

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 سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BOUHACENE FAIZA

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

Thème

Conception et Simulation d'une Antenne Compacte pour LTE 700

Proposé par : Dr. SAMI HEBIB

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements

Je tiens à remercier tous d'abord DIEU le tous puissant qui nous a donnés durant toutes ces années la santé, le courage et la fois en nous même pour arriver à ce jour.

J'exprime mon sincère remerciement à l'égard de Dr SAMI HEBIB pour son aide et ses encouragements précieux, durant les travaux de recherche pour la mise en œuvre de ce modeste travail.

Je remercie enfin tous ceux qui de près ou loin ont contribué de manière significative à l'élaboration de ce mémoire

Dédicace

Je dédie ce travail

A celle qui a attendu patience les fruits de sa bonne éducation, ma mère

A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grandes femmes, mon père

En qui je trouve un soutien immense et constant dans mes études et ma vie, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde affection, j'espère que dieu vous protège.

A mes très chères sœurs : Nassima ,Mriem et abir

A mes chers frères : Youcef, Omar et Mohamed

A celui qui sera un jour prochain ma seconde moitié toufik , j'espère que mon mémoire sera beau cadeau de rencontre

A mes : tantes, oncles, cousins, cousines et toutes la famille

A tous mes amis et les étudiants de ma promotion

2012/2013

Et a tous ceux qui m'aiment

ملخص:

مع تزايد انتشار الجيل الجديد من الهواتف LTE والحاجة إلى أجهزة نقالة ذات الحجم الصغير والتي تعرف إزدياد ملحوظ في الآونة الأخيرة. وفي هذا السياق، فإن الهدف من هذه الدراسة هو تصميم هوائي مدمج التشغيل في LTE 700 MHz ولهذا تم إقتراح عدة حلول للهوائيات مع التحقق من صحتها عن طريق المحاكاة الكهرومغناطيسية، وقد تم تحديد الحل الأمل من حيث الحجم والأداء، وأخيرا كان إضافة MIMO إلى هذا الهوائي الطريقة المثالية والحل المناسب.

كلمات المفاتيح: هوائي، MIMO، LTE 700 MHz، محاكاة الكهرومغناطيسية.

Résumé :

Avec le déploiement actuel de la nouvelle génération de téléphonie mobile LTE, le besoin de terminaux mobiles de taille compacte ne cesse d'augmenter. Dans ce contexte, l'objectif de ce stage consiste dans la conception d'une antenne compacte travaillant dans la bande LTE 700MHz. Pour cela, plusieurs solutions antennaires ont été proposées et validées par simulation électromagnétique. Une solution optimale en termes de taille et de performances a été identifiée. Enfin, une configuration MIMO de cette antenne a été simulée et optimisée.

Mots clés : Antenne, LTE 700 MHz, MIMO, simulation électromagnétique

Abstract :

With the current deployment of the new generation mobile standard LTE, the need for compact size mobile devices is increasing. In this context, the aim of this work is to design a compact antenna operating in the 700MHz band of LTE. For this, several antennal solutions have been proposed and validated by electromagnetic simulation. An optimal solution in terms of size and performance was identified. Finally, a MIMO configuration of this antenna was simulated and optimized.

Keywords : antenna, LTE 700 MHz, MIMO, electromagnetic simulation.

Listes des acronymes et abréviations

GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Programme</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
SC-FDMA	signal-carrier frequency division multiple
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
UIT	<i>Union internationale des télécommunications</i>

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Introduction à la norme LTE et état de l'art sur les antennes compactes LTE 700.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Généralités sur la norme LTE.....	3
1.2.1 Avantages et motivations	3
1.2.2 Architecture et bandes de fréquences.....	5
1.3 Généralités sur les antennes	9
1.3.1 Définition d'une antenne	9
1.3.2 Caractéristiques des antennes	9
1.4 Etat de l'art sur les antennes compactes LTE 700.....	14
1.5 Conclusion	19
Chapitre 2 Conception et simulation d'une antenne patch pour LTE à 700 Mhz.....	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Notions théoriques.....	21
2.2.1 Présentation d'une antenne patch.....	21
2.2.2 Avantages et inconvénients des antennes patch.....	22
2.2.3 Principe de fonctionnement.....	23
2.2.4 Paramètres d'une antenne patch.....	24
2.2.5 Impédance d'entrée et alimentation.....	27
2.3 Dimensionnement d'une antenne patch fonctionnant dans la bande LTE 700Mhz.....	28
2.4 Simulation électromagnétique de l'antenne.....	29
2.4.1 Présentation de l'outil de simulation HFSS	29
2.4.2 Géométrie de l'antenne sous HFSS	29
2.4.3 Résultats obtenus	31
2.4.4 Etude paramétrique.....	33
2.5 Conclusion	34
Chapitre 3 Conception et simulation d'une antenne compacte LTE à 700 Mhz.....	35
3.1 Introduction.....	35
3.2 Antennes monopoles imprimées	35
3.3 Partie conception et simulation	37
3.3.1 Géométrie 1.....	37
3.3.2 Géométrie 2.....	39

3.4 Simulations complémentaires de la géométrie 2.....	43
3.4.1 Étude paramétrique	43
3.4.2 Simulation d'une configuration MIMO.....	44
3.5 Conclusion	47
Conclusion générale	48
Annexe.....	50
Bibliographie.....	57

Liste des figures

- Figure 1.1 :** Pays équipés fin 2012 de réseaux LTE : réseaux commerciaux en rouge, réseaux en cours de déploiement en bleu foncé
- Figure 1.2 :** L'évolution des technologies de téléphonie mobile à partir de la 3G
- Figure 1.3 :** Modulation OFDM et SC-FDMA
- Figure 1.4 :** Une architecture simplifiée utilisant la norme LTE
- Figure 1.5:** Principe de la transmission multi-antennes avec MIMO sur le standard LTE
- Figures 1.6 :** Bandes de fréquences allouées à la norme LTE
- Figure 1.7 :** Zone de rayonnement d'une ouverture rayonnante
- Figure 1.8 :** Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture
- Figure 1.9 :** Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne
- Figure 1.10 :** Exemple d'une antenne planaire miniaturisée à l'aide de profils méandres
- Figure 2.1 :** Exemple d'une antenne patch de type rectangulaire
- Figure 2.2 :** Distribution de charge et densité de courant sur une antenne patch
- Figure 2.3 :** Modélisation d'une antenne patch rectangulaire
- Figure 2.4 :** Antenne patch avec encoche
- Figure 2.5:** Modèle HFSS de l'antenne patch LTE à 700 Mhz
- Figure 2.6:** Coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne patch LTE 700
- Figure 2.7:** Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne
- Figure 2.8 :** Diagramme de rayonnement du patch rectangulaire LTE700
- Figure 2.9 :** Coefficient de réflexion pour plusieurs valeurs de W de l'antenne
- Figure 2.10 :** Coefficient de réflexion pour plusieurs valeurs de L de l'antenne
- Figure 3.1 :** Illustration montrant le passage d'une structure monopole 3D à son homologue 2D imprimée
- Figure 3.2 :** Géométrie 1 à base de méandre
- Figure 3.3 :** Modalisation sous HFSS de la géométrie 1
- Figure 3.4 :** Coefficient de réflexion simulé sous HFSS
- Figure 3.5:** Diagramme de rayonnement 3D de la géométrie 1
- Figure 3.6:** Antenne monopole méandre publiée
- Figure 3.7 :** Coefficient de réflexion simulée de l'antenne de la figure 3.6

- Figure 3.8:** Dimensions de la géométrie 2
- Figure 3.9 :** Modalisation sous HFSS de la géométrie 2
- Figure 3.10 :** Coefficient de réflexion simulée de la géométrie 2
- Figure 3.11 :** Diagramme de rayonnement de la géométrie 2 à 700 Mhz
- Figure 3.12 :** Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la largeur W_p pour la géométrie 2
- Figure 3.13:** Configuration MIMO à base de la géométrie 2
- Figure 3.14 :** Coefficient de réflexion de l'antenne MIMO compacte pour l'application LTE 700
- Figure 3.15 :** Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et Coefficient de transmission $|S_{21}|$ d'une antenne MIMO compacte pour l'application LTE 700
- Figure 3.16:** Configuration MIMO à base de la géométrie 2 avec la ligne de neutralisation
- Figure 3.17 :** Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et Coefficient de transmission $|S_{21}|$ d'une antenne MIMO à base de la géométrie 2 avec la ligne de neutralisation

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes couvrant la bande LTE 700 Mhz

Tableau 2.1 : Dimensions théoriques de l'antenne patch LTE à 700 Mhz

Tableau 2.2 : Dimensions de l'antenne patch LTE à 700 Mhz après optimisation sur HFSS

Tableau 3.1 : Dimensions de la géométrie 2

Introduction générale

LTE est aussi appelé "3,99G" car proche de la 4G mais ne satisfaisant pas encore toutes les spécifications imposées par l'union internationale des télécommunications (UIT) pour cette nouvelle norme, notamment en termes de bande passante utilisée. En effet, LTE peut utiliser des bandes passantes de 1,5 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir un débit de l'ordre de 100 Mbit/s en downlink (vers le mobile). LTE sera réellement une norme de 4e génération dans sa version 10 (3GPP) appelée LTE Advanced.

Un élément essentiel des terminaux mobiles pour la LTE est bien évidemment l'antenne. La taille de cette dernière par rapport à celle du terminal mobile est conséquente et doit être ainsi la plus petite possible. De plus, l'utilisation prévue de la technique MIMO pour le LTE impose l'intégration d'au moins de deux antennes dans le même terminal. Ceci risque d'engendrer des terminaux mobiles encombrants. Afin de résoudre cette problématique, beaucoup de travaux de recherche ont été menés dans le but trouver des solutions antennaire compactes pour une intégration aisée dans les terminaux mobiles.

L'objectif de ce travail est la conception d'une antenne compacte fonctionnant dans la bande LTE 700. Le choix cette bande vient du fait que c'est la bande avec les fréquences les plus basses du LTE et qui nécessite ainsi des antennes avec des dimensions importantes. Afin de faciliter son intégration, la taille maximale de cette antenne ne doit pas dépasser 5cmx5cm. Ceci représente une taille inférieure à un huitième de la longueur d'onde à 700 Mhz.

Dans ce travail, deux antennes imprimées monopoles à base de méandre ont été proposées et validées par simulation électromagnétique. Ces deux solutions fonctionnent dans la bande

LTE 700 et présentent un encombrement inférieur à 5 cm x 5cm. La simulation d'une configuration MIMO en utilisant une de ces solutions a montré de bonnes performances.

Ce rapport de stage comporte trois chapitres et il est organisé comme suit.

Le premier chapitre présente une introduction sur la norme LTE en mettant l'accent sur ses bandes de fréquences allouées. Ensuite, et après avoir donné des généralités sur les antennes et leurs caractéristiques, un état de l'art sur les antennes compactes LTE 700 publiées dans la littérature termine ce premier chapitre.

Dans le second chapitre, et après avoir présenté une partie théorique sur les antennes patch de type rectangulaire, une antenne patch imprimée sur FR4 a été dimensionnée pour fonctionner dans la bande LTE 700. Les résultats de la simulation électromagnétique de cette solution ont été exposés et discutés. Enfin, des études paramétriques ont permis de bien comprendre le fonctionnement de cette antenne.

Le troisième et dernier chapitre s'intéresse à la conception et simulation d'antennes compactes pour la bande LTE 700. Dans une première partie, les antennes imprimées de type monopole ont été brièvement présentées pour leur avantage d'être plus faciles à miniaturiser en utilisant des profils irréguliers. Ensuite, la conception et la simulation électromagnétique de deux géométries d'antennes imprimées monopoles compactes à base de méandres ont été détaillées. Enfin, ce chapitre se termine par la simulation d'une configuration MIMO à base d'une des géométries précédentes.

Chapitre 1 Introduction à la norme LTE et état de l'art sur les antennes compactes LTE 700

1.1 Introduction

Dans un premier temps, le GSM (*Global System for Mobile communications*) avait pour but d'offrir uniquement un service d'appel en mode «commutation de circuits». Rapidement, les besoins de services liés à Internet sont devenus de plus en plus importants, ainsi, le GPRS (*General Packet Radio Service*) a permis de fournir des services Internet en mode «commutation de paquets». Plus récemment, l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) et la LTE (*Long Term Evolution*) ont regroupé le service d'appel et les autres services y compris ceux de l'Internet. La LTE est une norme de réseau mobile développée par le 3GPP (*Third Generation Partnership Programme*) pour la prochaine génération (4G) de téléphonie mobile. Pour cette nouvelle génération, des vitesses de téléchargement plus rapides et des temps de latence plus courts sont annoncés. Ceci est fortement utile notamment pour regarder des vidéos ou jouer à des jeux en réseau sur un appareil mobile [1].

Dans ce chapitre, la norme LTE sera détaillée dans un premier temps. Une attention particulière sera portée à son architecture et ses bandes de fréquence. Ensuite, quelques généralités sur les antennes seront données. Enfin, un état l'art non exhaustif sur les antennes compactes couvrant la bande LTE700 est présenté.

