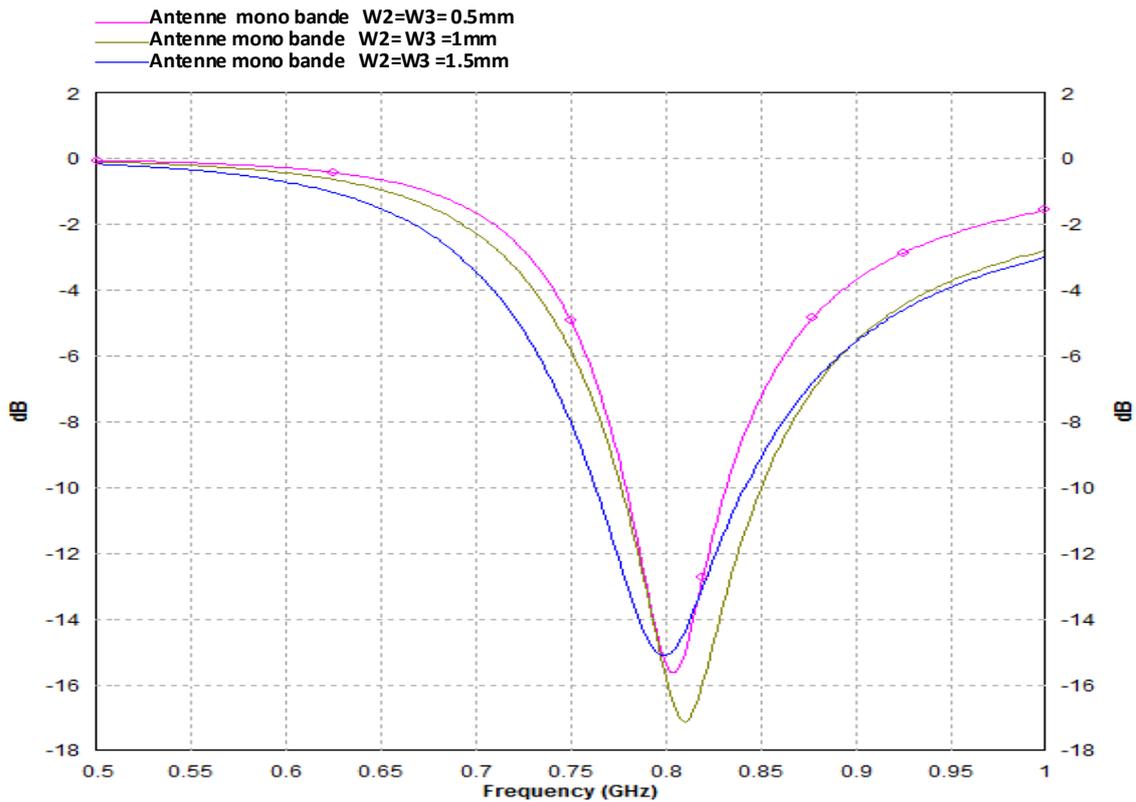


Figure 3.14 : Coefficients de réflexion pour différentes valeurs de W_2 et W_3

La variation du module du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence, montre que W_2 et W_3 influent légèrement sur l'adaptation de l'antenne. La meilleure adaptation est enregistrée pour $W_2=W_3=1\text{mm}$.

Afin d'étudier l'influence de l'endroit d'excitation de l'antenne, une étude a été menée sur la position de celle-ci. Trois positions ont été testées comme illustré sur la figure 3.15. Les coefficients de réflexion correspondants sont représentés sur la figure 3.16.

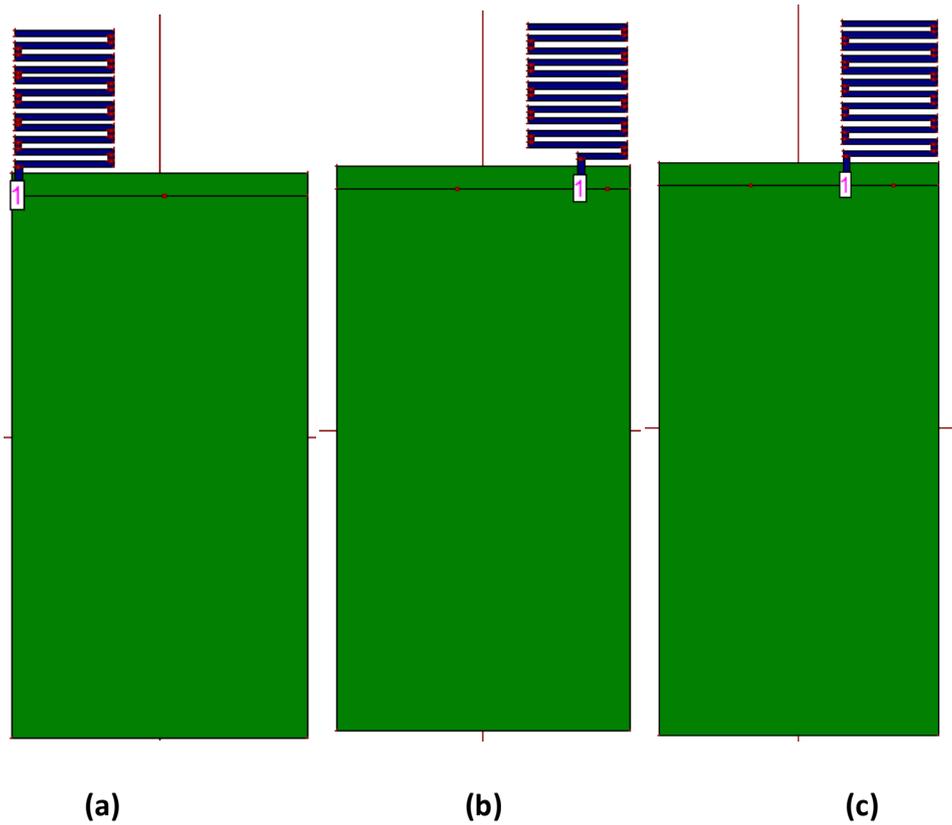


Figure 3.15 : Trois positions pour l'excitation de l'antenne monopole compacte

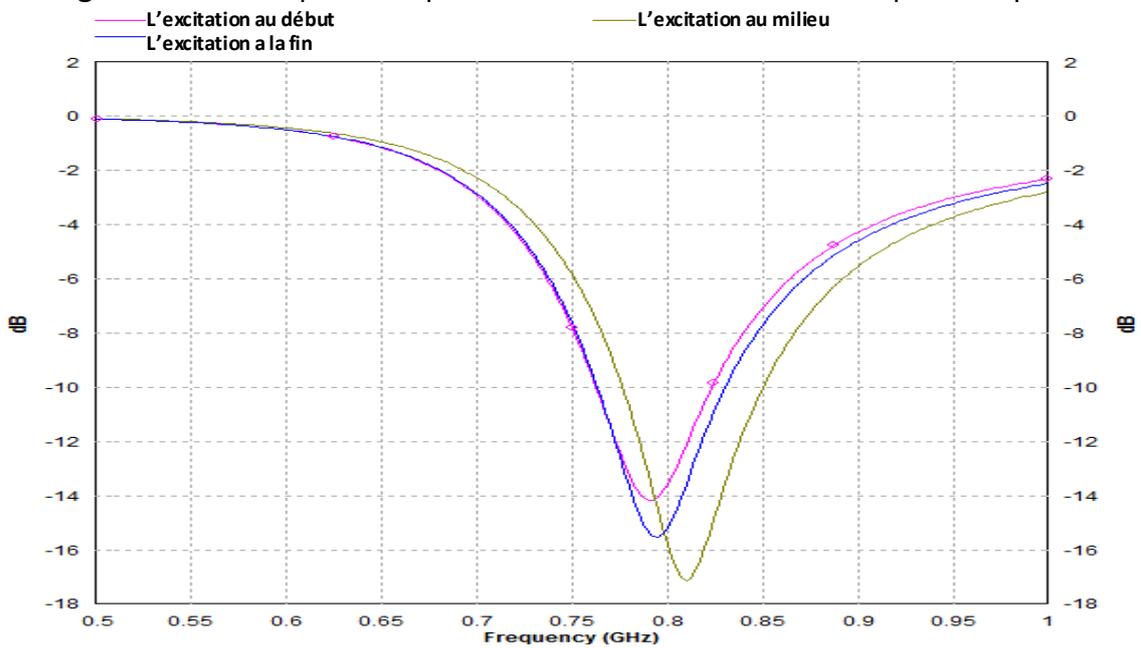


Figure 3.16: Coefficient de réflexion pour différentes positions de l'excitation de l'antenne

La figure 3.16 montre que l'excitation d'antenne a une influence sur le coefficient de réflexion S_{11} . Il est à noter que l'excitation au milieu de l'antenne (Figure 3.15.b) est celle qui possède la meilleure adaptation ($|S_{11}| = -17\text{dB}$).

En se reposant sur ces études paramétriques effectuées sur les paramètres structurels de l'antenne compacte, une solution optimisée fonctionnant à 800 MHz a été identifiée. Ces dimensions sont résumées dans le Tableau 3.3.

Paramètres	W	L	W_1	L_1	$W_2=W_3$	L_g
Valeurs (mm)	50	120	17	4	1	1.13

Tableau3.3 : Dimensions de l'antenne monopole compacte optimisée

Les résultats de simulation obtenus pour l'antenne compacte optimisée sont montrés sur les figures 3.17 ,3.18 et 3.19. La figure 3.17 donne le coefficient de réflexion S_{11} .

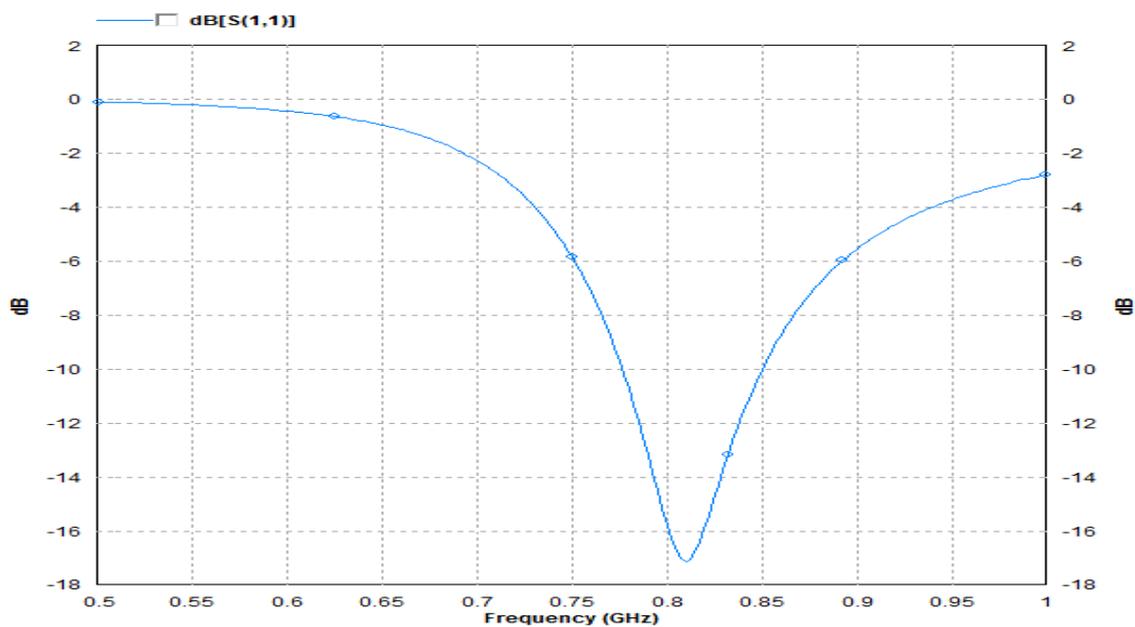


Figure 3.17: Coefficient de réflexion de l'antenne compacte optimisée

Il est à noter que l'antenne est bien adaptée à 800 Mhz car elle présente un ($|s_{11}|=-17$ dB). Les figures 3.18 et 3.19 montrent le diagramme de rayonnement en 3D et 2D respectivement. De ces figures, le gain maximal de l'antenne est de 1.75 dBi et le rayonnement est de type quasi omnidirectionnel.

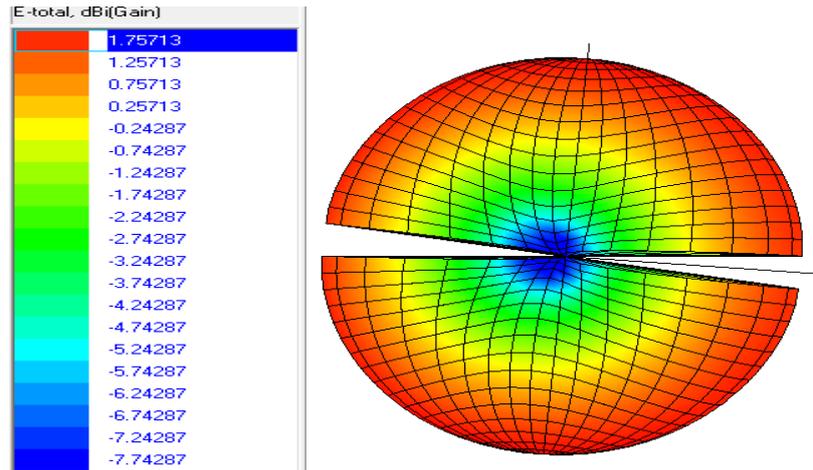


Figure 3.18: Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne monopole compacte

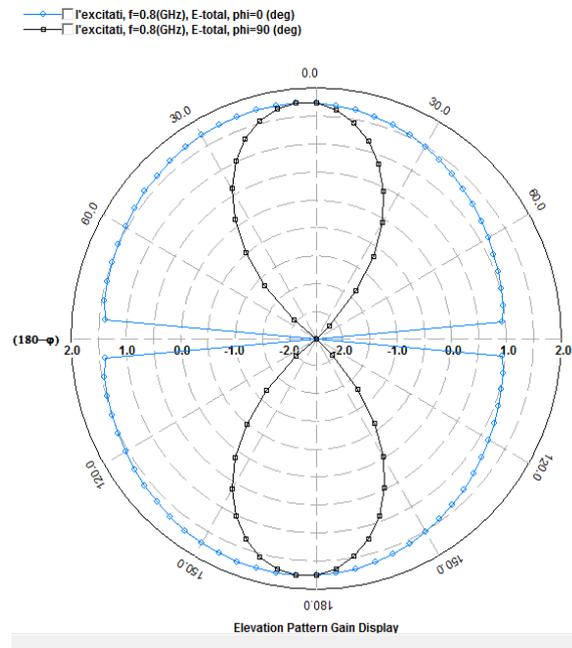


Figure 3.19: Diagramme de rayonnement en 2D de l'antenne monopole compacte

3.2.4 Comparaison des performances

Les performances des trois antennes mono-bande présentées précédemment à savoir l'antenne patch, monopole imprimé et monopole compacte ont été comparées sur le tableau 3.4.