1.2 Généralités sur la norme LTE

1.2.1 Avantages et motivations [1]-[4]

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies avancées dont le but principal est d'améliorer le niveau de performances (notamment débit et latence) par rapport à celui fourni par les réseaux 3G existants. L'utilisation dans cette technologie du

multiplexage OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) offre une optimisation dans l'utilisation des fréquences allouées en minimisant les interférences. Egalement, le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le Wimax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée. 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 expérience de meilleure qualité, une structure simplifiée et une optimisation du réseau pour les échanges de données sans séparation du canal audio à commutation de circuit. La figure 1.1 montre le déploiement en fin 2012 de la norme LTE dans le monde.

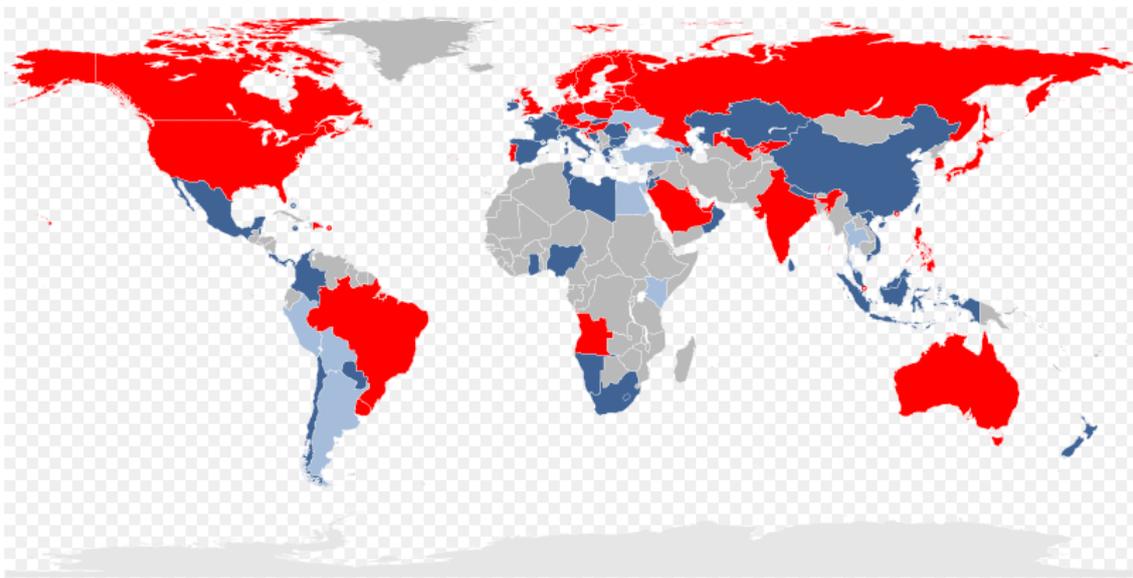


Figure 1.1 : Pays équipés fin 2012 de réseaux LTE : réseaux commerciaux en rouge, réseaux en cours de déploiement en bleu foncé [4]

Deux éléments plaident en faveur d'un développement du LTE. La première relève de la performance : bande passante massive pour les appareils mobiles et meilleure qualité d'expérience grâce à une latence plus faible du réseau IP fixe de bout-en-bout. Le deuxième concerne la flexibilité de l'application, autre avantage d'une structure orientée vers un service IP de bout-en-bout. Le LTE peut également déployer de nouveaux services en lien avec la vitesse et la flexibilité, comme s'y attendent les internautes. L'intelligence du

Le système LTE se loge en début de réseau (les décisions liées à la mise en application de la politique sont prises en début de réseau au lieu de les renvoyer au centre comme dans les technologies précédentes) et le LTE travaille indépendamment de la technologie d'accès, ce qui ouvre un champ plus large pour les futurs appareils et applications révolutionnaires. La figure 1.2 résume le développement des technologies de téléphonie mobile à partir de la 3G.

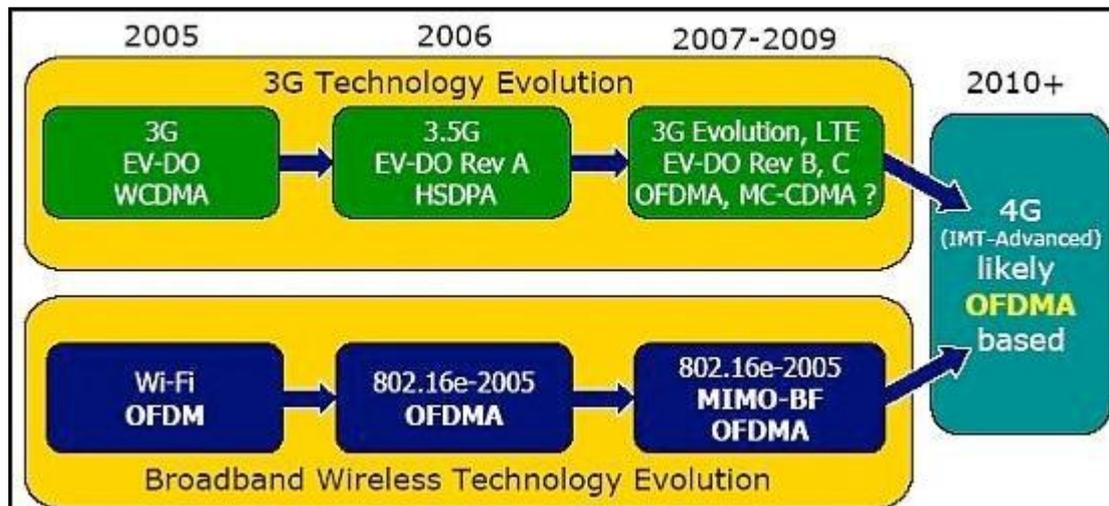


Figure 1.2 : L'évolution des technologies de téléphonie mobile à partir de la 3G

1.2.2 Architecture et bandes de fréquences [3]-[4]

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 1.3 rappelle le spectre des deux codages OFDM et SC-FDMA. Et la figure 1.4 représente l'architecture d'un réseau avec la norme LTE.

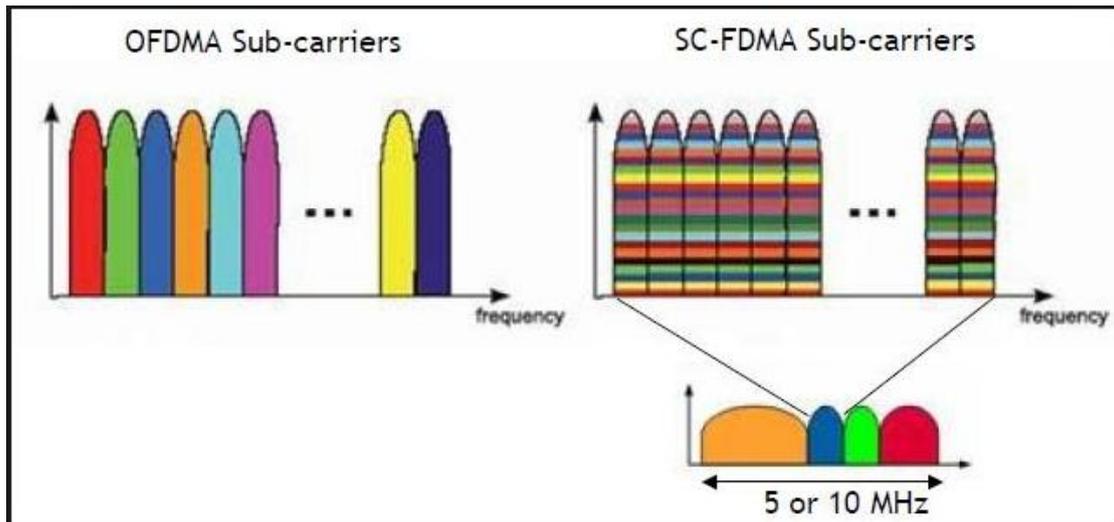


Figure 1.3 : Modulation OFDM et SC-FDMA

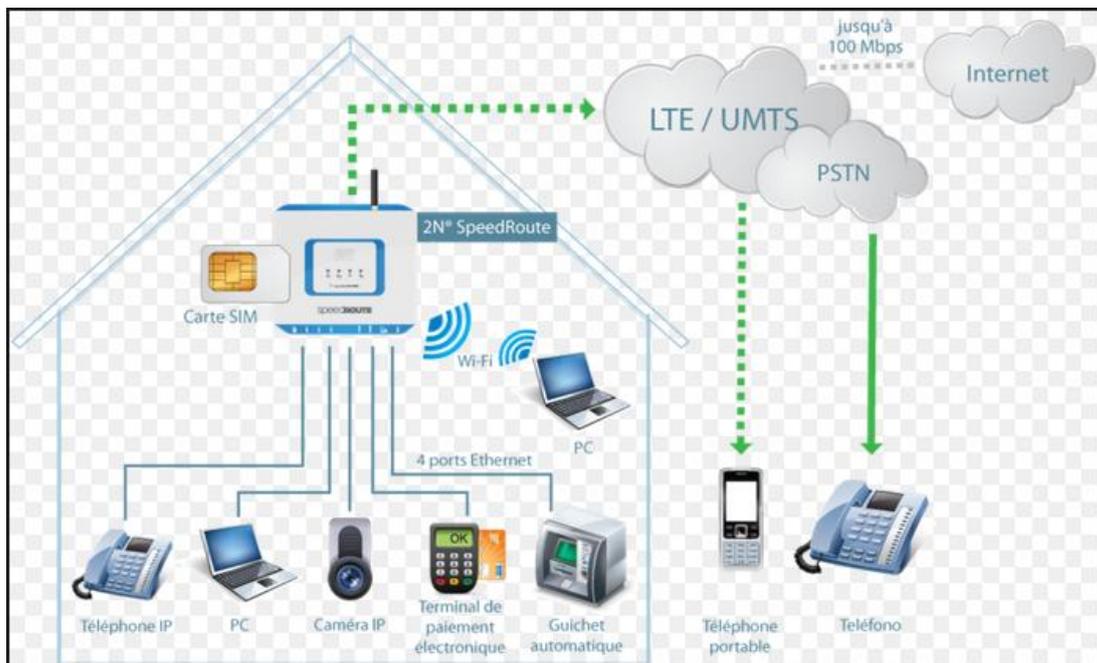


Figure 1.4 : Une architecture simplifiée utilisant la norme LTE

En outre, l'utilisation de l'architecture multi-antennes (MIMO) pour le LTE contribue à augmenter les débits de transfert de données (supérieurs à 100/50 Mbits/s) en autorisant plusieurs chemins de signaux. La technologie MIMO permet la transmission parallèle et simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur. Plusieurs techniques MIMO sont prévus pour le LTE: multiplexage spatial (*Space Multiplex*), diversité spatiale (*Space Diversity*), formation de

faisceaux (*Beamforming*), ou l'association de ces techniques. Le service utilisé, le débit de données, l'état du canal de télécommunication mobile et les propriétés du téléphone portable déterminent où et quand une forme de MIMO est utilisée. Le principe est représenté schématiquement par la figure 1.5.

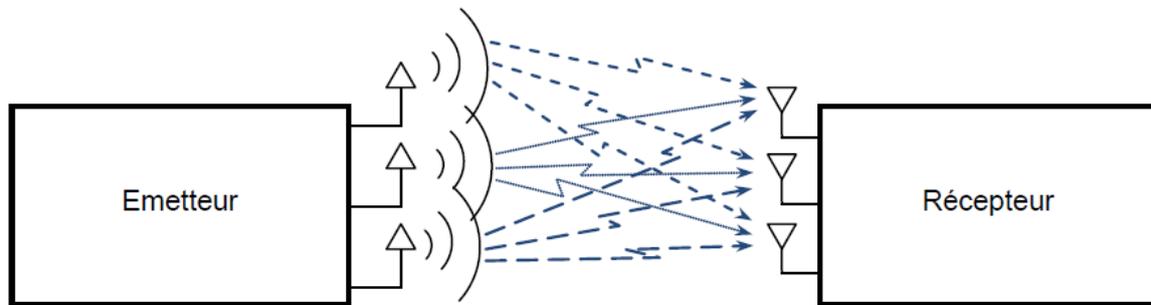


Figure 1.5: Principe de la transmission multi-antennes avec MIMO sur le standard LTE

Le LTE doit pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande initialement requises ont par la suite été modifiées pour devenir les suivantes : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant. Notons que le débit crête est proportionnel à la largeur de bande. Les modes de duplexage FDD et TDD doivent être pris en charge pour toutes ces largeurs de bande.

Le spectre est une ressource rare, son organisation au niveau mondial est ainsi nécessaire. Elle garantit la compatibilité des systèmes entre pays, autorisant l'itinérance des utilisateurs à travers le monde. Elle permet aussi aux constructeurs d'équipements de réaliser des économies d'échelle substantielles, réduisant les coûts et favorisant le développement des technologies. Cette mission d'harmonisation au niveau mondial est assurée par le secteur Radiocommunications de l'UIT (Union internationale des télécommunications) ou UIT-R. Les WRC (*World Radiocommunication Conference*) sont des forums internationaux organisés tous les quatre ans par l'UIT-R, au cours desquels les traités internationaux gouvernant l'utilisation du spectre de fréquences radio peuvent être revus.

D'un point de vue fréquentiel, le déploiement du LTE peut ainsi se concevoir de deux manières :

- Déploiement sur une bande de fréquences déjà allouée à un système 2G ou 3G ;
- Déploiement sur de nouvelles bandes de fréquences.

Les bandes de fréquences ci-après ont également été identifiées au niveau mondial :

- 700 MHz pour l'Amérique du Nord, l'Amérique latine et l'Asie ;
- 800 MHz pour l'Europe et l'Asie ;
- 1800 MHz pour l'Europe, l'Asie et le Moyen-Orient ;
- 2800 MHz sans allocation globale mais acceptée par un grand nombre de pays d'Asie, d'Europe, d'Afrique, du Moyen-Orient, Amérique latine et la Russie.

La figure 1.6 fait la synthèse des bandes de fréquences allouées pour le standard LTE pour différentes régions du monde.



Figures 1.6 : Bandes de fréquences allouées à la norme LTE

1.3 Généralités sur les antennes

1.3.1 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. Elle permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques et transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa [5]. Lorsqu'elle est utilisée pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'elle est utilisée en sens inverse ; on l'appelle antenne de réception. L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

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

1.3.2 Caractéristiques des antennes

Afin de décrire les caractéristiques et les performances des antennes, divers paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont classés en deux catégories [6]. La première consiste à caractériser l'antenne comme un élément d'un circuit électrique (Z_A et $|S_{11}|$). La seconde s'intéresse à ses propriétés de rayonnement, tel que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain.

a Impédance d'entrée

On appelle impédance d'entrée de l'antenne l'impédance vue à l'entrée de ce composant. Elle est représentée par [6] :

$$Z_A = R_a + jX_A \quad (1.1)$$

L'impédance de l'antenne est influencée par les objets environnants, en particulier par des objets ou des plans métalliques proches ou encore par la proximité d'autres antennes. Nous ne traiterons dans ce paragraphe que l'impédance propre de l'antenne, c'est-à-dire de l'antenne placée seule et rayonnant dans l'espace vide infini.

La résistance d'entrée R_A représente un terme de dissipation. Les pertes par effet Joule peuvent représenter des valeurs non négligeables en fonction de la géométrie de l'antenne. Les pertes dans le plan de masse sont aussi à prendre en compte.

La réactance X_A est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

Cette notion est très importante pour l'adaptation des antennes aux feeders qui les alimentent pour éviter toute réflexion.

b Coefficient de réflexion |S11|

Le module du coefficient de réflexion $|S_{11}|$ met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. C'est sur paramètre que l'on se base lors de l'optimisation des antennes [6].

L'impédance d'entrée de l'antenne est utilisée pour insérer cet élément de façon optimale dans la chaîne de l'émetteur ou du récepteur. Si l'impédance d'entrée de l'antenne Z_A , le signal se réfléchit à l'entrée de l'antenne avec un coefficient Γ dont l'expression est :

$$\Gamma = (Z_A - Z_0) / (Z_A + Z_0) \quad (1.2)$$

Dans le cas où le coefficient de réflexion est non nul, un système d'ondes stationnaires apparaît et la puissance émise par le générateur n'est pas transmise de façon optimale à l'antenne. C'est donc ce cas de réflexion minimale à l'entrée de l'antenne qu'on visera. Il correspond à un coefficient de réflexion $|S_{11}|$ proche de 0 en valeur linéaire. On admet qu'une bonne adaptation est obtenue lorsque le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB. Cela correspond un rapport d'onde stationnaire (VSWR), compris entre 1 et 1.2. Le rapport d'ondes stationnaires est défini comme le rapport de la tension maximale à la tension minimale sur une ligne.

c largeur de bande

La largeur de bande, appelée aussi la bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquence dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Il s'agit la plupart du temps de la puissance transmise par l'antenne [6].

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquence situé entre une valeur minimale f_1 et une valeur maximale f_2 .

La bande de fréquence Δf est définie par la différence entre ces deux fréquences :

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (1.3)$$

La largeur relative de bande Br est un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale f_0

$$Br = (f_2 - f_1) / f_0 \quad (1.4)$$

d Directivité

La directivité d'une antenne dans une direction $D(\theta, \phi)$ est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope[7].

$$D(\theta, \phi) = P(\theta, \phi) / (P_{\text{isotrope}} / 4\pi) \quad (1.5)$$

e 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 [5]. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, ϕ_0) . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

f Zone de rayonnement d'une ouverture plane

Nous avons jusqu'à ici traité des antennes en zone de champ lointain, c'est-à-dire lorsque la distance est suffisamment grande pour que les différences d'amplitude et de phase des contributions de chaque élément de l'antenne soient négligeables. Dans cette zone, l'onde peut être considérée comme une onde sphérique, localement vue comme plane. La figure 1.7 présente les différentes zones de rayonnement d'une ouverture plane. A proximité de l'ouverture rayonnante, l'onde est plane, les directions de propagation des ondes rayonnées par chaque source secondaire restent parallèles entre elles [5].

Le faisceau émis par l'ouverture commence à diverger et l'onde devient peu à peu sphérique. Deux critères permettent de déterminer si on se situe en zone de champ lointain (équation 1.6), la première condition étant adaptée aux petites ouvertures.

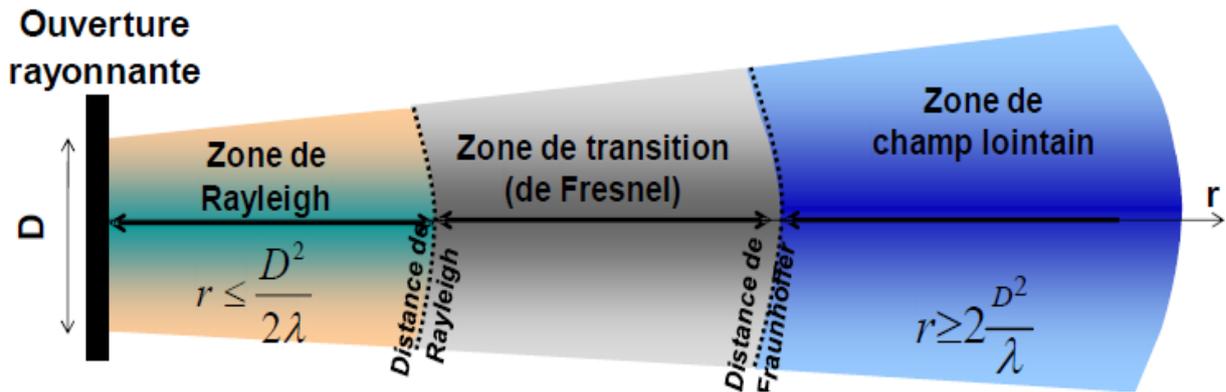


Figure 1.7 : Zones de rayonnement d'une ouverture rayonnante

$$r > 10 D \text{ ou } r > 2D^2/\lambda \quad (1.6)$$

Avec

r : la distance de l'antenne

D : le diamètre de la surface équivalent de l'antenne

g Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal [5].

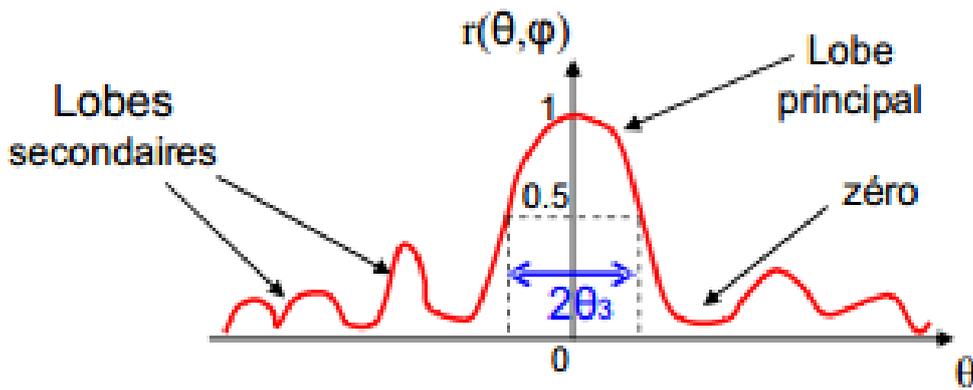


Figure 1.8 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture ($2\theta_3$)

h 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. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique [5].

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \phi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Figure 1.9).

En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\phi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H.

$$r(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta_0, \phi_0)} \quad (1.7)$$

← Puissance rayonnée dans une direction quelconque
 ← Puissance rayonnée max.

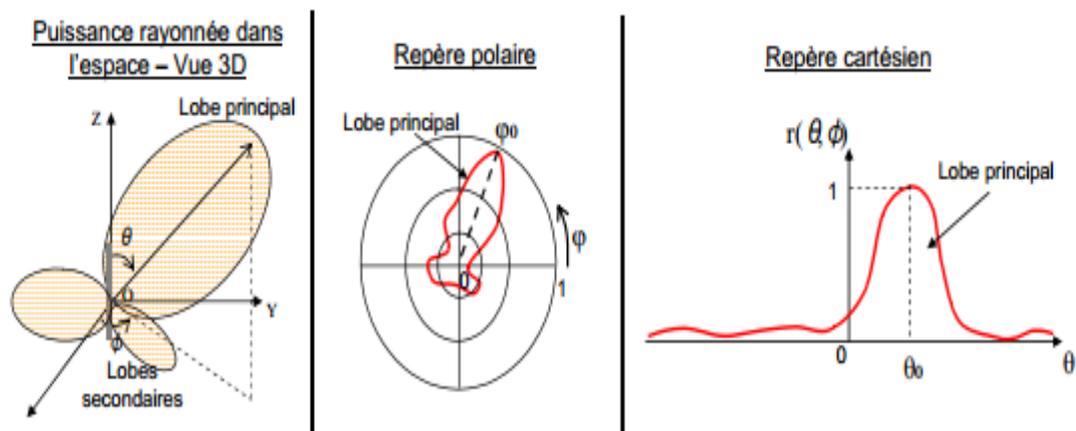


Figure 1.9 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne

1.4 Etat de l'art sur les antennes compactes LTE 700

L'antenne constitue un élément clé pour les systèmes de télécommunications en général et en particulier pour le LTE. Parmi les diverses technologies utilisées pour intégrer les antennes, les solutions planaires apparaissent aujourd'hui comme particulièrement appropriées pour répondre à l'ensemble des spécifications demandées. Cette approche planaire offre en effet suffisamment de souplesse aux concepteurs pour développer des solutions performantes et de dimensions particulièrement petites. Conformément à un abus de langage tout à fait classique dans le domaine des antennes, on entend par « antennes planaires » (ou antennes réalisées selon la technologie planaire) : aussi bien les antennes réellement planes, c'est-à-dire celles dont le plan de masse et le ou les éléments rayonnants sont plans, que les antennes non réellement planes, c'est-à-dire celles dont le plan de masse et/ou au moins un des éléments rayonnants n'est (ne sont) pas plan(s) mais conformé(s) selon une forme tridimensionnelle (3D) déterminée, de manière à épouser la forme d'un support. Les antennes planaires de la seconde catégorie précitée (antennes non réellement planes) sont généralement, mais non obligatoirement, réalisées selon une technologie imprimée.

La miniaturisation des antennes constitue aujourd'hui un challenge important et fait l'objet de nombreux travaux au niveau international. Cette miniaturisation offre en effet de

multiples avantages, parmi lesquels on peut citer : une facilité d'intégration des antennes dans des matériels embarqués (en particulier, au sein des terminaux mobiles), une plus grande flexibilité de mise en réseau de ces éléments rayonnants (pour le MIMO par exemple), une plus grande ouverture de diagramme facilitant notamment l'intégration de systèmes à large balayage de faisceau. Concernant la miniaturisation des antennes pour le LTE, le principe de base de la plupart des solutions mises en œuvre à ce jour consiste à augmenter la longueur électrique équivalente du motif imprimé, pour qu'il puisse rayonner à la fréquence désirée, tout en réduisant ses dimensions physiques (sa surface ou son volume) [8-22]. Plusieurs profils irréguliers peuvent être appliqués pour cette technique de miniaturisation à savoir : fractales, méandres, Un exemple de l'utilisation des formes de type méandre est représenté par la figure 1.10.