Antenne	Patch	Monopole	monopole compacte
Dimension totale (mm ²)	228x178.86	171x50	120x50
|S ₁₁| (dB)	-17	-16	-17
Bande passante (%)	0.375	11.60	9.04
Type de diagramme	Unilatéral	Quasi-omnidirectionnel	Quasi-omnidirectionnel
Gain (dBi)	5.03	1.98	1.75

Tableau3.4 : Comparaison des performances des trois antennes conçues à 800 MHz

En plus d'être encombrante, l'antenne patch affiche une bande passante très étroite incompatible avec les largeurs des bandes du système LTE.

On constate que l'antenne monopole imprimée compactée à l'aide de méandre est celle qui présente l'encombrement le plus réduit tout en présentant des bonnes performances en termes d'adaptation, bande passante et rayonnement. Pour cette raison, cette antenne compacte sera retenue pour la suite de ce travail.

3.3 Antenne multi-bande pour LTE 800/1800/2600MHz

3.3.1 Conception et simulation

Il s'agit dans cette partie de concevoir une antenne tri-bande travaillant dans les bandes LTE européens : 800MHz ,1800 MHz, 2600MHz.

Notre point de départ était l'antenne monopole imprimée compacte fonctionnant à 800 MHz dimensionnée précédemment. Afin de rendre cette antenne multi-bande, nous lui avons ajouté un élément rayonnant supplémentaire comme indiqué sur la figure 3.20. Les dimensions de l'antenne ont été inchangées et elles sont égales à celles du tableau 3.4. Plusieurs études paramétriques sur cet élément additionnel ont été réalisées. La longueur de l'élément rayonnant additionnel (L_a) a été modifiée de 1 à 15 mm, la valeur optimale trouvée est de 15mm. La largeur de cet élément (W_a) a été variée de 0.5 à 2 mm, la valeur optimale est de 1mm. L'écart entre antenne et élément additionnel (e_a) a été modifié de 0.5 à 2 mm, la valeur optimale trouvée est de 0.5 mm. Les dimensions finales de l'antenne multi bande issues de l'étude paramétrique sont résumées sur le tableau 3.5

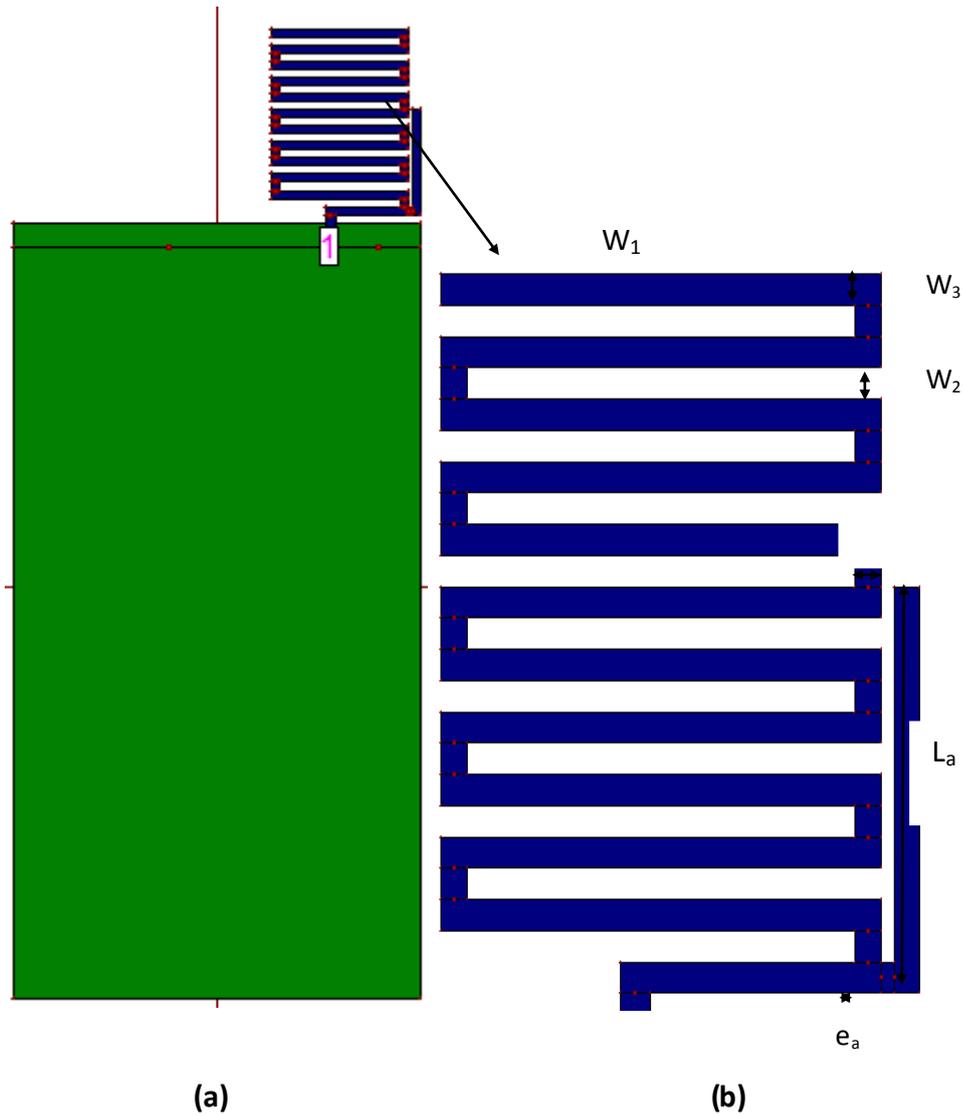


Figure 3.20 : Antenne monopole imprimée avec élément rayonnant additionnel

Paramètres	W	L	W_1	$W_2=W_3$	L_g	L_1	L_a	W_a	e_a
Valeurs (mm)	50	120	17	1	1.13	4	13	1	0.5

Tableau 3.5 : Dimensions de l'antenne monopole compacte tri-bande optimisée

Le coefficient de réflexion obtenu par simulation de l'antenne multi-bande optimisée est présenté sur la figure 3.21. On observe aux trois fréquences LTE 800MHz, 1800 MHz et 2600MHz un coefficient de réflexion ($|S_{11}|$) inférieur à -10 dB. Les bandes passantes des trois bandes sont récapitulées sur le tableau 3.6. On remarque une bande passante très étroite pour la bande 1800 MHz.

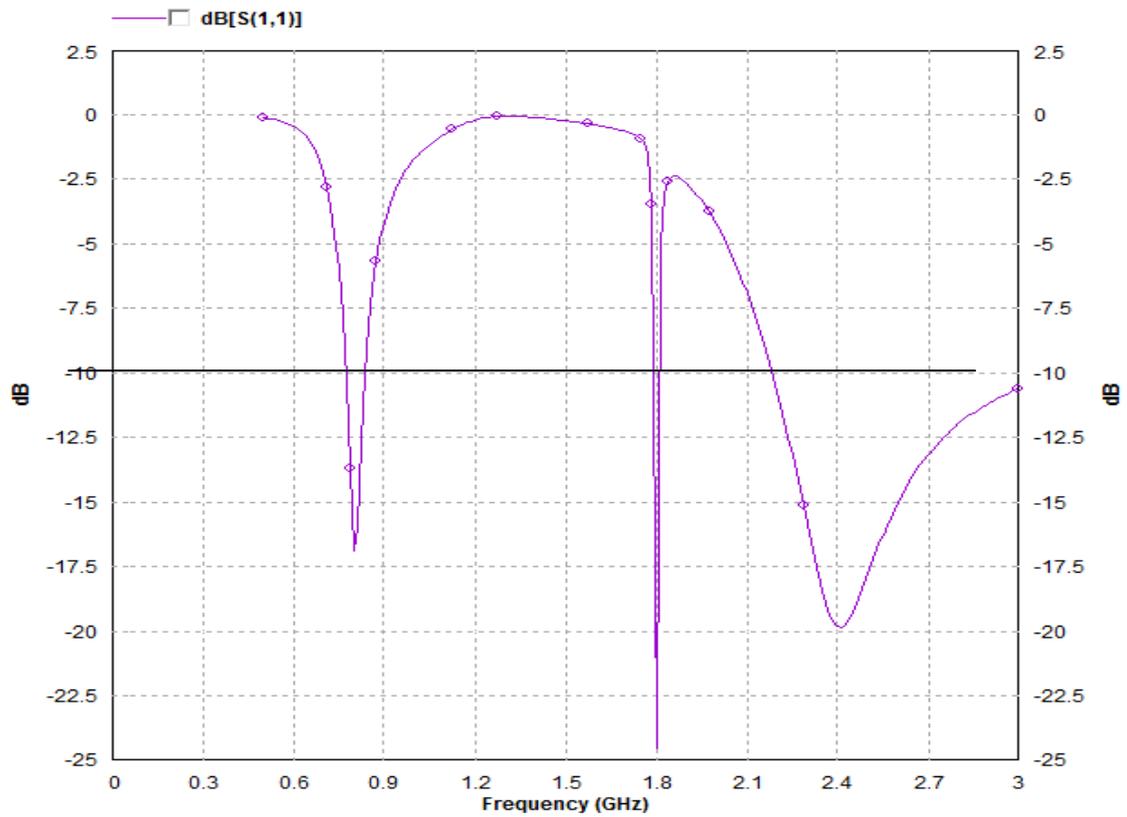
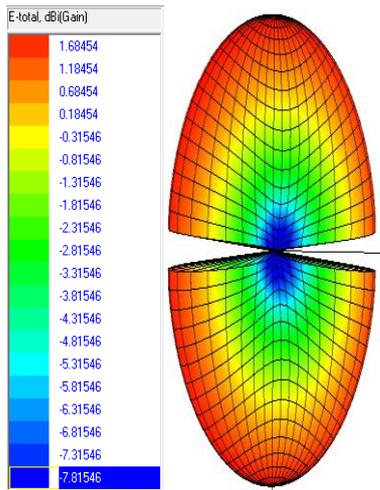


Figure 3.21: Coefficient de réflexion simulé de la structure tri-bande optimisée

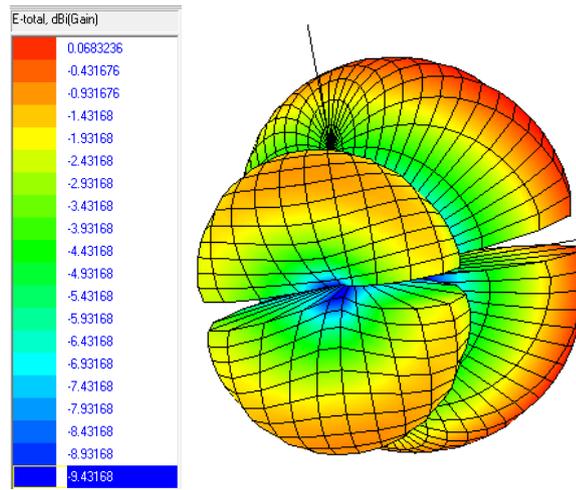
Fréquence (MHz)	800	1800	2600
S_{11} (dB)	-17	-25	-15
Bande passante relative (%)	8.71	1.05	22.69

Tableau3.6 : Performances fréquentielles de l'antenne tri-bande

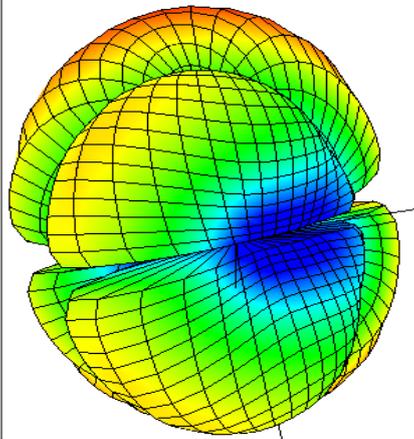
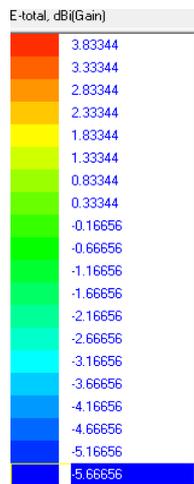
Les figures 3.22 et 3.23 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de l'antenne tri-bande aux fréquences de fonctionnement 800 MHz ,1800 MHz et 2600 MHz respectivement.



f=800 MHz

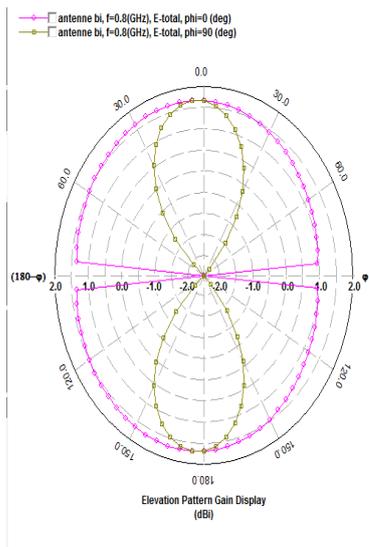


f= 1800 MHz

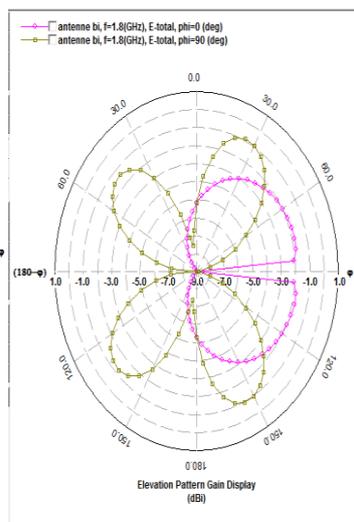


f=2600 MHz

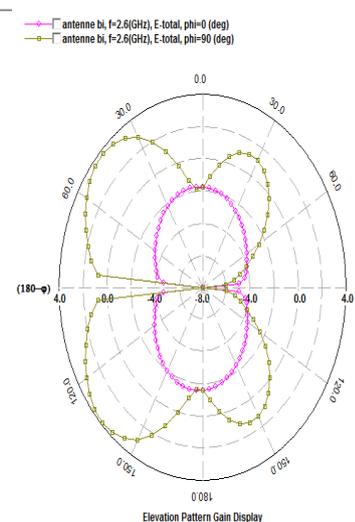
Figure 3.22 : Représentation du diagramme de rayonnement en 3D



f= 800 MHz



f= 1800 MHz



f= 2600 MHz

Figure 3.23 : Représentation du diagramme de rayonnement en 2D

Pour les deux bandes hautes (1800 et 2600), les diagrammes de rayonnement ne sont plus quasi-omnidirectionnels et présentent des lobes secondaires.