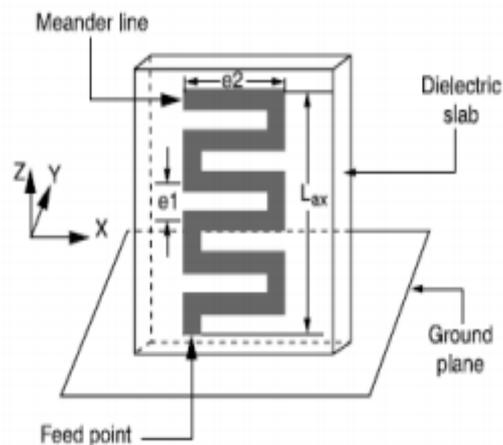
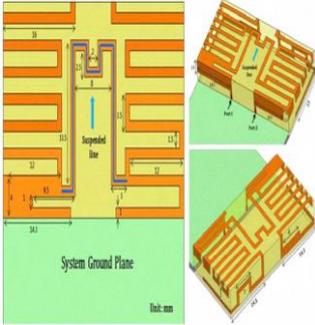
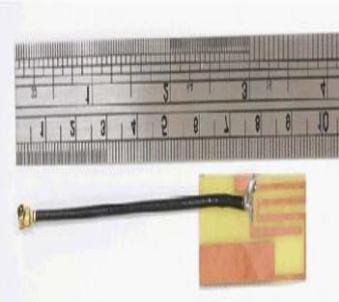
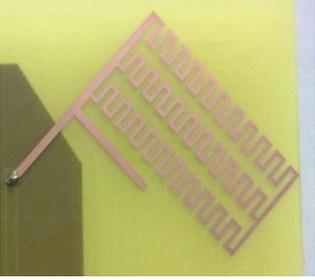
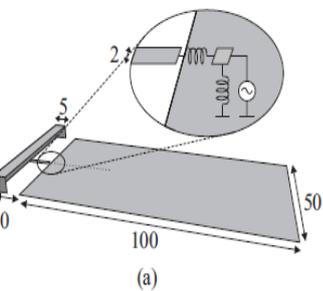
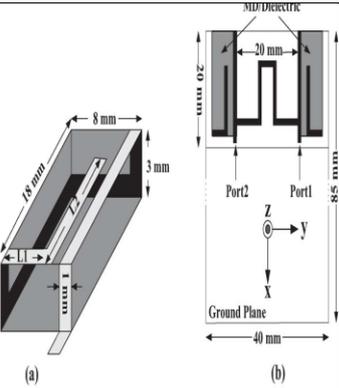
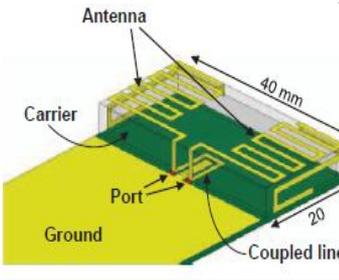
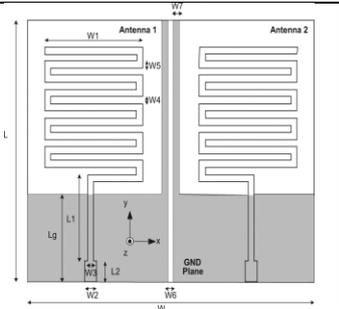
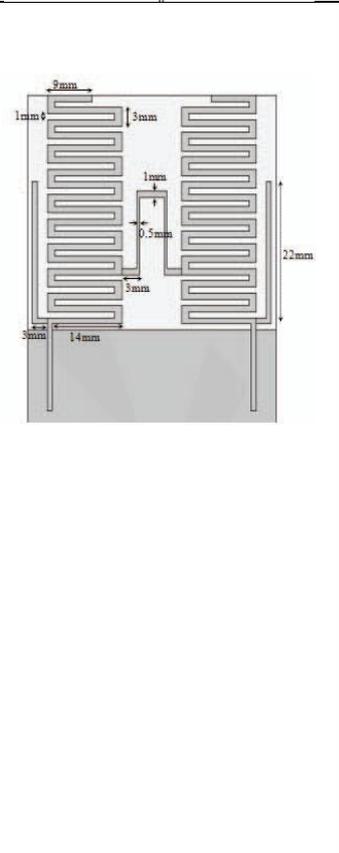
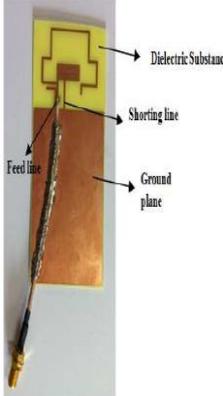
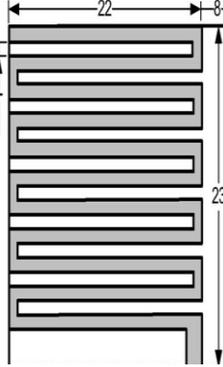


Figure 1.10 : Exemple d'une antenne planaire miniaturisée à l'aide de profils méandres.

Dans la suite, un état de l'art non exhaustif des antennes LTE compactes fonctionnant dans la bande 700 Mhz est résumé dans le tableau 1.1. Cette bande (la plus basse fréquence de la norme LTE) représente la bande pour laquelle l'antenne présente les plus grandes dimensions. La miniaturisation des ces antennes (i.e LTE 700) est cruciale pour leur intégration dans les terminaux mobiles de plus en plus compacte. Ceci justifie le choix de cette bande pour l'état de l'art ainsi que pour la suite de ce travail. Il est à noter que dans cet état de l'art on peut trouver non seulement des antennes monobandes couvrant uniquement la bande 700 Mhz mais aussi des antennes multibandes couvrant la bande 700 Mhz et d'autres bandes de fréquences LTE.

Titre de la publication	Fréquence (Mhz)	Taille	Aperçu de l'antenne	Référence
The Compact Quad-band Mobile Handset Antenna for the LTE700 MIMO Application	700	40X 20X5 mm ³		[9]
Small-size multiband planar antenna for LTE700/2300/2500 operation in the tablet computer	700 - 2300 - 2500	12x35 mm ²		[10]
Compact Dual-Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications	700 2500	150 × 90 mm ²		[11]
Capacitive coupling element antennas for multi-standard mobile handsets	700 et 2690	50x100 mm ²	 <p>(a)</p>	[12]

Titre de la publication	Fréquence (Mhz)	Taille	Aperçu de l'antenne	Référence
Quad-Band Monopole Antenna Including LTE 700 MHz With Magneto-Dielectric Material	700	18x8x3 mm ³ Pour une antenne simple et 40x85 mm ² pour le MIMO		[13]
Low Correlation MIMO Antenna for LTE 700MHz Band	700	40x20 mm ²		[14]
An 800 MHz 2 1 Compact MIMO Antenna System for LTE Handsets	760	40x50 mm ²		[15]
Compact Dual-Band Monopole Antenna for LTE Mobile Phones	700 et 2500	120x50 mm ²		[16]

Titre de la publication	Fréquence Mhz	Taille	Aperçu de l'antenne	Référence
Inverted-L Antenna with Split-Ring Resonator Structures	LTE700et LTE2600	50x10 mm ²		[17]
Design of Internal Multi-band Mobile Antenna for LTE700/WCDMA/UMTS/WiMAX/WLAN Operation	700	40x31 mm ²		[18]
Compact Antenna Array With Port Decoupling for LTE-Standardized Mobile Phones	710 et 24500	22x23 mm ²		[19]
Broadband internal antenna for 700MHz LTE applicatoin with distributed feeder	700	59 × 5.9 ×6.2 mm ³		[20]

Titre de la publication	Fréquence (Mhz)	Taille	Aperçu de l'antenne	Référence
Issues and Challenges of LTE Antenna Designs for USB Dongle Device	700et 850 900 pour DCS et 1800 PCS et 2010-2300-2500	7x11x46 mm ³		[21]
Planar Compact LTE/WWAN Monopole Antenna for Tablet Computer Application	700 Et 2690	45 × 15 mm ²		[22]

Tableau 1.1 : Quelques travaux de recherche sur les antennes compactes couvrant la bande LTE 700 Mhz

L'état de l'art non exhaustif résumé dans le tableau 1.1 présente des solutions compactes couvrant la bande LTE 700 seule ou avec d'autres bandes (solutions multi-bandes). Cette liste de travaux de recherche récents montre le fort intérêt d'avoir des antennes compactes pour la norme LTE.

Dans ce travail, il s'agit de concevoir une antenne couvrant la bande LTE 700 compacte. Afin de faciliter son intégration, une solution imprimée est exigée avec une taille maximale ne dépassant pas 5cm x 5cm.

1.5 Conclusion

Dans un premier temps, nous avons présenté une introduction générale au standard LTE, son principe de fonctionnement ainsi que son architecture. Les bandes de fréquence allouées pour cette norme ont été également données. Ensuite, nous avons présentés

quelques généralités sur les antennes et leurs caractéristiques. Enfin, nous nous sommes intéressés aux antennes couvrant les bandes LTE et à leur miniaturisation. Une attention particulière a été donnée aux antennes couvrant la bande LTE la plus basse (i.e. 700 Mhz) en exposant un état de l'art sur leur miniaturisation.

Chapitre 2 Conception et simulation d'une antenne patch pour LTE à 700 Mhz

2.1 Introduction

Le concept d'antennes « patch » est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 70. Les antennes imprimées ou « patch » en anglais sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. De part leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. Leur principal avantage réside dans leur simple profil et leur faible coût de fabrication. Les antennes patch peuvent être utilisées dans de nombreuses applications à partir des bandes UHF.

Dans ce chapitre, nous présenterons la conception d'une antenne patch de type rectangulaire fonctionnant dans la bande LTE 700MHz. Il est organisé comme suit. Après avoir donné quelques notions théoriques sur les antennes patch ainsi que leurs équations de conception, une antenne patch fonctionnant à 700 Mhz a été dimensionnée. Ensuite, nous avons utilisé l'outil HFSS pour la simulation électromagnétique et l'optimisation de cette antenne. Enfin, quelques études paramétriques nous ont permis de comprendre le phénomène de fonctionnement de l'antenne patch.

2.2 Notions théoriques

2.2.1 Présentation d'une antenne patch

Actuellement, les antennes patch deviennent de plus en plus importantes en raison de leur faible coût de fabrication et la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration. Parmi ces formes géométriques on peut citer les formes rectangulaires, carrés, circulaires et triangulaires. Un exemple d'une antenne patch de forme rectangulaire imprimé sur un substrat d'épaisseur h est donné par la figure 2.1. Les dimensions du patch (W et L) sont

généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Elles sont ainsi dictées par la fréquence de fonctionnement de l'antenne. L'alimentation de cette antenne peut se faire de plusieurs manières : Microruban (Figure 2.1), coaxiale ou par couplage.

Le plan de masse ne pouvant pas être infini. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne. Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur (h) négligeable devant la longueur d'onde et présenter de faibles pertes (on caractérise les pertes d'un diélectrique par $\tan \delta$. Une valeur typique se situe aux alentours de 10^{-3}).

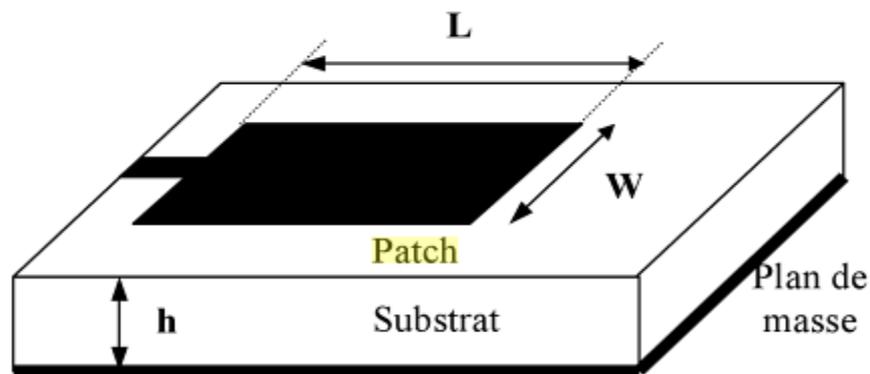


Figure 2.1 : Exemple d'une antenne patch de type rectangulaire

2.2.2 Avantages et inconvénients des antennes patch

Les antennes patch présentent par rapport à d'autres structures antennaires plusieurs avantages, parmi eux :

- Faible coût de fabrication.
- Simple profil, robustesse et faible encombrement
- Faible poids
- Facilité de fabrication et d'intégration dans des appareils électroniques transportables (par exemple : les GPS, les appareils photos numériques,...etc)
- Adaptable aux surfaces planes et non planes (conformable)

Concernant maintenant les inconvénients on peut citer l'inconvénient principal de l'antenne patch qui est sa faible bande passante.

2.2.3 Principe de fonctionnement

Une antenne est constituée d'éléments conducteurs qui lorsqu'ils entrent en résonance, convertissent les courants électriques à leur surface en onde électromagnétique. D'une manière très générale, une antenne peut être caractérisée par différents paramètres comme la direction de polarisation, son impédance d'entrée, sa bande passante, son diagramme de rayonnement ou son efficacité. Dans cette partie on s'intéressera à ces différents paramètres. Aussi, le substrat le mieux approprié est celui possédant un constant diélectrique faible, une épaisseur grande (par rapport à la longueur d'onde d'opération) et peu de pertes ($\tan \delta$). Un substrat épais augmente la puissance rayonnée par l'antenne, réduit les pertes par effet Joule et améliore la bande passante de l'antenne. En contrepartie, le poids est augmenté. Une faible valeur de la constante diélectrique (ϵ_r) favorise l'extension des champs autour de la ligne et donc la puissance rayonnée.

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire s'effectue à partir de sa forme géométrique. Lorsqu'on excite la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique se propage sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant. Une distribution de charge va se mettre à l'interface substrat - plan de masse, sur et sous le composant rayonnant, La figure 2.2 montre cette distribution dans le cas particulier où l'antenne rayonne le plus efficacement c'est à dire lorsqu'elle devient résonante (la longueur de l'élément rayonnant est un multiple de la demi-longueur d'onde guidée). Le cas présenté correspond au mode fondamental de l'antenne

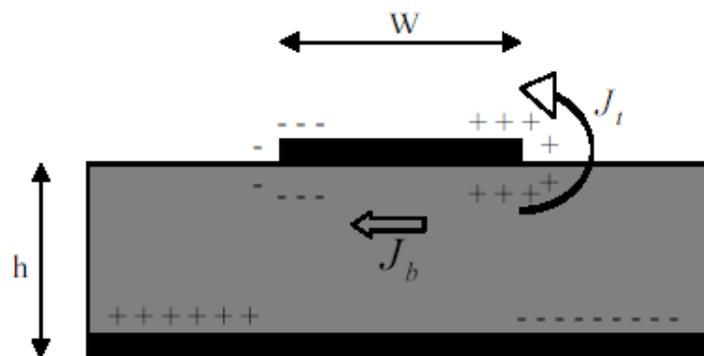


Figure 2.2 : Distribution de charge et densité de courant sur une antenne patch

2.2.4 Paramètres d'une antenne patch

La répartition des lignes de champs qui s'étendent autour et dans la structure dépend essentiellement de la largeur W du patch et des caractéristiques du substrat à savoir sa constante diélectrique ϵ_r et son épaisseur h .

Du point de vue modélisation, les deux milieux (substrat en dessous et air au dessus) sont remplacés par un unique milieu effectif caractérisé par une constante diélectrique exprimée comme suit [7]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 10 \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

avec

ϵ_{eff} : constante diélectrique effective.

ϵ_r : Constante diélectrique.

h : Epaisseur du substrat diélectrique.

W : largeur du patch.

Nous pourrions montrer par l'étude des composantes tangentielles du champ magnétique que le patch rectangulaire peut se modéliser comme une cavité avec 4 murs magnétiques (bords de la cavité) et 2 murs électriques (formés par les métallisations et dans l'approximation que la composante normale du champ électrique est constante) (voir Figure 2.3).

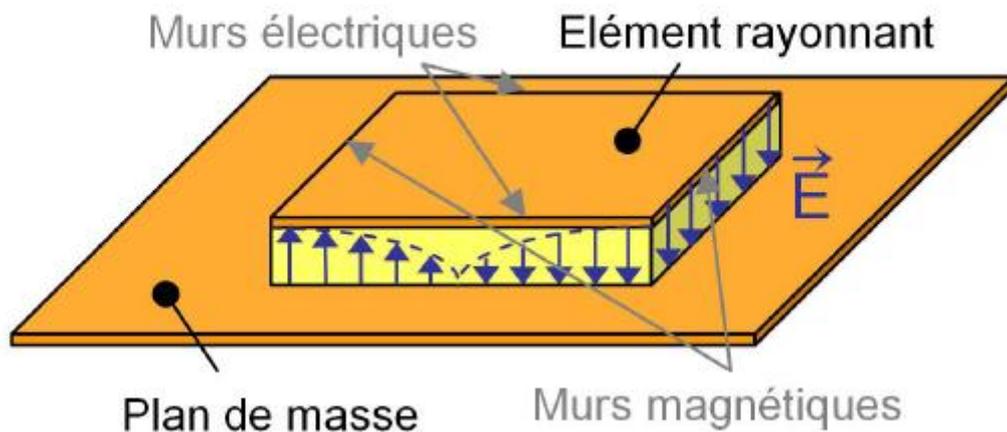


Figure 2.3 : Modélisation d'une antenne patch rectangulaire

En posant les équations de propagation avec les conditions aux limites adéquates, on détermine assez facilement les fréquences de résonances de l'antenne patch rectangulaire pour les différents modes:

$$f_{m,n} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_{eff}}\right)^2} \quad (2.2)$$

avec : $f_{m,n}$: Fréquence de résonance du mode (m,n) .

c: vitesse de la lumière dans le vide.

ϵ_r : permittivité relative du substrat

m et n : modes de cavités, entiers > 0.

L_{eff} : longueur effective du patch ($L_{eff} = L + \Delta L$, L étant la longueur du patch)

W_{eff} : largeur effective du patch ($W_{eff} = W + \Delta W$, W étant la largeur du patch)

Et :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.813\right)} \quad (2.3)$$

ΔW s'obtient en remplaçant la largeur W par la longueur L dans l'équation (2.3).

La largeur du patch W est calculée comme suit :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.4)$$

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 [7]:

$$L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_r}} - 2 * \Delta L \quad (2.5)$$

La bande passante de l'antenne est donnée par l'équation (2.6).

$$B = 3.11 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \frac{W}{L} \frac{h}{W} \quad (2.6)$$

2.2.5 Impédance d'entrée et alimentation

La largeur du patch (W) a un effet important sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Ce paramètre influe également sur l'impédance d'entrée de l'antenne exprimée comme suit :

$$Z_{in} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (2.7)$$

L'impédance d'entrée du patch élémentaire est de quelques centaines d'Ohms sur le bord de la cavité, cette impédance décroît en se dirigeant vers le centre du patch où elle s'annule. La méthode d'alimentation la plus répandue est celle qui se fait par une connexion directe par une ligne microruban. Il suffit donc de rechercher le point sur le patch où l'impédance vaut 50 Ohms. Ceci peut être réalisé en introduisant par exemple une encoche comme indiqué sur la Figure 2.4. Cette technique sera adaptée pour notre travail.

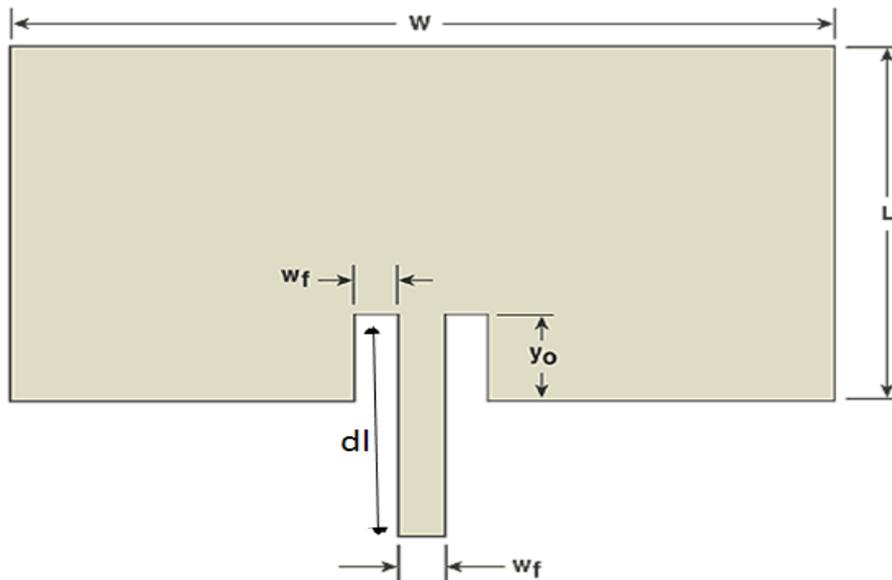


Figure 2.4 : Antenne patch avec encoche

L'équation qui sert à déterminer l'impédance d'entrée du patch à une distance y_0 du bord du patch est la suivante [7]:

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2Gr} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (2.8)$$

Avec

$$Gr = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (2.9)$$

Et

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.10)$$

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

Afin d'obtenir une bonne adaptation à l'entrée de l'antenne par rapport à 50 Ohms, on calcule y_0 permettant d'avoir un R_{in} proche de 50 Ohms.

2.3 Dimensionnement d'une antenne patch fonctionnant dans la bande LTE 700Mhz

Il s'agit de concevoir une antenne capable de couvrir la bande la plus basse du standard LTE, autrement dit la bande 700 Mhz. Pour cela, on utilise les équations présentées précédemment. Le substrat choisi pour cette conception est le FR4 ayant $\epsilon_r=4.4$ et $h=1.6$ mm.

La ligne microruban d'excitation a été dimensionnée (W_f) afin d'obtenir une impédance caractéristique de 50 Ohms. Ceci est réalisé à l'aide de l'outil *LineCalc* de ADS [23]. Les dimensions analytiques du patch ainsi obtenues sont résumées dans le tableau 2.1.

W	L	W_f	dl	y_0
130.43 mm	103 mm	3.05 mm	85 mm	32 mm

Tableau 2.1 : Dimensions théoriques de l'antenne patch LTE à 700 Mhz

Les dimensions analytiques du tableau 2.1 ont été vérifiées avec un applet JAVA nommé « Microstrip Patch Antenna Calculator » trouvé sur [25].

2.4 Simulation électromagnétique de l'antenne

2.4.1 Présentation de l'outil de simulation HFSS

Durant ces dernières années, le développement de techniques rigoureuses permettant de résoudre les équations de Maxwell a introduit et imposé divers outils de simulation électromagnétique. Ces outils sont de plus en plus utilisés dans l'analyse et la conception de dispositifs hyperfréquences utilisés dans les applications micro-ondes et de communications sans fil.

Dans ce travail, notre choix s'est porté sur l'utilisation du logiciel HFSS utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Une description plus détaillée de ce logiciel est donnée en Annexe.

Afin de pouvoir modéliser le fonctionnement d'une antenne sur ce logiciel, nous avons suivi les étapes suivantes:

- Création du substrat diélectrique : définir les différentes couches de substrats diélectriques et de métallisation.
- Création du dessin des différentes couches actives : représenter la zone de métallisation de la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant.
- Maillage de la structure : fixer le degré de précision des calculs, ce qui influera sur la durée de la simulation.
- Simulations :
 - Définir les fréquences extrêmes de la simulation.
 - Présentation des résultats.
 - Visualiser les principaux paramètres (adaptation, bande passante, diagramme de rayonnement et gain).

2.4.2 Géométrie de l'antenne sous HFSS

La Figure 2.5 montre le modèle de simulation de l'antenne patch LTE 700 introduit sous HFSS.

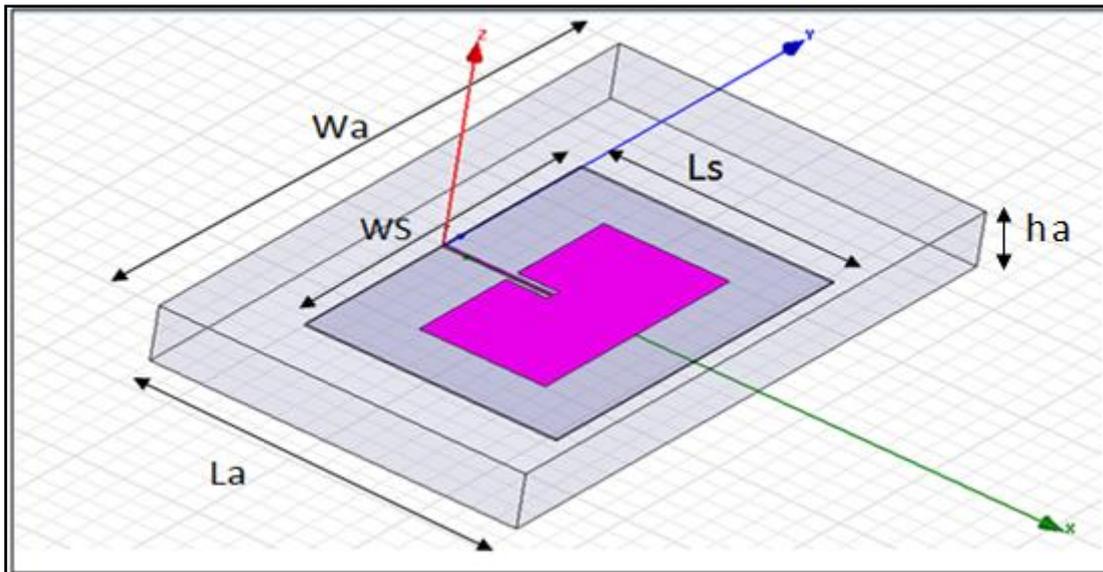


Figure 2.5: Modèle HFSS de l'antenne patch LTE à 700 Mhz

A la différence avec la partie de dimensionnement théorique (supposant un plan de masse infini), la partie simulation électromagnétique a été réalisée avec un plan de masse de dimension finie (plus proche de la réalité). Nous avons choisi un plan de masse (figure 2.5) de grandeur deux fois supérieure à la dimension du patch. Autrement dit : $W_s = 404.84$ mm et $L_s = 210$ mm.

Plusieurs types de ports d'excitation peuvent être configurés sur HFSS. Notre choix s'est porté sur le type « Lumped port » à 50 Ohms.

Les conditions aux limites (nécessaires pour une simulation HFSS) ont été introduites en mettant l'antenne dans une boîte avec des murs de type « Radiation ». Les dimensions de cette boîte sont les suivantes (Figure 2.5): $W_a = 500$ mm, $L_a = 300$ mm et $h_a = 50$ mm

La simulation sous HFSS de l'antenne patch ayant les dimensions obtenus analytiquement (tableau 2.1) a montré un décalage de la fréquence de fonctionnement. En effet, au lieu d'obtenir une fréquence centrée sur 700 Mhz, la simulation nous indique une fréquence de 860 Mhz. Une optimisation des dimensions de l'antenne est donc nécessaire afin de retrouver la fréquence de fonctionnement désirée. Les nouvelles dimensions optimisées de l'antenne patch sont données dans le tableau 2.2.

W	L	W_f	dl	Y_0
200.43 mm	103 mm	3.05 mm	90 mm	34 mm

Tableau 2.2 : Dimensions de l'antenne patch LTE à 700 Mhz après optimisation sur HFSS

Avant de présenter les performances simulées de cette antenne patch, il est important de noter le fort l'encombrement de celle-ci (40.4 cm x 21 cm) par rapport aux spécifications de taille fixées à la fin du chapitre 1 (5cm x 5cm).