3.3.2 Réalisation de l'antenne multi-bande

Afin de confirmer le comportement multi bande de l'antenne décrite précédemment, nous avons décidé de la réaliser. Pour des raisons pratiques d'excitation, nous avons ramené l'excitation de l'antenne vers le bord le plus proche comme indiqué sur la figure 3.23. Ceci ne devrait pas perturber son fonctionnement du moment que la ligne micro-ruban est d'impédance caractéristique égale à 50Ω . Afin de vérifier cette hypothèse nous avons simulé cette nouvelle configuration et son coefficient de réflexion a été comparé avec celui de l'antenne initiale (voir Figure 3.24). De cette simulation, il est à noter que le prolongement de l'excitation vers le bord n'altère pas les deux fréquences basses 800 MHz et 1800 MHz. Cependant, un léger décalage a été enregistré à la fréquence haute 2600 MHz mais cela sans changer la bonne adaptation de l'antenne à cette fréquence.

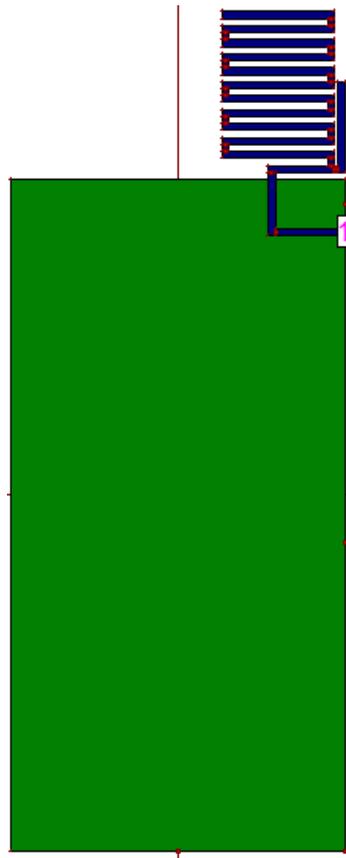


Figure 3.24: Nouvelle configuration facile à exciter de l'antenne multi-bande

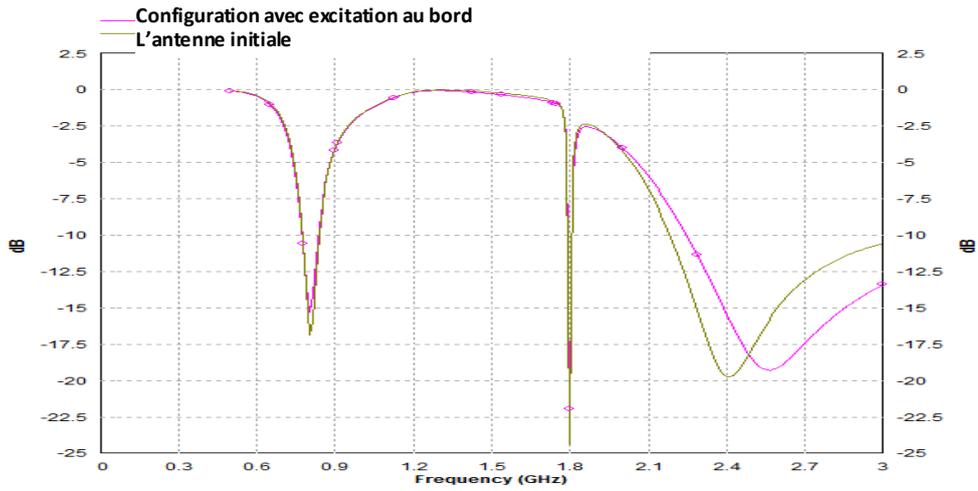


Figure 3.25 : Comparaison du coefficient de réflexion de l'antenne multi-bande initiale avec celle de la figure 3.24

Afin de réaliser maintenant l'antenne de la figure 3.24 sur le substrat de type Ro4003c disponible au laboratoire DIC, nous avons généré les masques (face avant et face arrière) illustrés par la figure 3.26. L'antenne a été réalisée par la société ALMITECH situé à Alger.

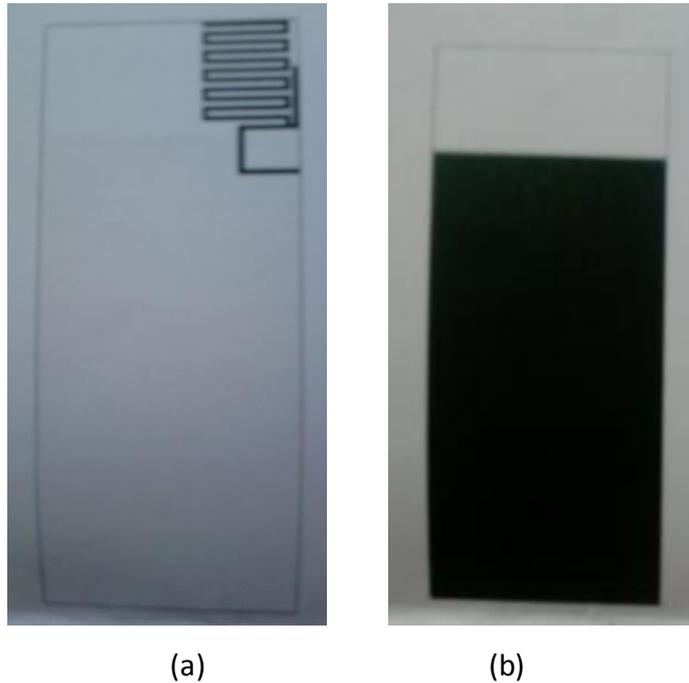


Figure 3.26 : Les masques de l'antenne à réaliser : (a) face avant (b) face arrière

Une fois le circuit imprimé de l'antenne récupéré, nous avons soudé un connecteur de type BNC femelle à l'endroit d'excitation de l'antenne comme illustré par la figure 3.27. Ce connecteur nous sera d'utilité par la suite lors de la mesure de cette antenne.

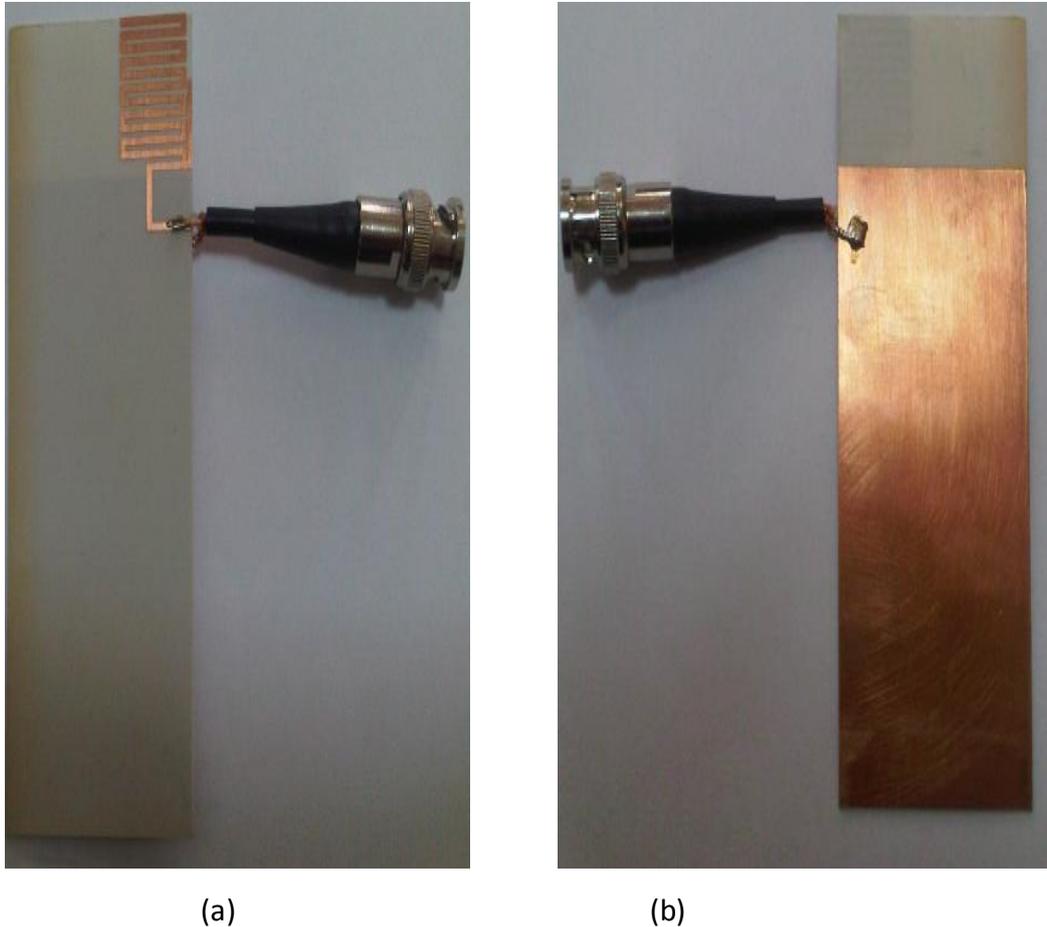


Figure 3.27: Photographie de l'antenne multi-bande compacte réalisée : (a) face avant et (b) face arrière

3.3.3 Validation expérimentale

Les mesures de cette partie ont été réalisées avec l'analyseur de réseau vectoriel ROHDE & SCHWARZ ZVL 3 GHz disponible au laboratoire DIC. L'antenne a été connectée directement au port 1 de cet analyseur comme montré sur la figure 3.28. Faute d'indisponibilité du kit de calibrage de cet analyseur, les mesures ont été effectuées sans calibrage préalable.



Figure 3.28: Photographie montrant la mesure de l'antenne

Après acquisition des données mesurées, le coefficient de réflexion mesuré a été comparé sur la figure 3.29 avec celui obtenu par simulation.

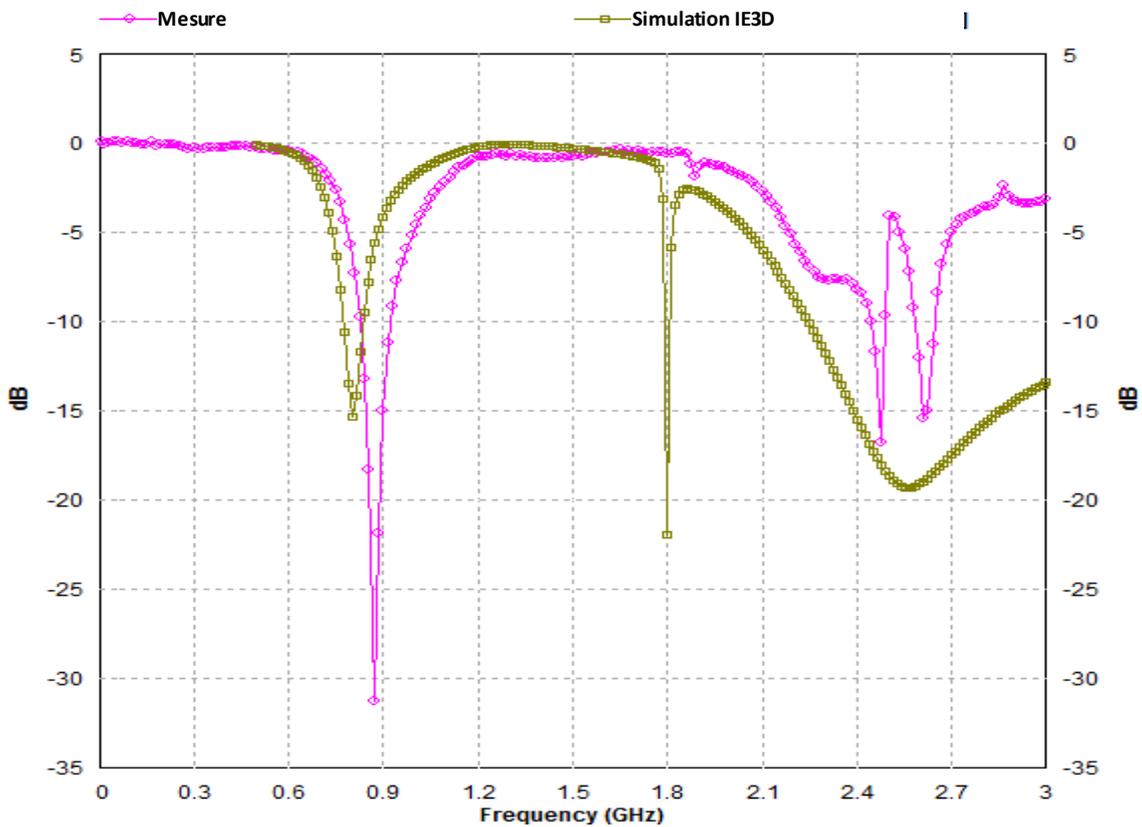


Figure 3.29 : Coefficient de réflexion simulé et mesure de l'antenne multi-bande

Comme déjà trouvé en simulation, la mesure de l'antenne montre un comportement tri-bande de l'antenne. Cependant, l'adaptation mesurée à la bande intermédiaire reste très insuffisante ($|S_{11}| = -2\text{dB}$) par rapport à celle prédite par simulation ($|S_{11}| < -20\text{dB}$). Pour la

bande haute, la bande passante mesurée est bien inférieure à celle donnée par simulation. Toutefois, la bande LTE 2600 est bien couverte avec une bonne adaptation ($|S_{11}| = -15\text{dB}$). Enfin pour la bande basse l'adaptation mesurée est meilleure à celle obtenue par simulation mais avec un décalage fréquentiel de 8.5%.

Ces désaccords entre mesure et simulation peuvent être dus au :

- (a) Qualité de réalisation de l'antenne ainsi qu'à celle du connecteur BNC soudé sur l'antenne.
- (b) L'absence de calibrage de l'analyseur de réseau.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné, réalisé et mesuré une antenne multi bande pour la couverture des bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Avant d'y arriver, nous avons considéré trois types d'antennes imprimées mono-bandes fonctionnant à 800 MHz : une antenne patch, monopole imprimé et enfin une antenne monopole imprimée compacte. Cette dernière a été modifiée avec succès afin de couvrir les trois bandes d'intérêt.

Dans le chapitre suivant, l'antenne tri-bande compacte dimensionnée a été utilisée pour la construction de systèmes antennaires de type MIMO 2x1 et MIMO à quatre antennes.

Chapitre 4 : Conception et simulation d'un système multi-antennaire et multi-bande pour LTE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la problématique d'intégration de deux ou plusieurs antennes dans le même terminal mobile et les techniques permettant d'améliorer l'isolation entre antennes. Tout d'abord, nous nous sommes intéressés à un système construit à base de deux antennes monopoles imprimées multi bandes compactes placées une à coté de l'autre. Deux techniques d'isolation entre ces deux antennes ont été testées. La technique de ligne de neutralisation a été sélectionnée pour es bonnes performances. Enfin une configuration à base de quatre antennes a été également envisagée et simulée.

4.2 Système multi-antennes multi-bande à deux antennes

Le système multi-antennaire multi-bande considéré ici est composé de deux antennes identiques ayant les mêmes dimensions que celles de l'antenne optimisée du chapitre précédant et partageant le même plan de masse (voir figure 4.1). Initialement, les deux antennes sont séparées de $G=13$ mm. Les dimensions du plan de masse sont identiques à celles d'une antenne simple, autrement dit 96×50 mm². Les dimensions des deux antennes sont celles du tableau 3.3. Pour des raisons de symétrie de la structure considérée, seulement deux paramètres S seront affichés : S_{11} pour le coefficient de réflexion et S_{12} pour l'isolation entre antennes. L'isolation est considérée suffisante si $|S_{12}| < -10$ dB.

La figure 4.2 donne le coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{12}|$ de la configuration MIMO de la figure 4.1

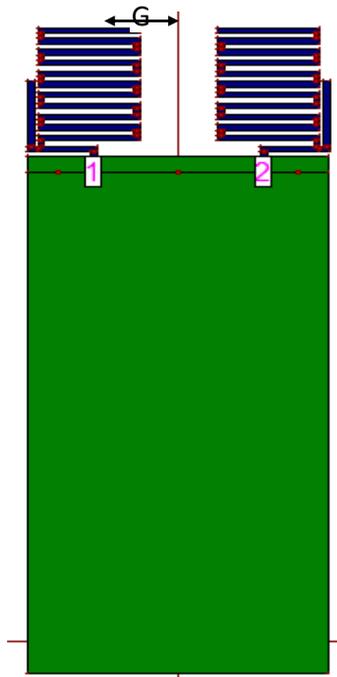


Figure 4.1 : Configuration de l'antenne MIMO2x1 sur IE3D

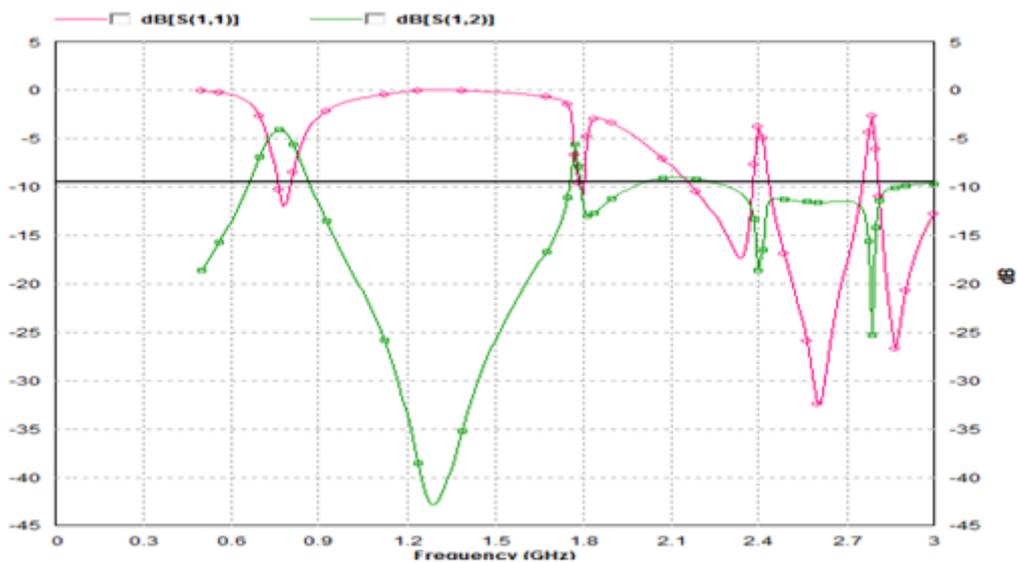


Figure 4.2 : Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{12}|$ du système à deux antennes de la figure 4.1

Il à noter que le comportement tri-bande d'une antenne seule n'a pas été affecté par la mise à proximité d'une autre antenne. Cependant, les performances en isolation entre antennes (correspondantes au $|S_{12}|$) sont insuffisantes et cela pour les trois bandes de fréquences. Donc il devient nécessaire d'améliorer l'isolation entre les antennes afin d'obtenir un

système MIMO avec de bonnes performances. Pour la suite, deux techniques d'amélioration d'isolation seront décrites.

4.2.1 Technique de la ligne de séparation

Il s'agit d'améliorer l'isolation en ajoutant une ligne de séparation entre les deux antennes. Cette ligne est imprimée sur la face supérieure (face sur laquelle est imprimée l'antenne) et elle est connectée au plan de masse à l'aide d'un via (voir Figure 4.3). Plusieurs variantes de cette ligne peuvent être considérées comme le montre la figure 4.3.

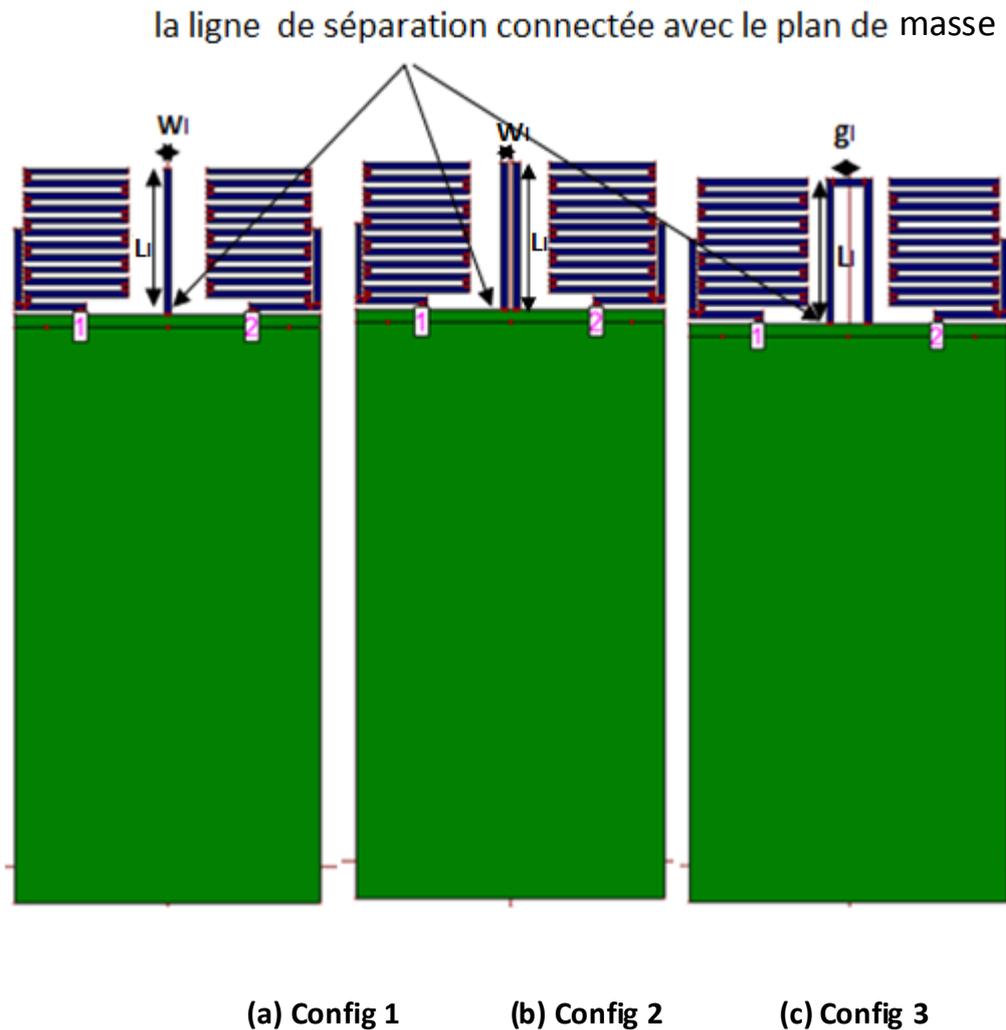


Figure 4.3 : Trois configurations de lignes de séparation pour l'amélioration de l'isolation entre antennes

Les résultants de simulation des trois configurations de la figure 4.3 sont illustrés par la figure 4.4. Ces résultats ont été obtenus pour un écart entre antennes constant de 13 mm et des lignes de séparation avec les dimensions : $W_l=1\text{mm}$, $L_l=24\text{mm}$ et $g_l=3\text{mm}$

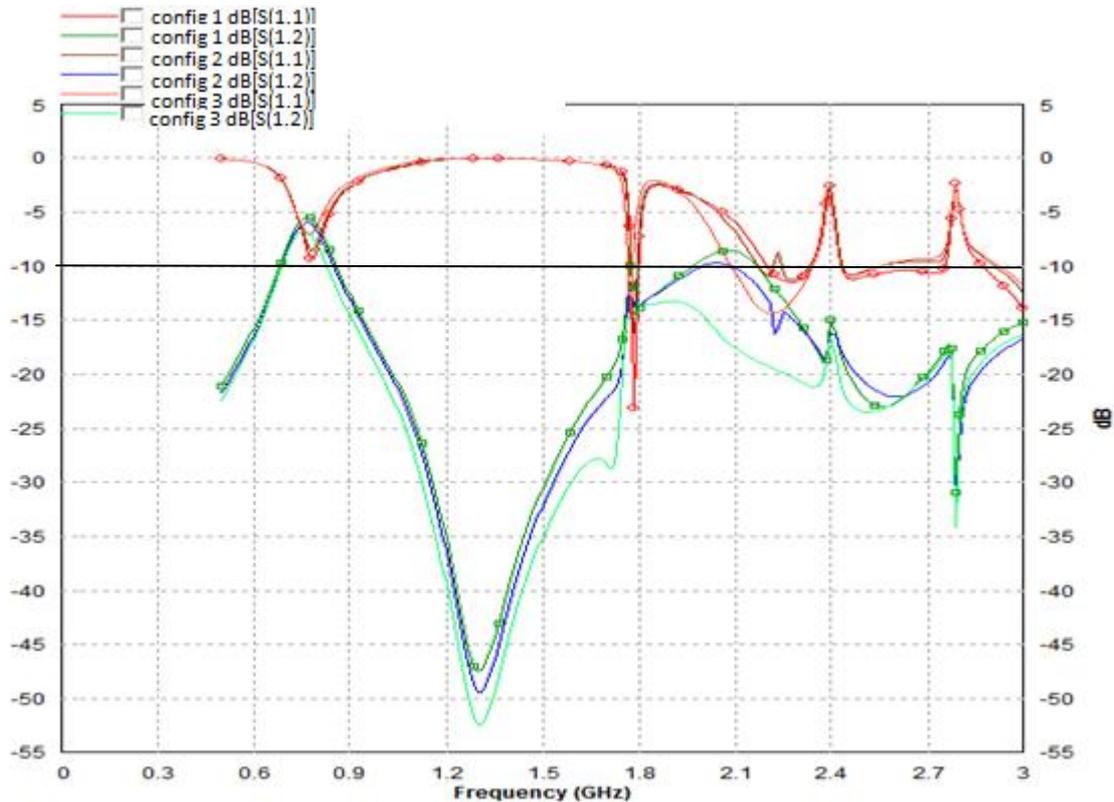


Figure 4.4 : Coefficients de réflexion $|s_{11}|$ et isolations $|s_{12}|$ des trois configurations de la figure 4.3

De la figure 4.4, on constate que la ligne de séparation dans les trois configurations a permis d'améliorer légèrement l'isolation dans les trois bandes. Cependant, l'isolation à la bande basse (la plus critique) reste insuffisante ($|S_{12}|=-7$ dB pour la configuration 3).

D'autres simulations réalisées (non présentées ici) en variant les différentes dimensions de lignes de séparation n'ont pas permis l'obtention d'un $|S_{12}|<-10$ pour les trois bandes de fréquences.

4.2.2 Technique de la ligne de neutralisation

Pour améliorer l'isolation de notre système à deux antennes, une ligne de neutralisation est insérée entre les antennes. Cette ligne est imprimée sur la face supérieure (face sur laquelle est imprimée l'antenne) et elle connecte électriquement les deux antennes (voir Figure 4.5). Plusieurs configuration de ligne de neutralisation peuvent être considérés (voir figure 4.5).