2.4.3 Résultats obtenus

Les résultats de simulation obtenus pour l'antenne LTE à 700 Mhz, sont montrés sur les Figures 2.6, 2.7 et 2.8. La figure 2.6 montre le module du coefficient de réflexion S11 à l'entrée de l'antenne tandis que les figures 2.7 et 2.8 donnent le diagramme de rayonnement en 2D et 3D respectivement.

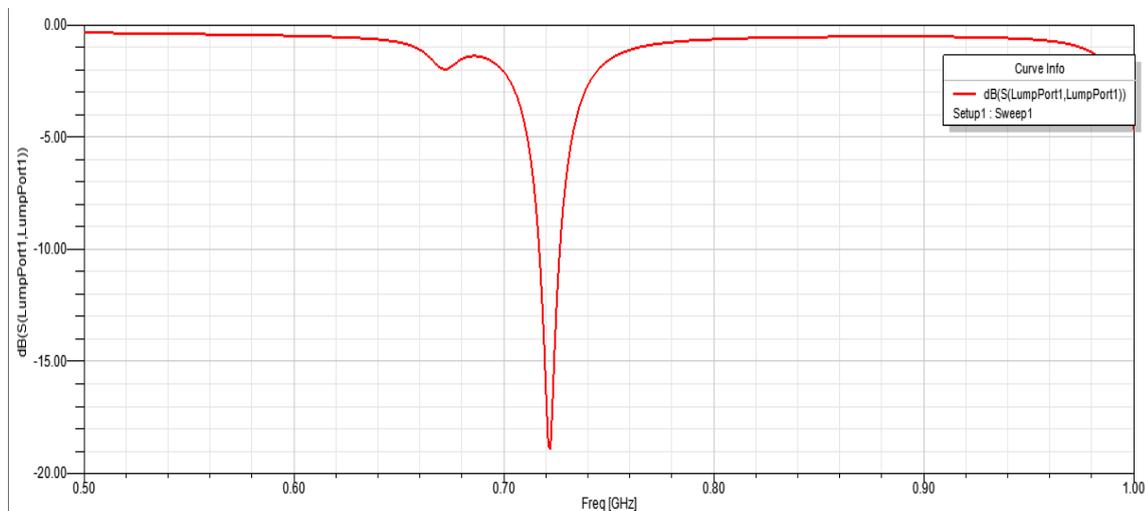


Figure 2.6: Coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne patch LTE 700

Il est à noter que l'antenne conçue est bien adapté à 700 Mhz car elle présente un $|S_{11}| = 19$ dB

La bande passante obtenue (pour $|S_{11}| < -10\text{dB}$) est de 1.25%. Comme attendu pour les antennes patch, cette bande passante est relativement étroite.

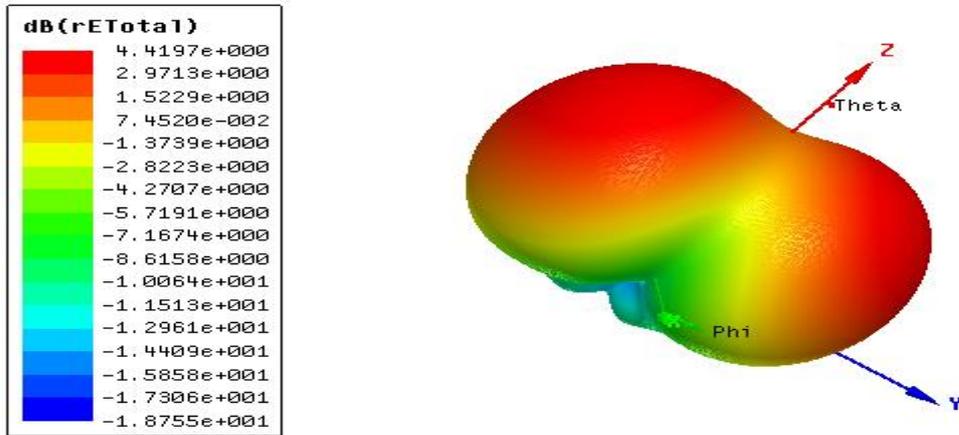


Figure 2.7: Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne

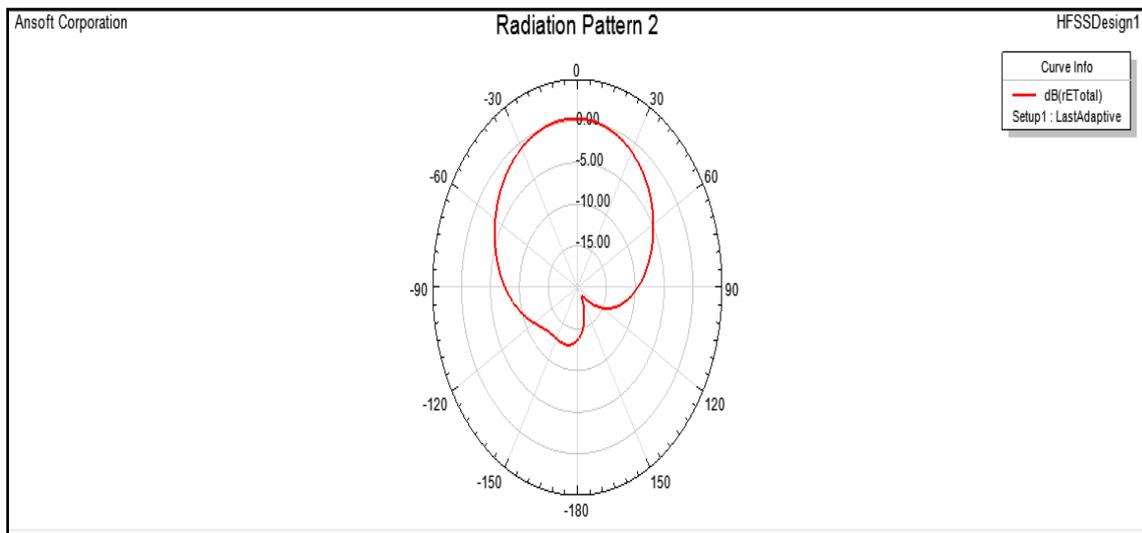


Figure 2.8 : Diagramme de rayonnement du patch rectangulaire LTE700

Les diagrammes de rayonnement obtenus sont ceux d'une antenne patch avec un rayonnement unilatéral.

Afin de voir l'influence des paramètres clés d'une antenne patch (W et L) sur les performances fréquentielles de celle-ci, la section suivante présente une étude paramétrique.

2.4.4 Etude paramétrique

a Influence de la largeur W

On commence par faire varier la largeur W tout en fixant les autres dimensions (L, Ws, Ls, Wa, La, ha, dl et yo). La figure 2.9 représente le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne pour plusieurs valeurs de W (130mm, 150mm, 200.42mm).

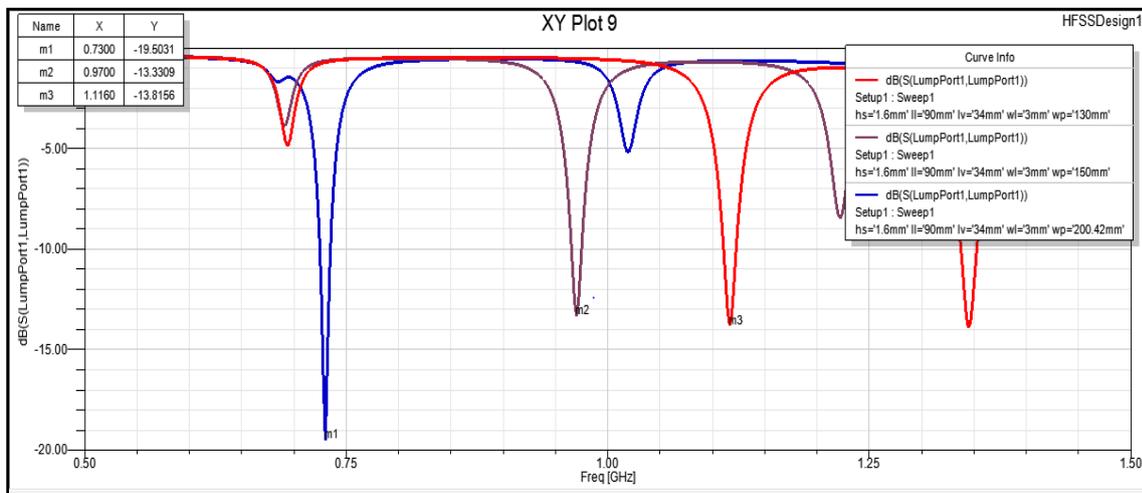


Figure 2.9 : Coefficient de réflexion pour plusieurs valeurs de W de l'antenne.

D'après la figure 2.9, on remarque que la largeur W agit principalement sur le fréquence de fonctionnement car pour un changement de W de 130 mm à 200 on a un décalage de 400 Mhz.

b Influence de la largeur L

Dans un second temps, on fait varier L tout en fixant les autres paramètres (W, Ws, Ls, Wa, La, ha, dl et yo).

La figure 2.10 représente le coefficient de réflexion à l'entrée de l'antenne pour plusieurs valeurs de L (96mm, 103mm, 105mm, 114mm).

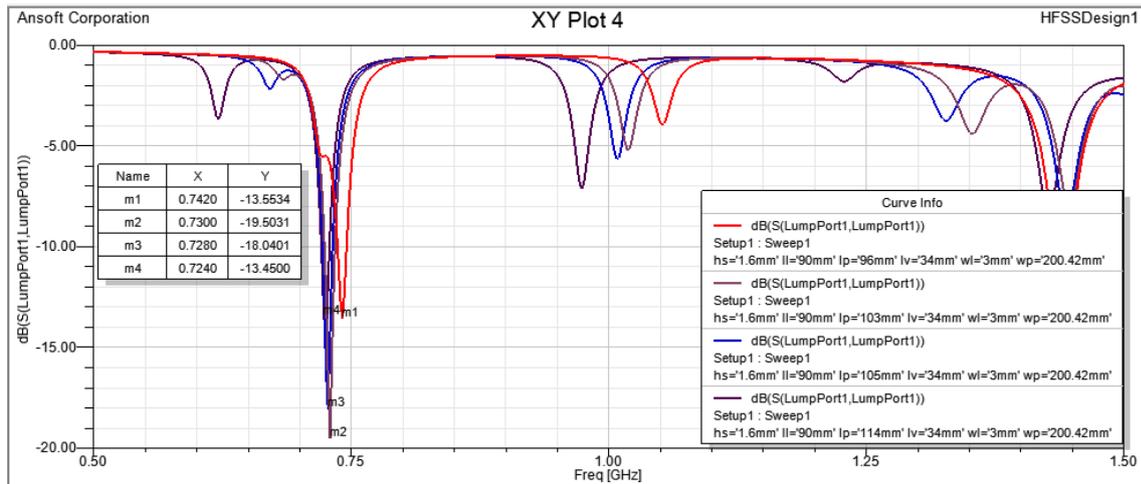


Figure 2.10 : Coefficient de réflexion pour plusieurs valeurs de L de l'antenne.

Il est à noter de la figure 2.10 que la longueur du patch joue essentiellement sur l'adaptation de l'antenne.

En conclusion, la largeur W influe principalement sur la fréquence de fonctionnement de l'antenne tandis que la longueur L influe la valeur de son adaptation.

2.5 Conclusion

Bien qu'elles présentent des géométries simples, les antennes patchs exigent une étude approfondie dont les différentes méthodes bénéficient des développements importants de conception et de simulation d'antennes. En suivant ces différentes étapes, on a réussi à concevoir une antenne patch fonctionnant dans la bande LTE 700. Cette antenne imprimée sur substrat FR4 ($\epsilon_r=4.4$ et $h=1.6\text{mm}$) présente une dimension de $40.4\text{ cm} \times 21\text{ cm}$. Cette dimension ne satisfait pas les spécifications de faible taille imposées dans le chapitre 1 ($5\text{cm} \times 5\text{cm}$). La simulation électromagnétique de cette antenne à l'aide de HFSS a confirmé son bon fonctionnement fréquentiel et en termes de rayonnement. Une étude paramétrique sur l'influence de la largeur et la longueur du patch conçu sur les performances a été réalisée.

Dans le chapitre suivant, une antenne LTE 700 présentant des dimensions beaucoup plus compactes que celles du patch seront conçues et simulées.

Chapitre 3 Conception et simulation d'une antenne

compacte LTE à 700 Mhz

3.1 Introduction

LTE, les recherches ont été poussées dans l'objectif d'intégrer une antenne dans le téléphone mobile. Le besoin d'antennes compactes voire très compactes est donc crucial. Dans ce contexte, nous avons mené différentes études dans la conception et simulation d'une antenne monopole imprimée compacte pour l'application LTE 700. La miniaturisation de cette antenne a été réalisée à l'aide de profils irréguliers de types méandres. Enfin une configuration MIMO de cette antenne a été testée.

3.2 Antennes monopoles imprimées

Récemment, les antennes monopoles ont fait l'objet de beaucoup de recherches. Elles ont été conçues sous différentes formes : rectangulaire, circulaire, elliptique, triangulaire. Elles présentent toutes et sans exception, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel en azimut, une polarisation linéaire et une large bande passante. Dans un premier temps, elles étaient conçues et étudiées en trois dimensions. L'élément rayonnant est connecté au potentiel positif, et surmonte un plan de masse perpendiculaire connecté au potentiel négatif. Réalisées de cette manière, ces antennes sont assez fragiles et la connexion au point d'alimentation est délicate, rendant son intégration dans des systèmes de communications peu aisée. On passe alors dans la catégorie des antennes imprimées sur substrat. Des exemples d'un tel passage 3D à 2D sont illustrés par la figure 3.1. En gardant les mêmes performances que l'antenne 3D, ce qui demande des travaux d'optimisation, l'antenne

imprimée devient compacte, légère, faible coût et beaucoup plus facile à manipuler. C'est sur ce type d'antenne que sera basée la suite de notre travail.

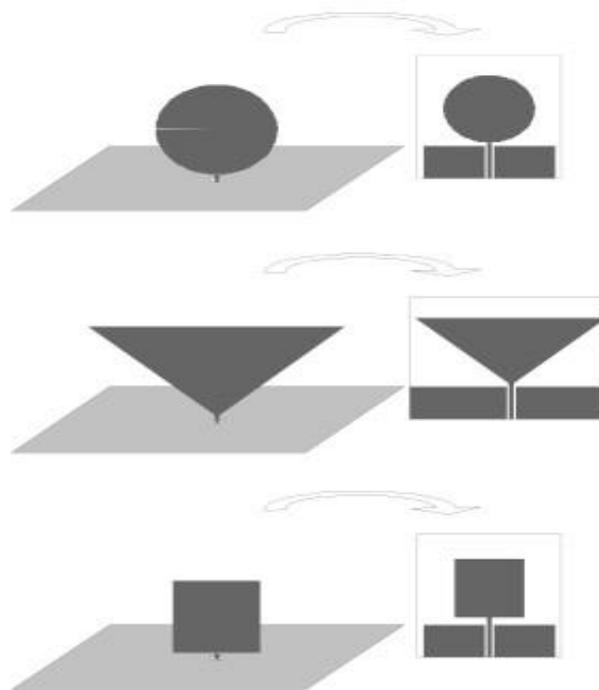


Figure 3.1 : Illustration montrant le passage d'une structure monopole 3D à son homologue 2D imprimée

Le passage d'un monopole en espace libre à un monopole imprimé sur substrat modifie légèrement le comportement de l'antenne. Il est principalement provoqué par les pertes dans le substrat qui a une permittivité diélectrique supérieure à celle de l'air. Ce passage d'un monopole à son homologue imprimé ne se résume souvent pas qu'à une simple homothétie. Il nécessite une prise en compte de plusieurs autres paramètres tel que les dimensions physiques de la ligne d'alimentation. Ce paramètre est problématique pour la conception d'antenne. De plus, les plans de masse de la ligne sont théoriquement infinis, et les dimensions de l'ordre de la longueur d'onde ne sont pas acceptées. Ces lignes de transmission sont donc tronquées en longueur et en largeur. Les lignes ne peuvent plus être considérées comme telles mais comme faisant partie intégrante de l'antenne et participant au rayonnement.

3.3 Partie conception et simulation

L'utilisation de méandres permet de miniaturiser significativement une antenne monopole imprimée (cf. Chapitre 1). Deux géométries d'antennes monopoles compactes LTE 700 à base de méandres ont été conçues et simulées dans cette partie. Les deux solutions satisfont les spécifications en termes de taille imposées dans le chapitre 1 (taille < 5 cm x 5cm).

3.3.1 Géométrie 1

La géométrie choisie (illustrée par la figure 3.2) est celle publiée par [24]. Initialement, cette antenne imprimée sur FR4 ($\epsilon_r=4.4$ et $h=0.8\text{mm}$) a été dimensionnée pour fonctionner à 800 MHz[24]. Après avoir introduit cette antenne sur HFSS, nous l'avons adaptée à nos spécifications (i.e. bande LTE 700) en jouant sur ses dimensions. Les nouvelles dimensions ainsi obtenues sont : $L = 43\text{mm}$, $W = 23,5\text{ mm}$, $l_g = 16,2\text{ mm}$, $W_1 = 17,5\text{ mm}$, $W_2 = 2.65\text{mm}$, $W_3 = W_4 = W_5 = 1\text{mm}$, $L_1 = 12.27\text{mm}$, et $L_2 = 9.93\text{mm}$. La dimension maximale de l'antenne est donc $4.3\text{ cm} \times 2.3\text{ cm}$.

Le modèle de simulation HFSS de cette antenne est représenté sur la figure 3.3. Les dimensions de la boîte d'air sont $W_r = 24\text{mm}$, $L_r=50\text{mm}$, $h_r=40\text{mm}$

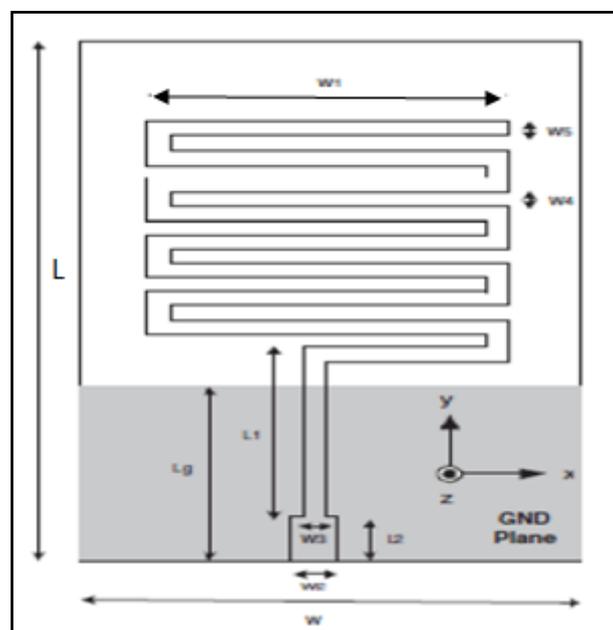


Figure 3.2 : Géométrie 1 à base de méandre [24]

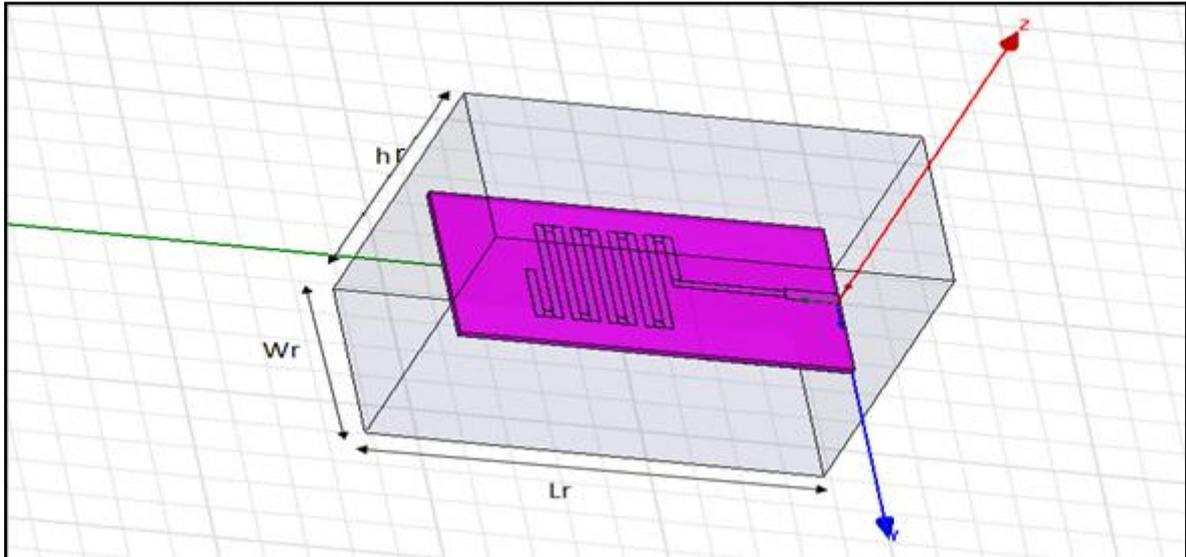


Figure 3.3 : Modalisation sous HFSS de la géométrie 1

Le module du coefficient de réflexion à l'antenne de cette première géométrie est représenté par la figure 3.4. Sur cette figure on remarque une adaptation de coefficient de réflexion ($|S_{11}| = -27$ dB) et avec une bande passante de 21.5%. Meilleures que celles obtenues par l'antenne patch (cf. chapitre 2).

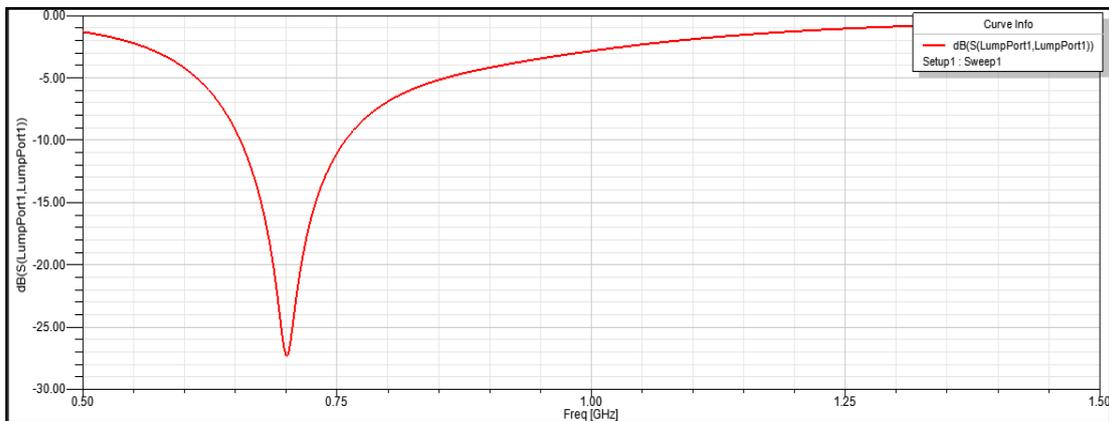


Figure 3.4 : Coefficient de réflexion simulé sous HFSS

La figure 3.5 représente le diagramme de rayonnement 3D d'une antenne MLA sur l'application LTE 700.

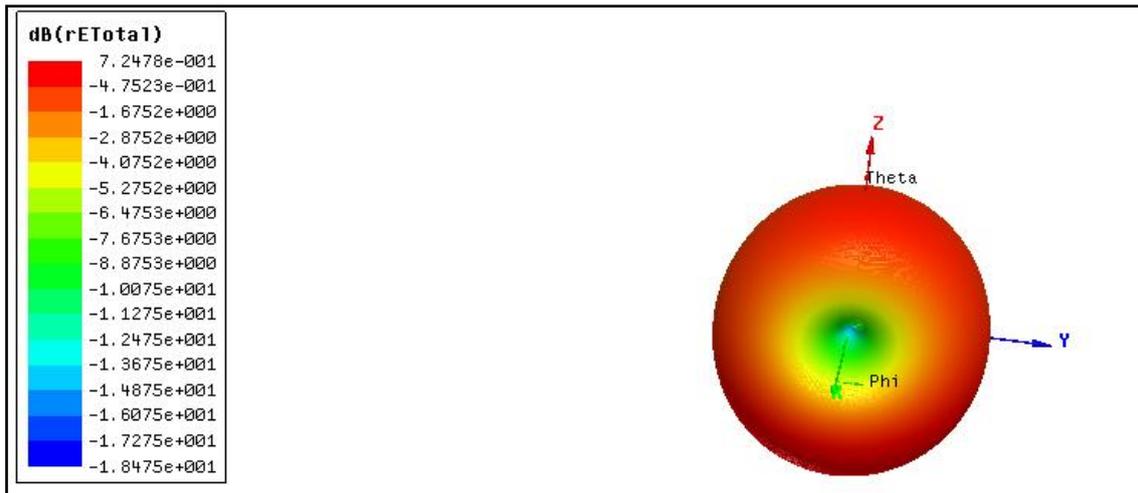


Figure 3.5: Diagramme de rayonnement 3D de la géométrie 1

3.3.2 Géométrie 2

Pour cette partie, la géométrie de départ (illustrée par la figure 3.6) est celle publiée dans [26]. Cette antenne imprimée sur un substrat FR4 ($\epsilon_r = 4.4$ et $h = 0.8$ mm) fonctionne à 700 Mhz. L'introduction sur HFSS de cette antenne nous a permis de vérifier cette fréquence comme indiqué sur la figure 3.7.

Cependant, sa taille globale (antenne + plan de masse) est relativement importante (10cm x 4cm). Afin de satisfaire les spécifications d'encombrement imposées (5 cm x 5cm), nous avons réduit la taille du plan de masse (représentant la plus grande dimension de l'antenne) et optimisé ensuite l'antenne afin de recaler sa fréquence à 700 Mhz. La nouvelle géométrie optimisée en taille est représentée sur la figure 3.8. Les dimensions ainsi obtenues sont résumé sur le tableau 3.1. Tel que la dimension maximale est de 5cm x 3cm.