L'écart entre antenne (G) est toujours constant et égal à 13 mm. Les longueurs totales des lignes de neutralisation (L_{tot}) pour les trois configurations de la figure 4.5 sont données respectivement : $L_{tot1} = G$, $L_{tot2} = 2L_r + 2W_n + L_m$, $L_{tot3} = 3L_r + 4W_n + 2L_k$

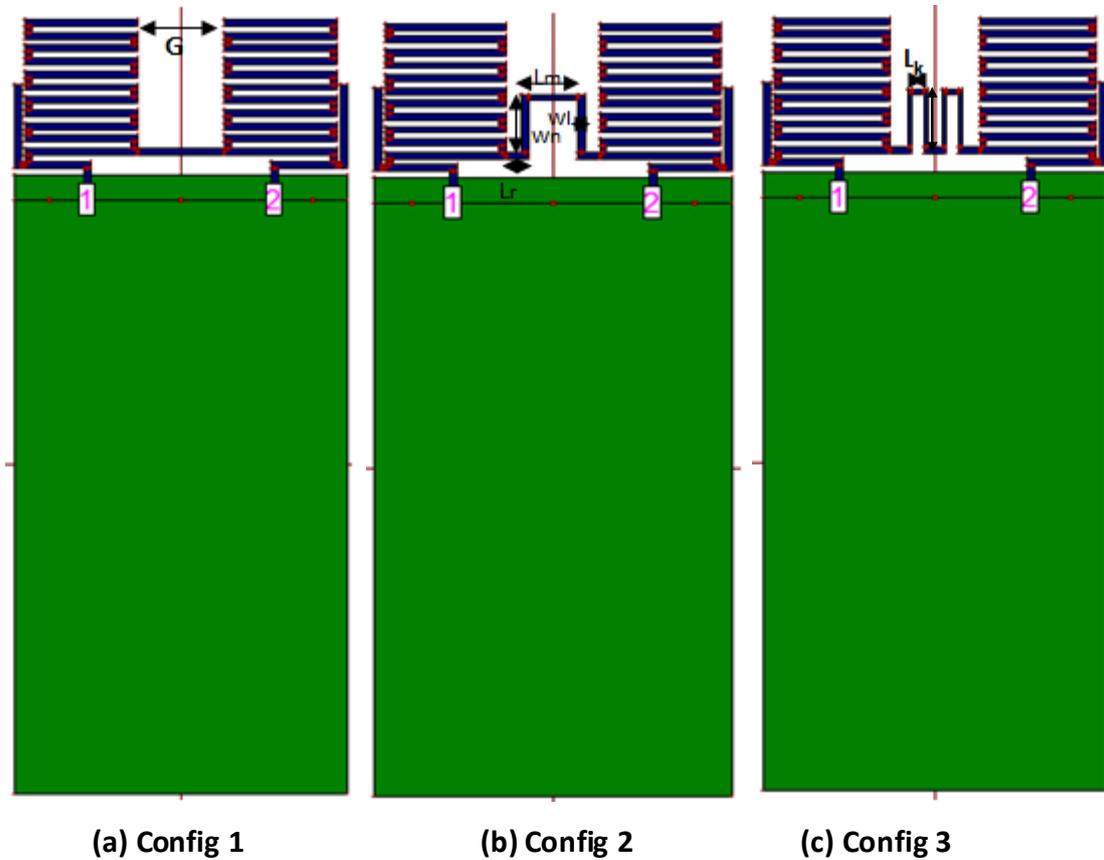


Figure 4.5 : Plusieurs configurations de lignes de neutralisation

Dans la suite les trois configurations seront simulées et leurs performances seront comparées.

4.2.2. a Configuration 1

Cette configuration (Figure 4.5 (a)) a été simulée en prenant $W_1 = 0.5$ mm.

Les résultats de simulation obtenus pour cette configuration sont illustrés par la figure 4.6.

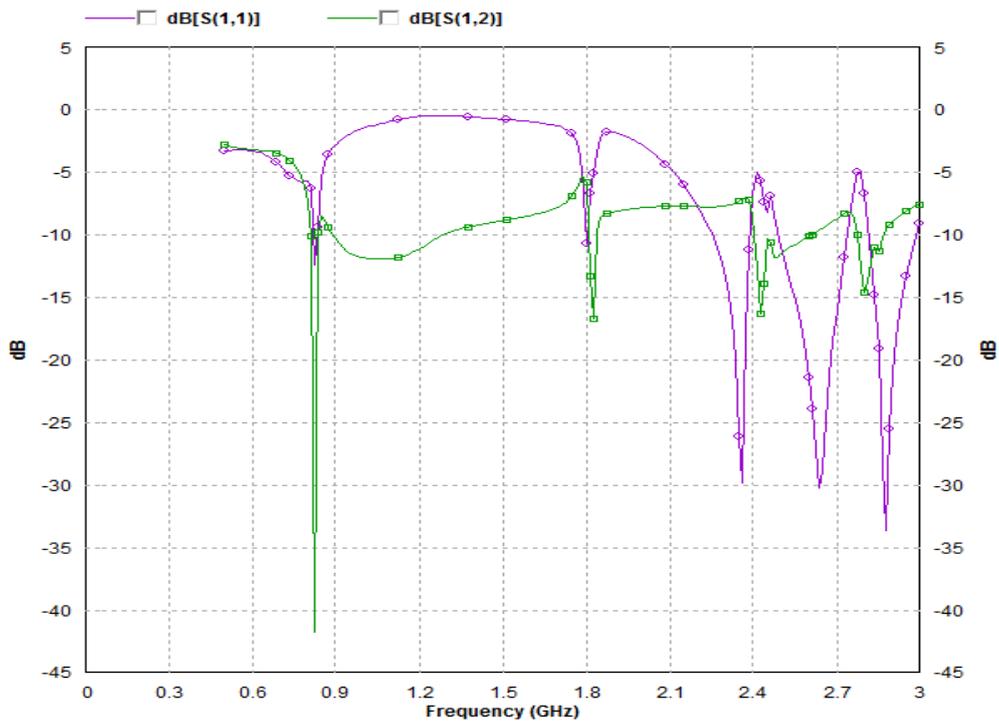
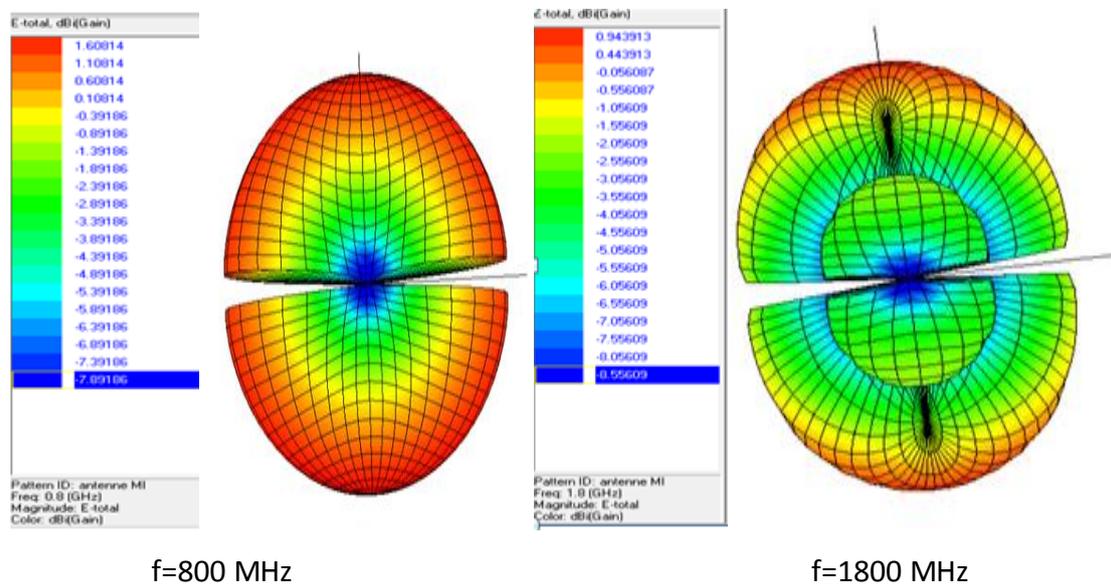
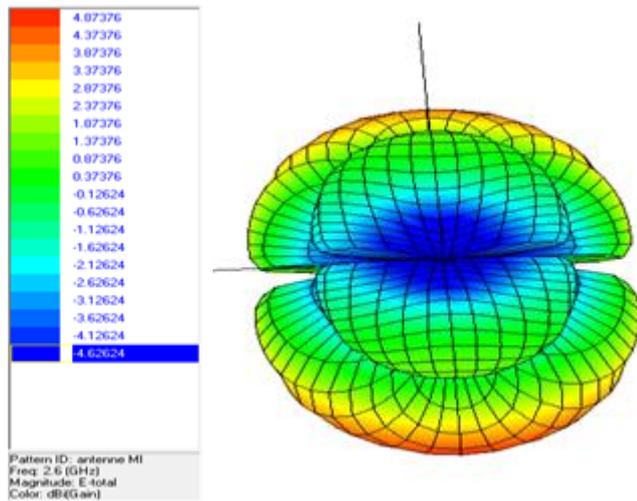


Figure 4.6 : Coefficients de réflexion $|s_{11}|$ et isolation $|s_{12}|$ de la configuration 1 de la figure 4.5

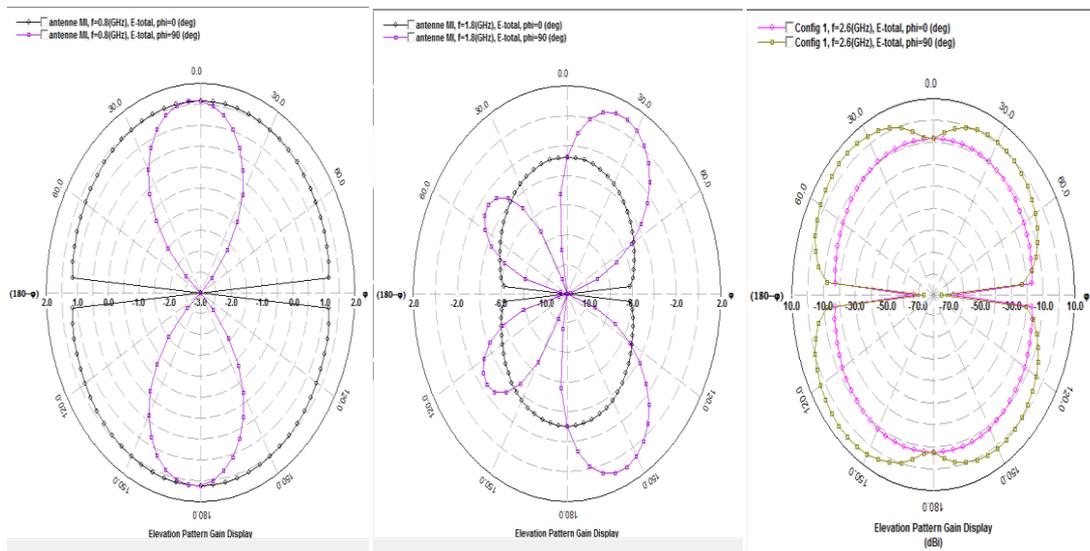
Les figures 4.7 et 4.8 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de la configuration 1 aux fréquences 800, 1800 et 2600 MHz respectivement.





f=2600 MHz

Figure 4.7 : Le diagramme de rayonnement 3D de la Configuration 1



f=800 MHz

f=1800 MHz

f=2600 MHz

Figure 4.8 : Le diagramme de rayonnement 2D de la Configuration 1

4.2.2. b Configuration 2

Après plusieurs études paramétriques sur cette configuration (Figure 4.5 (b)), les dimensions optimales de la ligne de neutralisation pour l'obtention d'une bonne isolation sont : $L_r=3\text{mm}$, $W_n=10\text{mm}$, $L_m=7\text{mm}$ et la largeur $W_l=0.5\text{mm}$.

Le coefficient de réflexion et l'isolation de cette configuration sont présentés dans la figure 4.9.

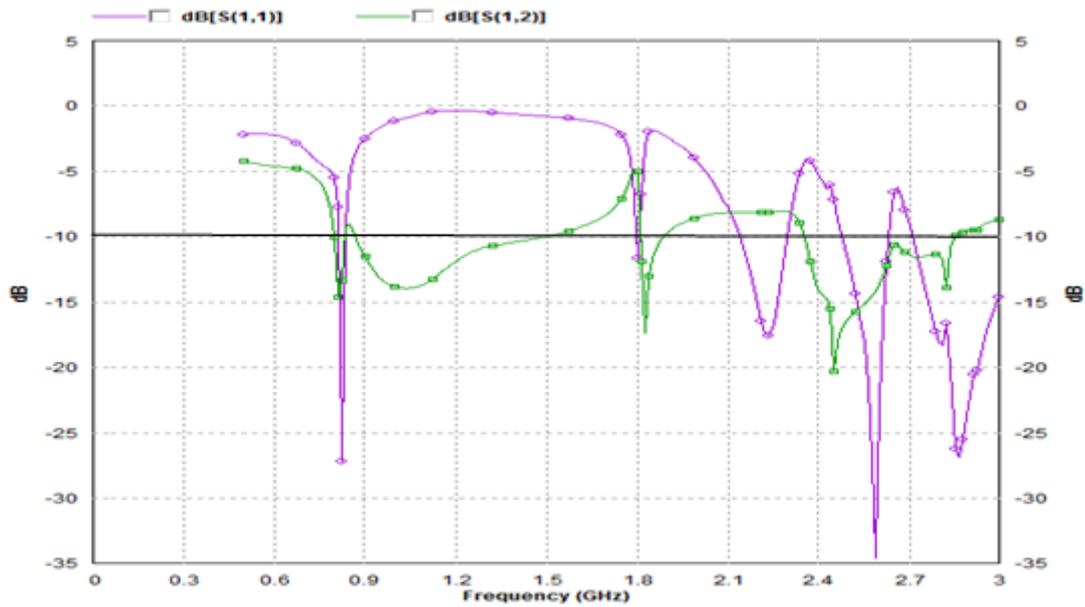
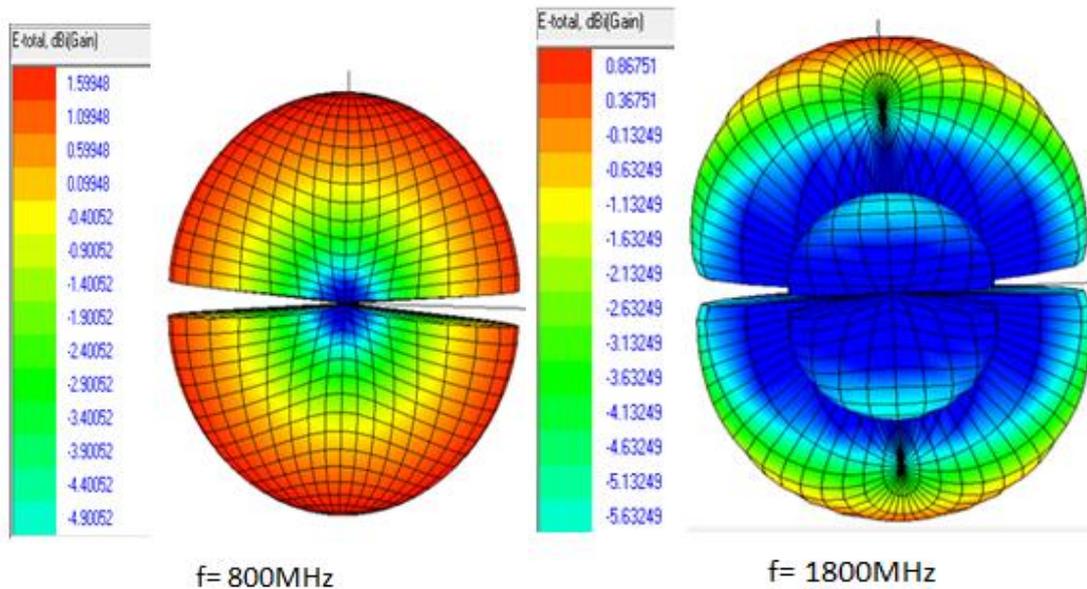


Figure 4.9 : Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolation $|S_{12}|$ de la configuration 2 de la figure 4.5

Les figures 4.10 et 4.11 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de la configuration 2 aux fréquences 800, 1800 et 2600 MHz respectivement.



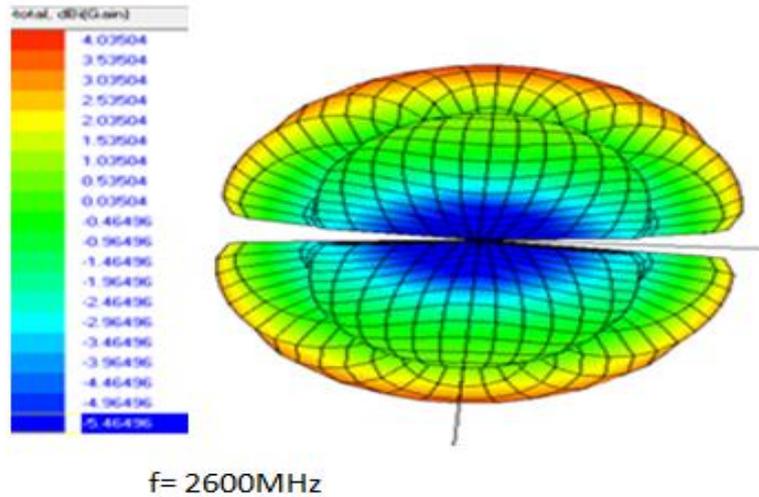


Figure 4.10 : Le diagramme de rayonnement 3D de la configuration2

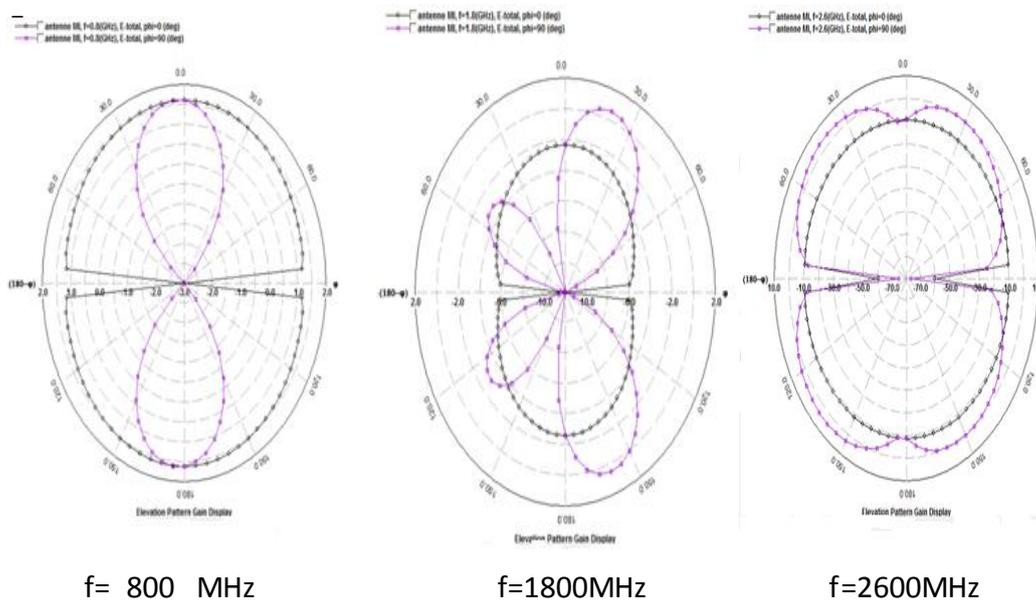


Figure 4.11 : Le diagramme de rayonnement 2D de la configurationb2

4.2.2.c Configuration 3

Après plusieurs études paramétriques sur cette configuration (Figure 4.5 (c)), les dimensions optimales de la ligne de neutralisation pour l'obtention d'une bonne isolation sont : $L_r=3$ mm, $W_n=10\text{mm}$, $L_k=2.5\text{mm}$ et la largeur $W_l=0.5\text{mm}$.

Le coefficient de réflexion et l'isolation de cette configuration sont présentés dans la figure 4.12.

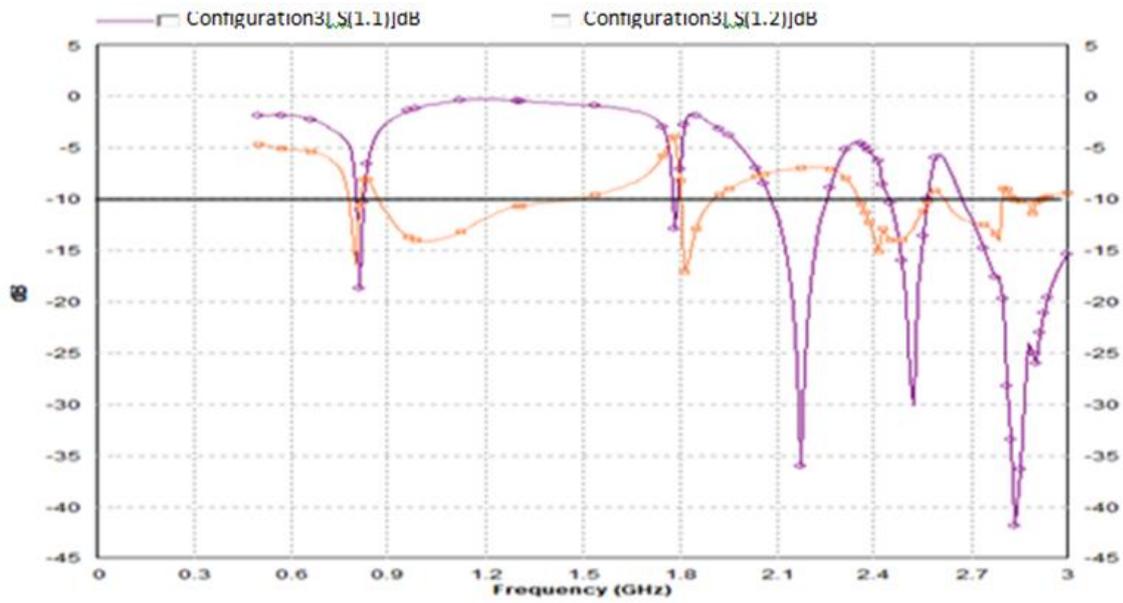
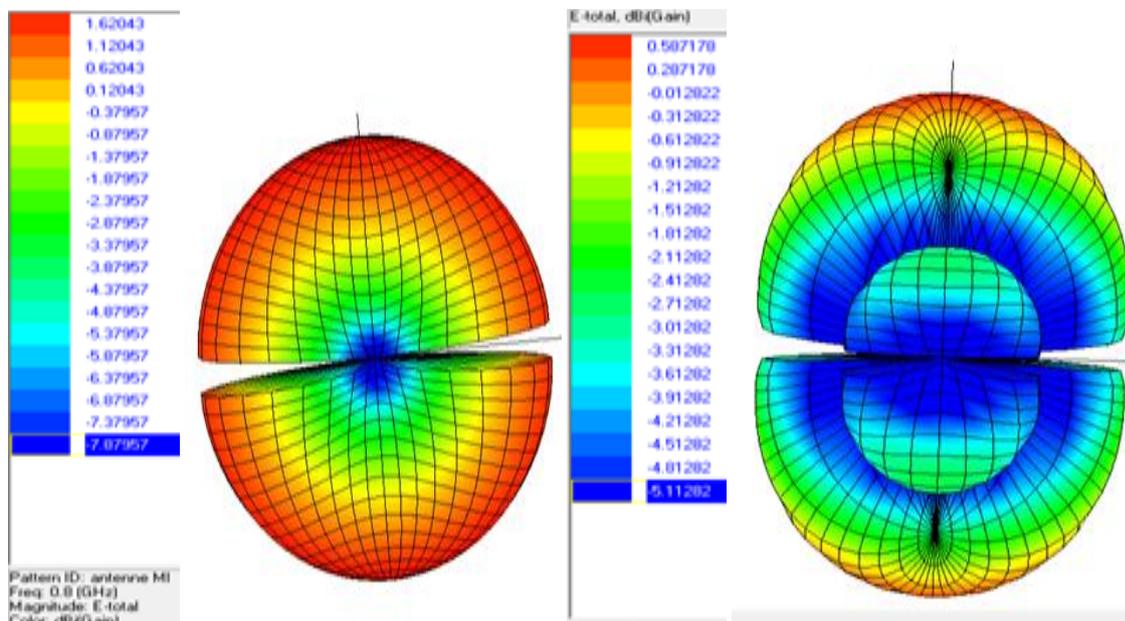


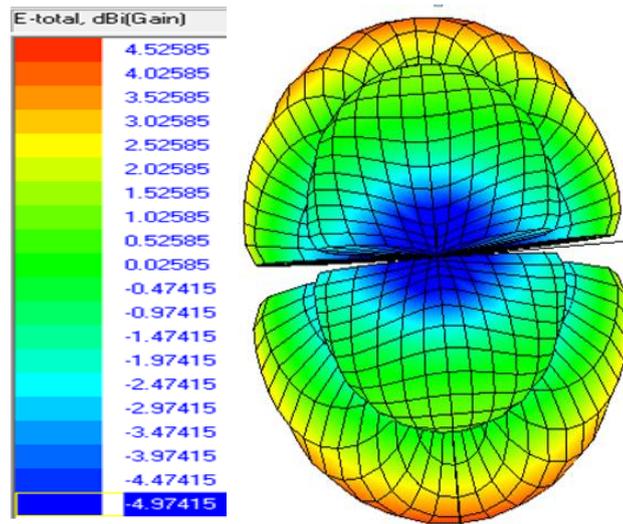
Figure 4.12: Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ et isolations $|S_{12}|$ de configuration3 de la figure 4.10

Les figures 4.13 et 4.14 présentent les diagrammes de rayonnement en 3D et 2D de la configuration 3 optimale aux fréquences 800, 1800 et 2600 MHz



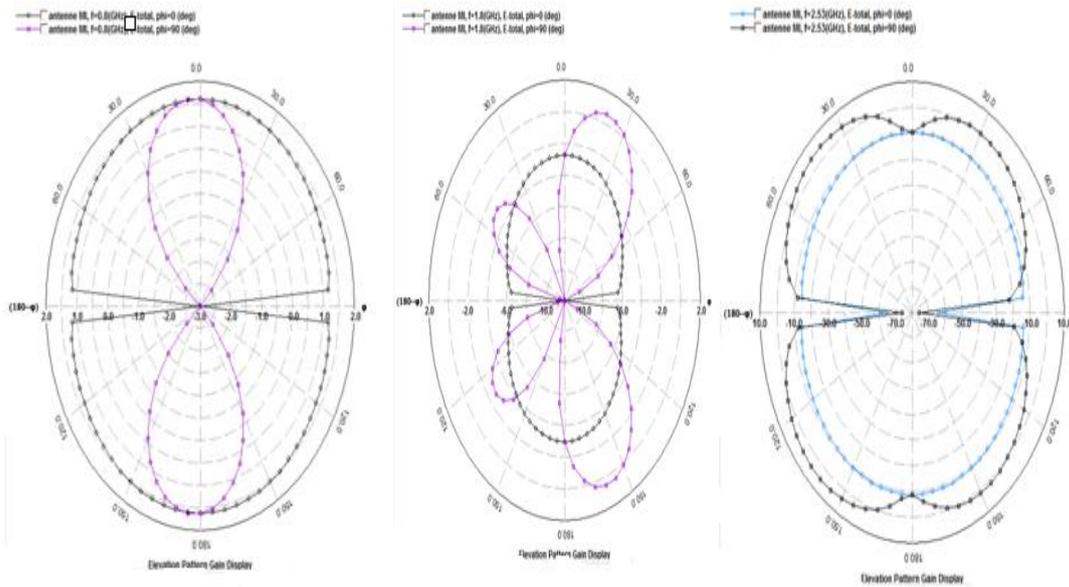
f=800 MHz

f=1800 MHz



f=2600 MHz

Figure 4.13: le diagramme de rayonnement 3D de la configuration 3



f= 800 MHz

f= 1800 MHz

f= 2600 MHz

Figure 4.14 : le diagramme de rayonnement 3D de la configuration3

4.2.2.d Comparaison des performances des trois configurations

Les performances des trois configurations présentées précédemment sont comparées sur les figures 4.15 et 4.16.

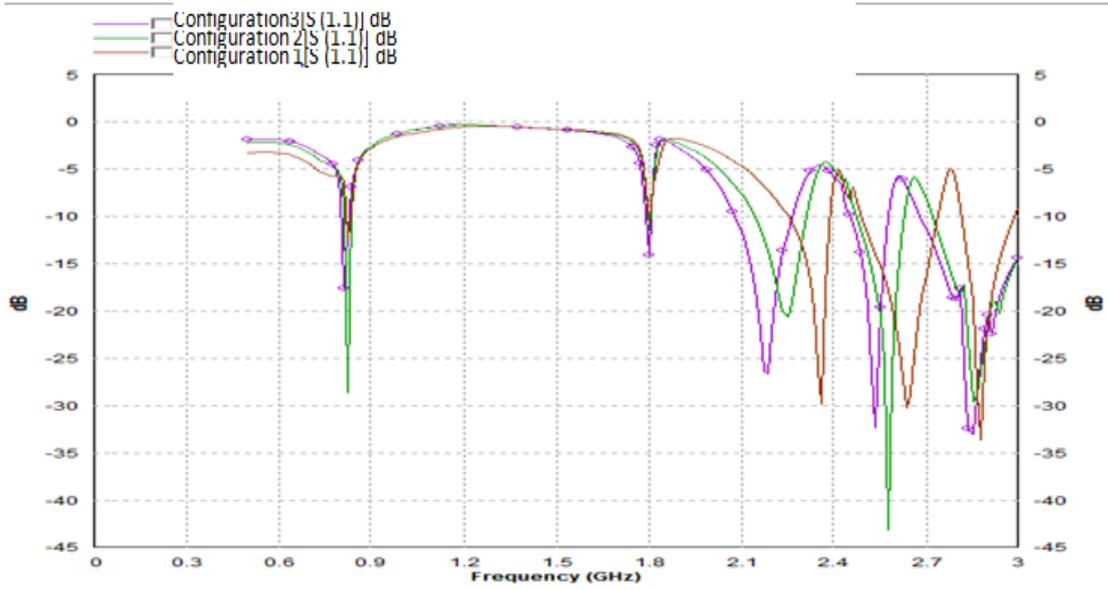


Figure 4.15: Comparaison des Coefficients de réflexion $|S_{11}|$ des trois configurations de la figure 4.5

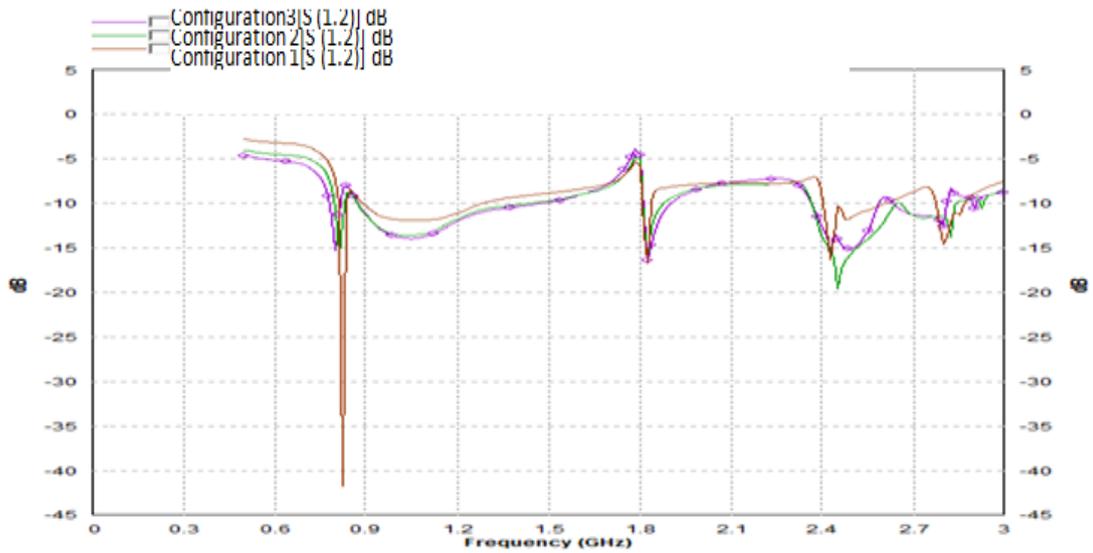


Figure 4.16 : Comparaison des isolations $|S_{12}|$ des trois configurations de la figure 4.5

D'après ces résultats, la configuration 2 est celle qui présente le meilleur compromis entre adaptation et isolation et cela dans les trois bandes d'intérêt.

Les performances finales de cette configuration sont résumées sur le tableau 4.1.

Fréquence [MHz]	800		1800		2600	
Les coefficients [dB]	S_{11}	S_{12}	S_{11}	S_{12}	S_{11}	S_{12}
Les config						
Config2	-29	-15	-13	-15	-43	-15

Tableau 4.1 : Performances fréquentielles de la configuration2

Pour la suite, un système antenne à base de 4 antennes sera construit en utilisant la configuration optimale de cette partie.

4.3 Système MIMO à quatre antennes

Le système MIMO à 4 antennes est basé sur l'utilisation de deux systèmes MIMO 2x1 de la configuration 2 (ligne de neutralisation) comme illustré par la figure 4.20. Afin de le système soit compatible avec la taille de Smartphone fixé (120x 50 mm²), le plan de masse a par conséquent été réduit (72 x 50 mm²).

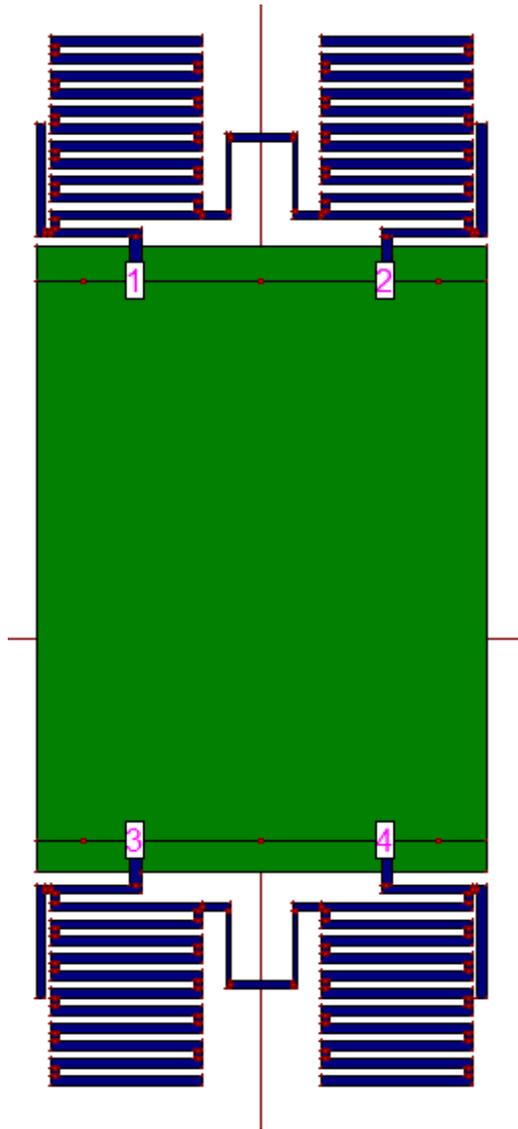


Figure 4.17 : Système MIMO à quatre antennes

Les résultats obtenus pour les coefficients S_{11} , S_{22} , S_{33} et S_{44} sont illustrés dans la Figure 4.18.

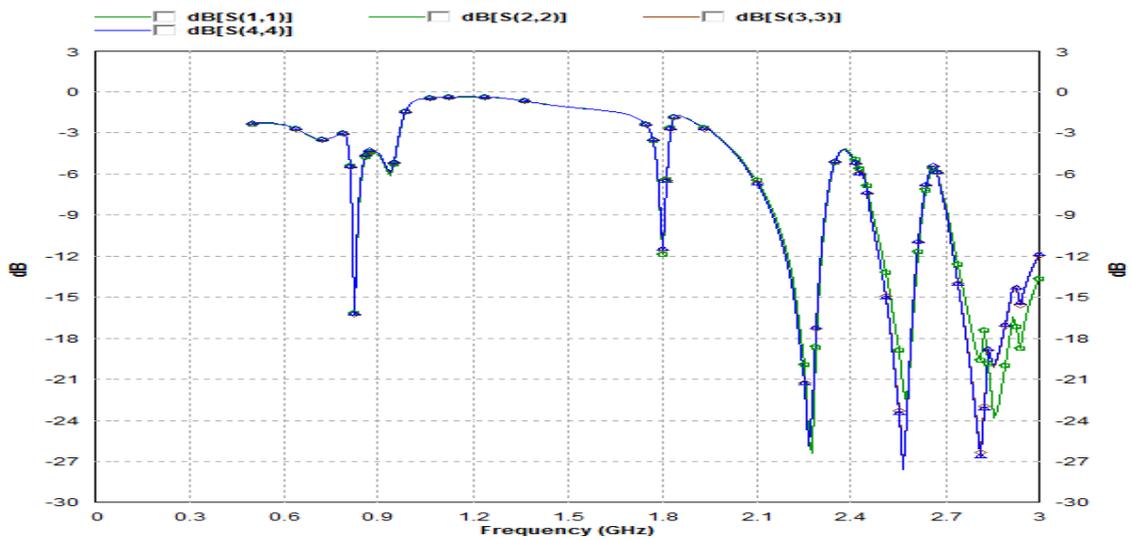


Figure 4.18 : Comportement du S_{11} , S_{22} , S_{33} et S_{44}

Les résultats obtenus pour les coefficients S_{12} , S_{13} et S_{14} sont illustrés dans la Figure 4.19.

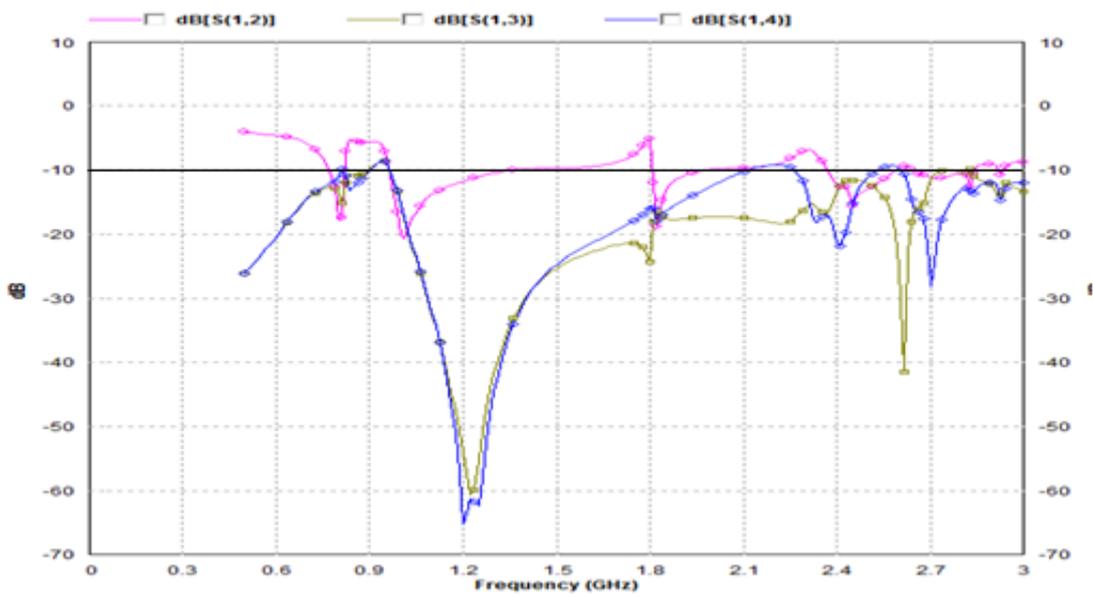


Figure 4.19 : comportement du S_{12} , S_{13} et S_{14}

Les performances du système à quatre antennes aux trois fréquences LTE sont résumées dans le tableau 4.2

Fréquence[MHz]	800				1800				2600			
coefficients de réflexions [dB]	S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{44}	S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{44}	S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{44}
	-16				-12				-27			
isolation [dB]	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	S_{12}	S_{13}	S_{14}
	-17	-15	-14	-19	-25	-15	-10	-41	-10			

Tableau 4.2: Performances fréquentielles de l'antenne MIMO à quatre antennes

Il est à noter que les performances globales (adaptation et isolation) obtenues par simulation du système MIMO à quatre antennes sont très satisfaisantes.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné et simulé un système multi-antennaire multi-bande fonctionnant dans les bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Afin d'avoir des bonnes performances en termes d'isolation deux techniques ont été investiguées : ligne de séparation et ligne de neutralisation. Cette dernière a été sélectionnée pour ses bonnes performances et deux systèmes multi-antennaires à base de cette ligne ont été conçus : une configuration 2x1 et configuration à quatre antennes.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'études ont portés sur la conception et simulation d'un système antenne MIMO multi bande pour LTE.

La première partie, décrit brièvement quelques généralités sur les antennes en donnant leurs caractéristiques principales. Ensuite, le principe de la technique MIMO ainsi que son architecture ont été présentés.

Dans le second chapitre, a permis de décrire le principe de la norme LTE, leur bande de fréquence ainsi que l'architecture de cette norme.

Le troisième chapitre présente la conception et simulation de l'antenne tri-bande compacte couvrant les bandes LTE 800/1800/2600 MHz. Dans un premier temps, une antenne mono-bande compacte fonctionnant dans la bande LTE 800 MHz a été dimensionnée. La taille compacte de cette antenne a été obtenue en utilisant des profils irréguliers de type méandre. La taille de cette antenne ne dépassant pas les 120x50 mm² (dimension standard des Smartphone). En modifiant l'antenne mono-bande, une solution tri-bande compacte couvrant la bande LTE 800/1800/2600 MHz a été conçue, réalisée et mesurée.

Enfin, dans le quatrième chapitre, deux systèmes antennaires MIMO 2x1 et MIMO à quatre antennes à base de cette antenne multi-bande ont été conçus et simulés.

A.1 Présentation d'IE3D de Zeland

IE3D de Zelande est un outil électromagnétique complet pour la simulation, l'optimisation et la conception en 3D des antennes et des circuits numériques. L'IE3D a été adopté comme une norme industrielle dans la simulation électromagnétique. Depuis son introduction officielle en 1993 à IEEE International Micro-wave Symposium (IMS IEEE 1993), des améliorations ont été apporté au logiciel IE3D [27].

L'IE3D est devenu l'outil de simulation électromagnétique le plus polyvalent. Il est facile à utiliser, efficace et précis. Il est largement utilisé pour la conception de circuits hyperfréquences/millimétriques, interconnexion et packaging de circuits intégrés CI, antennes planaires, antennes filaires et autres antennes radiofréquence sans fils [28,2]. La Figure A .1 montre l'interface principale du logiciel IE3D

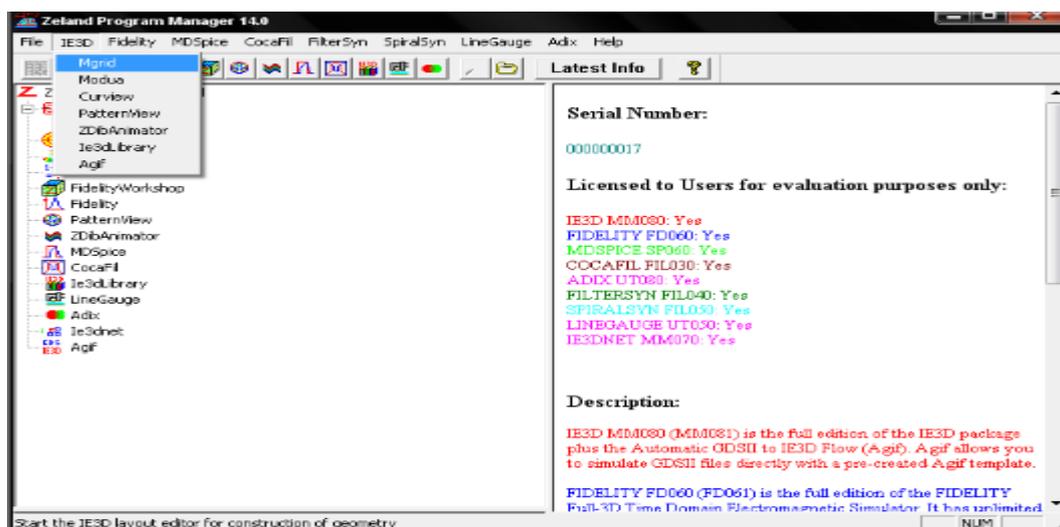


Figure A.1 : Interface principale de l'IE3D

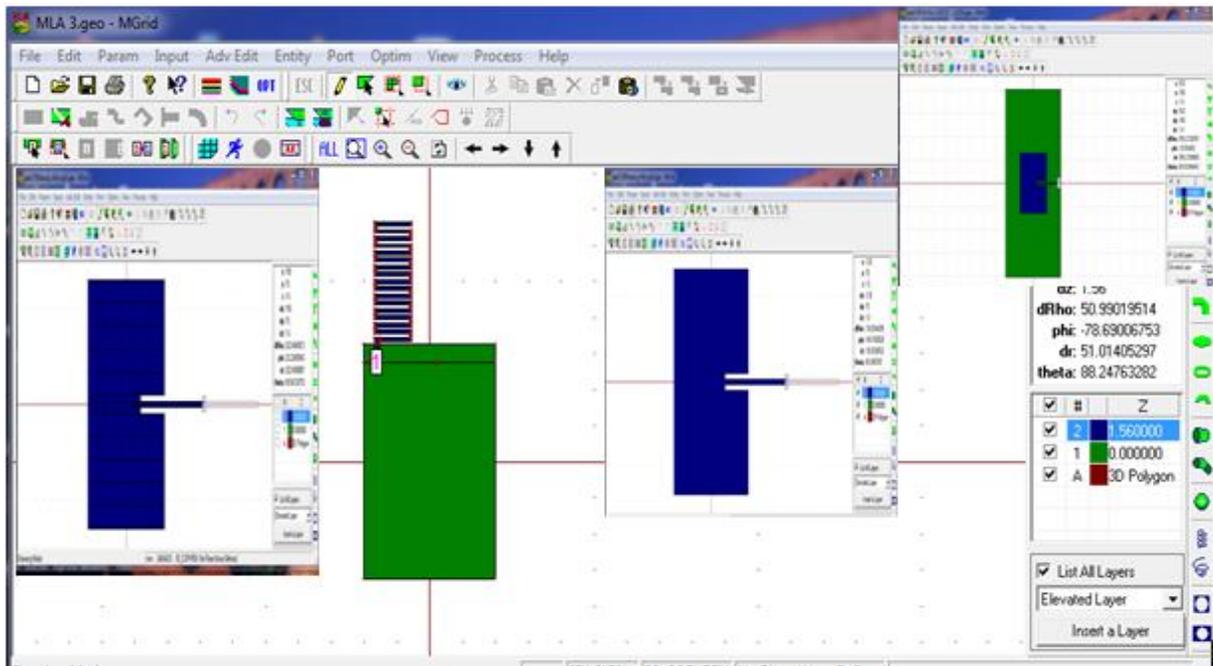


Figure A.2: Différentes fenêtres d'IE3D

A.2 Résultats de simulation

Une fois la simulation terminée, de nombreuses sorties de résultats sont autorisées.

Nous avons simulé une structure d'un patch avec IE3D. Les différents graphes que nous pouvons visualiser telle que l'abaque de Smith, le VSWR (dB) et d'autres paramètres sont représentés dans ce qui suit :

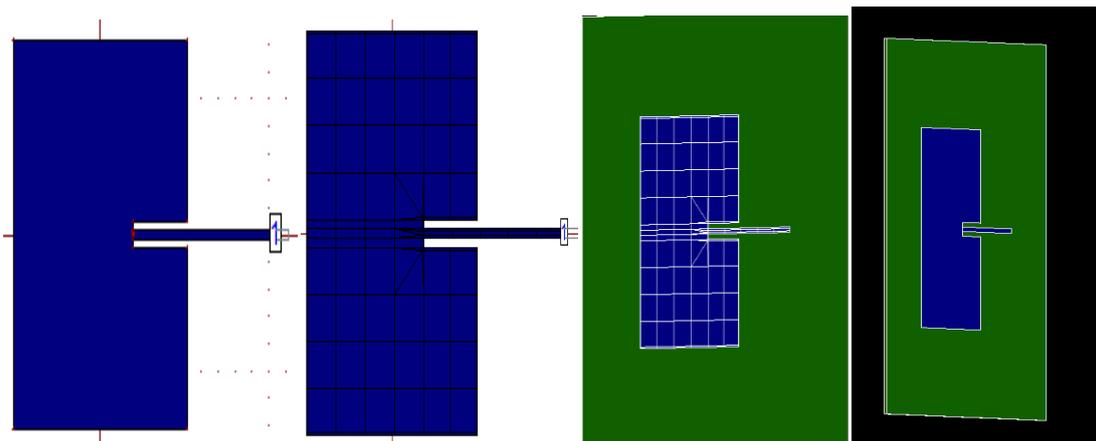


Figure A.3: Différents états d'une structure en 2D et 3D

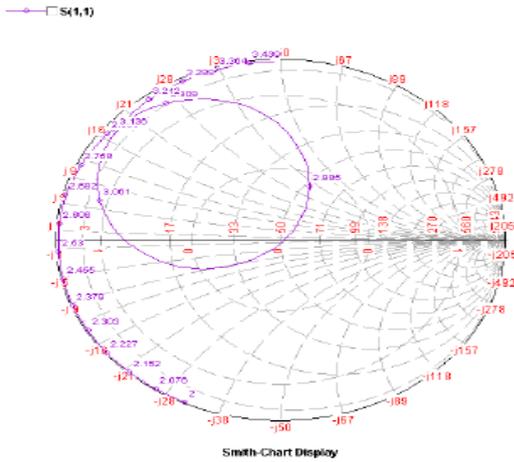


Figure A.4: Abaque de Smith

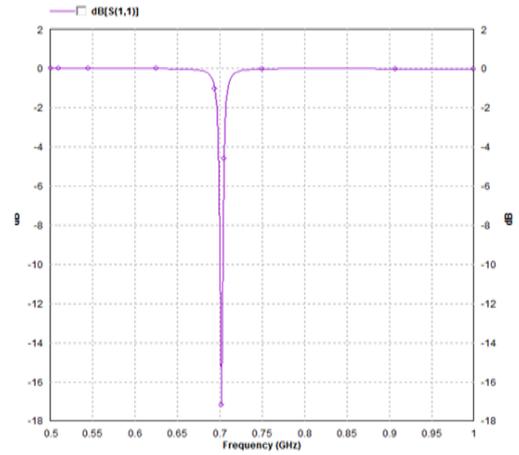
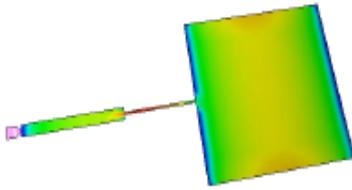


Figure A.5: coefficient de réflexion S11 en dB

A.3 Visualisation de la distribution de courant et le diagramme de rayonnement

On peut aussi visualiser la distribution de courant des structures après simulation ainsi que le diagramme de rayonnement en 2D et en 3D.



la distribution de courant

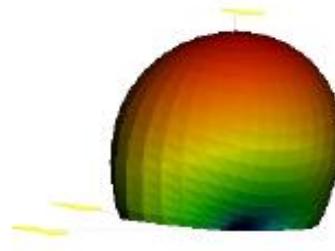


Figure A.8: le diagramme de rayonnement 3D

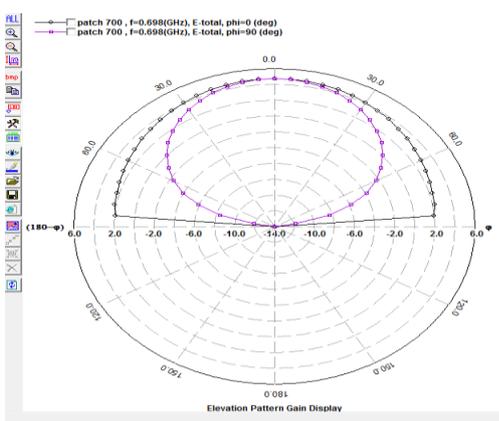


Figure A.9 : le diagramme de rayonnement 2D

(Planaire)

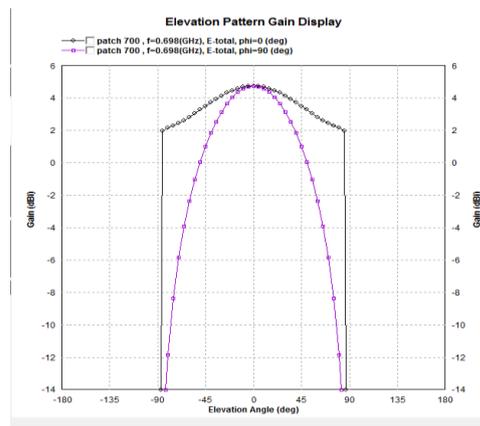


Figure A.10 : le diagramme de rayonnement 2D

(Cartésienne)

Bibliographie

- [1] Ameziane Djamel : « *Etude et Optimisation d'Antennes Fractales Plaquées* », Mémoire de Magister de Télécommunications, 2008-2009
- [2] « Antennes », Alexandre Boyer, support de cours, disponible sur : www.alexandre-boyer.fr
- [3] Bitchikh Mounira , « les antennes ultra large bande dans le domaine des communications mobile », thèse de doctorat en électronique, mars 2014.
- [4] Dhaou Bouchouich, « Etude de faisabilité de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante », Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'université François – Rabelais, 22 novembre 2010
- [5] Aliou Diallo : « Système Multi-Antennes pour diversité et MIMO », Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences spécialité Electronique de l'université de Nice-Sophia Antipolis, 28 Novembre 2007
- [6] Ferouani Souhila : « Etude et Implémentation d'un Système MIMO dans un Contexte OFDM », Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister, 2010
- [7] E. Jammazi « Dimensionnement et Planification d'un réseau 4G LTE pour Tunisie Télécom », L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès ,2013
- [8] T. Nguyen : « Evolution de la couche RRC de la plateforme Open Air vers les nouvelles normes LTE », Mémoire de PFE, Septembre 2010
- [9] M. Daoud : « Dimensionnement et planification d'un réseau Advanced – LTE », Mémoire de PFE, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, 2012-2013
- [10] Ibra Dioum: « Conception de systèmes multi-antennaires pour techniques de diversité et MIMO - Application aux petits objets nomades communicants », Thèse pour obtenir le titre de Docteur en Sciences, l'Université de Nice-Sophia Antipolis (France) ,2013
- [11] http://4.bp.blogspot.com/-aGSnzeLy8c4/Uib_409x-2I/LTE.gif

- [12] Attalah Mohamed Amine : «Performance de l'interface Radio des réseaux LTE », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master Académique ,2013
- [13] http://www.Arcep.fr/uploads/tx_gsavis/11-119.pdf
- [14] <http://www.reseau4g.info/4g-lte/les-frequences>
- [15] Ibra Dioum, Aliou Diallo, Cyril Luxey, Sidi Mohamed Farsi :« Compact Dual-Band Monopole Antenna for LTE Mobile Phones», 2010 Loughborough Antennas & Propagation Conference, 8-9 November 2010, Loughborough, UK
- [16] Mohammad S. Sharawi, Sheikh S. Iqbal, and Yanal S. Faouri: « An 800 MHz 2 1 Compact MIMO Antenna System for LTE Handsets », IEEE transactions on antennas and propagation, vol.59, No. 8, august 2011
- [17] Gyubok Par, Minchan Kim, Taesik Yang, Joo Byun, and Austin S. Kim : « The Compact Quad-band Mobile Handset Antenna for the LTE700 MIMO Application », IEEE Antennas and propagation Society International Symposium, 2009.APSURSI409
- [18] sang-jin Eom, joong-hee lee, Austin kim, seong-ook park :«Broadband internal antenna for 700MHz LTE application with distributed feeder», Asia pacific Microwave Conference ,APMC 2009.
- [19] Lila Mouffok, Anne Claire Lepage, Julien Sarrazin, Xavier Begaud: «Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications», Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2012
- [20] Risto Valkonen, Mikko Kaltiokallio, Clemens Icheln: « Capacitive coupling element antennas for multi-standard mobile handsets», IEEE transactions on antennas and propagation, vol.61, no.5, 2013
- [21] Yonghun Cheon, Jungyub Lee, and Joonghee Lee: « Quad-Band Monopole Antenna Including LTE 700 MHz with Magneto-Dielectric Material », IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 11, 2012
- [22] Lila Mouffok, Anne Claire lepage, Julien sarrazin, and Xavier Begaud, :« Compact Dual-Band Dual-polarized Antenna for MIMO LTE Application », International journal of Antenna and propagation Volume 2012,Hindawi publishing Corporation.
- [23] Rashid Ahmad Bhatti, Soongyu Yi, and Seong-Ook: « Compact Antenna Array with Port Decoupling for LTE-Standardized Mobile Phones», IEEE Antennas And wireless propagation Letters, vol. 8, 2009

- [24] Jui-Han Lu, Senior Member: « Planar Compact LTE/WWAN Monopole Antenna for Tablet Computer Application », IEEE Antennas and wireless propagation letters, vol.12
- [25] kebbab Radhwane : «Conception d'antennes ultra large bande en technologie imprimée», Thèse de magister de télécommunication, en 2010
- [26] « Antenna theory analysis and design», C.A.Balanis, 2nd edition John Wiley and Sons, 1997
- [27] M. IE3d, Manuel IE3d version 14, Zeland software
- [28] [www.ctsystemes .com](http://www.ctsystemes.com)
- [29] [www. Zeland .com](http://www.Zeland.com)