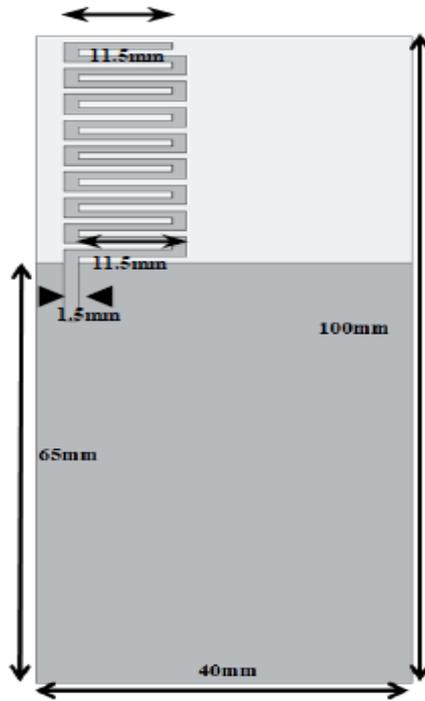


Figure 3.6: Antenne monopole méandre publiée [26]

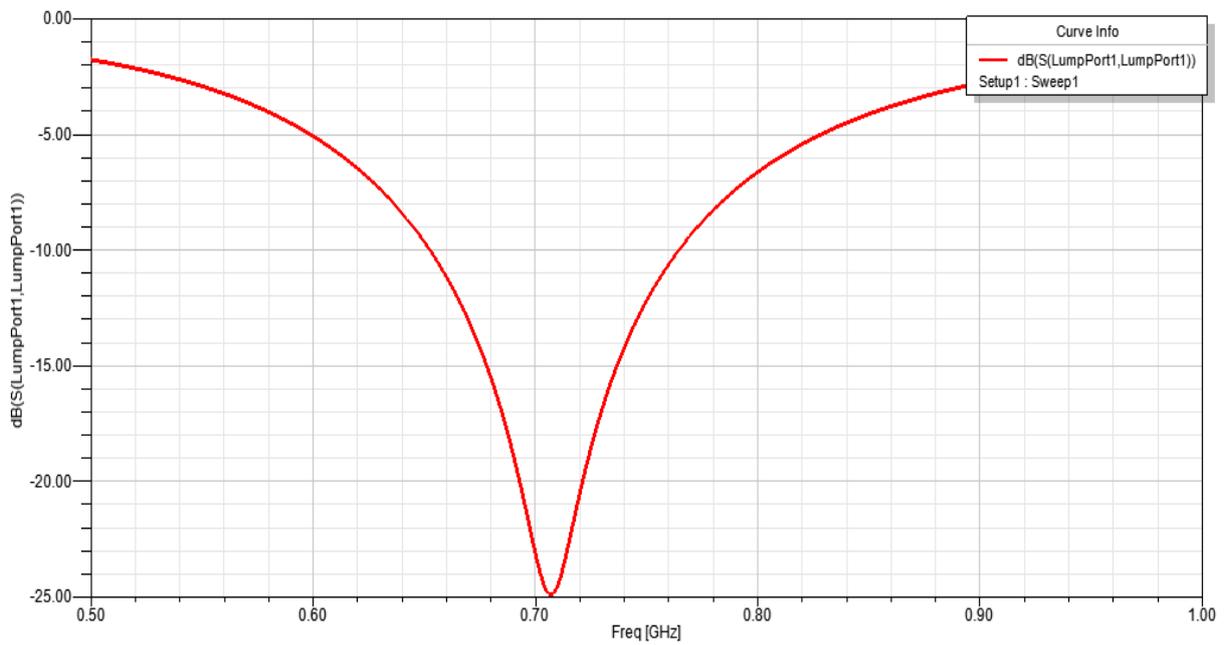


Figure 3.7 : Coefficient de réflexion simulée de l'antenne de la figure 3.6

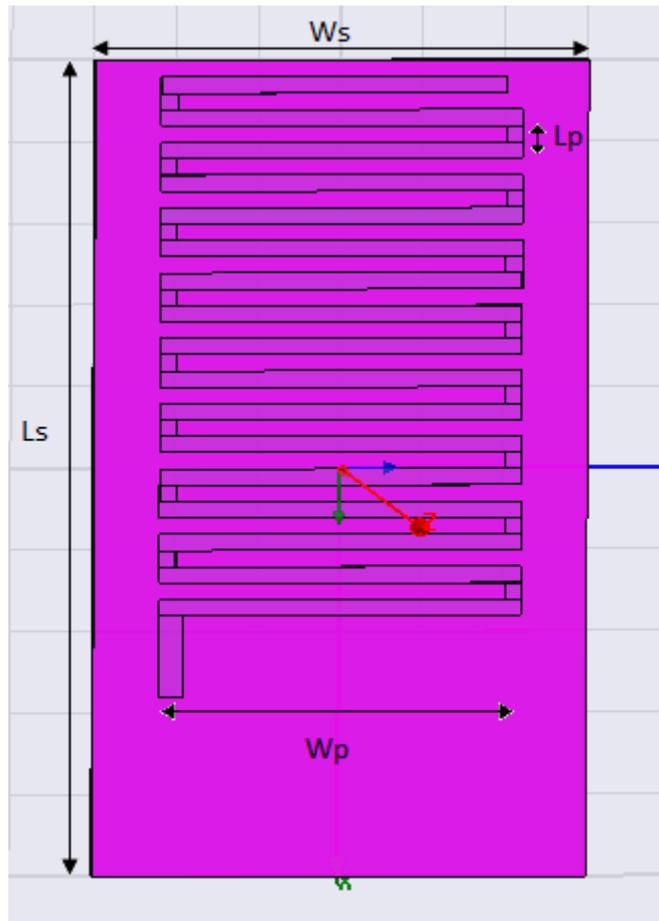


Figure 3.8: Dimensions de la géométrie 2.

Dimensions	W_p (mm)	L_p (mm)	W_s (mm)	L_s (mm)
	22	1	30	50

Tableau 3.1 : Dimensions de la géométrie 2.

Un modèle de simulation 3D sous HFSS est donné par la figure 3.9. Les dimensions de la boîte d'air sont les suivantes : $W_r = 140\text{mm}$, $L_r = 60\text{ mm}$ et $h_r = 60\text{mm}$.

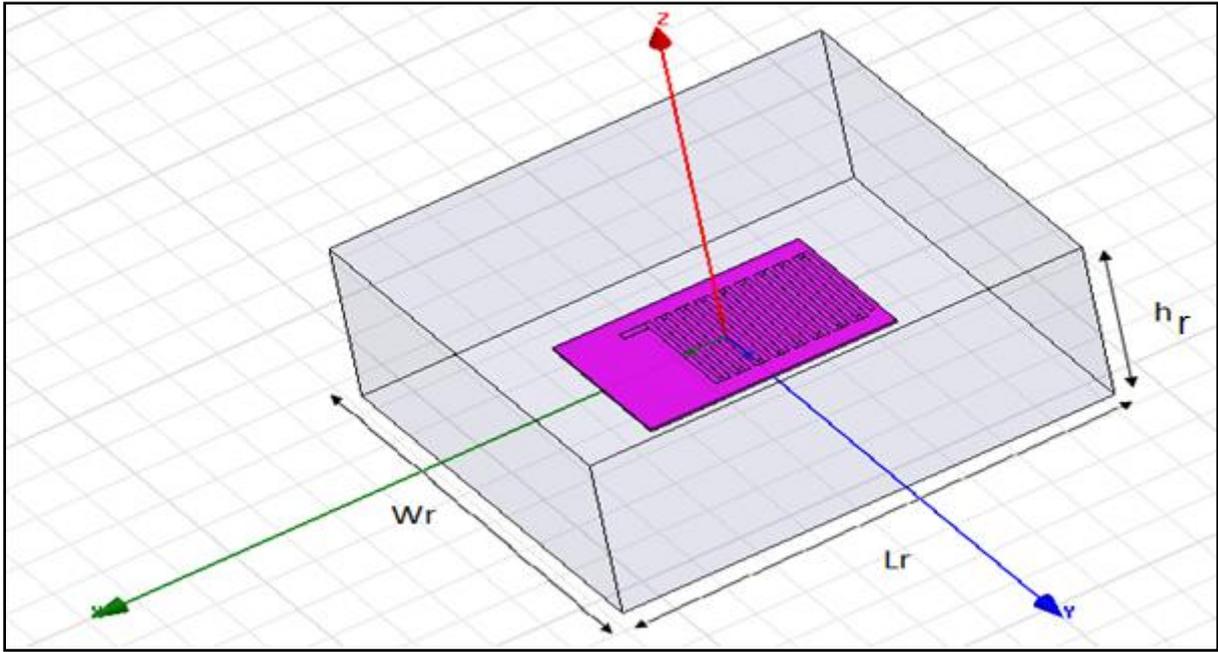


Figure 3.9 : Modalisation sous HFSS de la géométrie 2

Les résultats obtenus sont illustré par le schéma de la figure 3.10 .

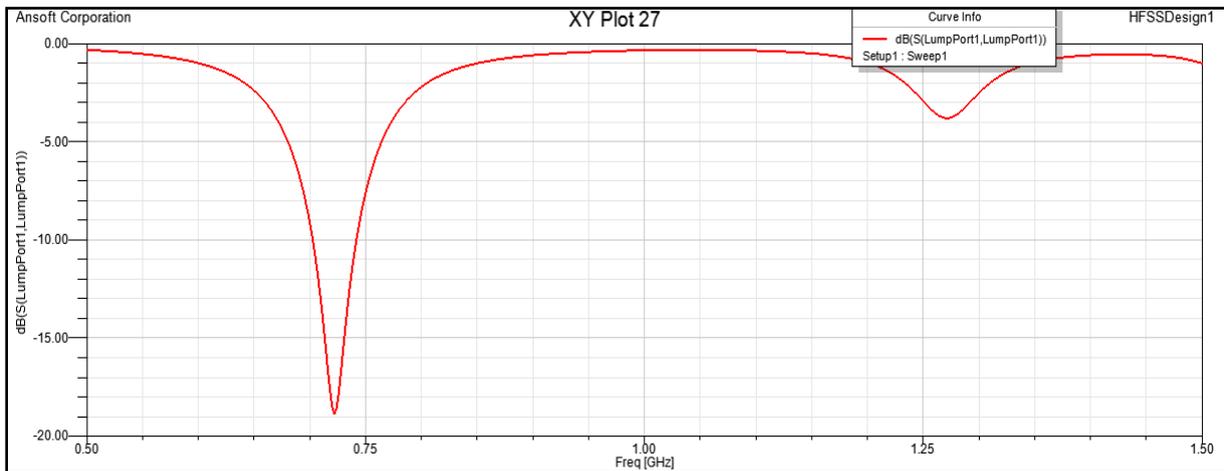


Figure 3.10 : Coefficient de réflexion simulée de la géométrie 2.

Nous remarquons sur la figure 3.10 que l'antenne est bien adaptée sur la fréquence de résonance LTE 700. Avec un coefficient de réflexion de : $|S_{11}| = -28\text{dB}$

Après la figure de coefficient de réflexion nous représentons le gain de l'antenne en comme il était indiqué par la figure 3.11

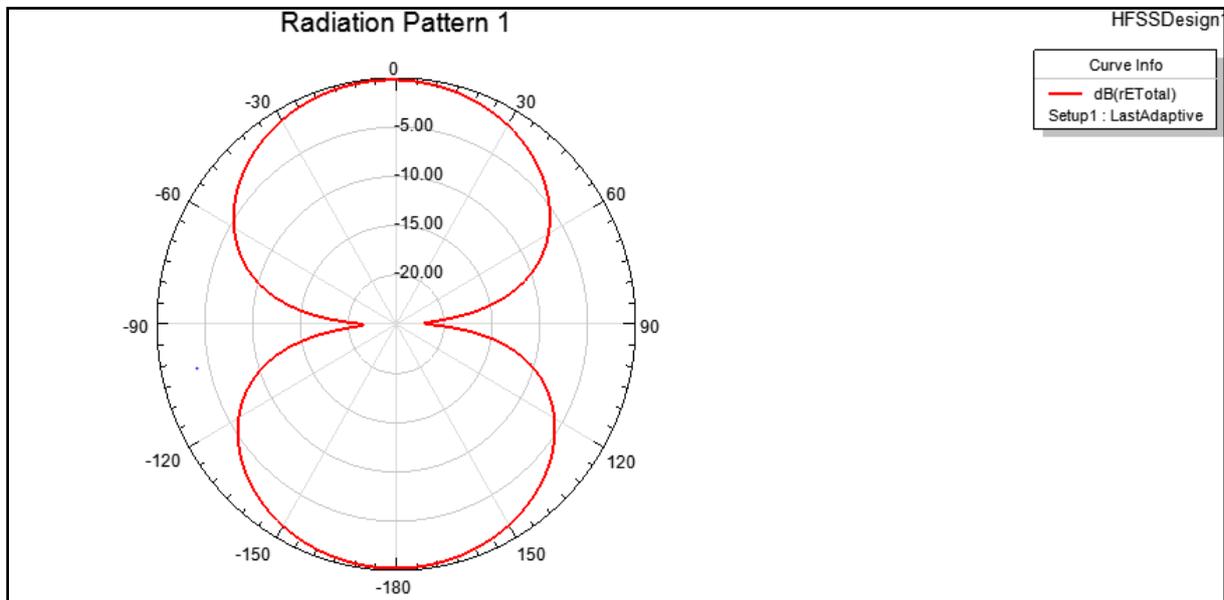


Figure 3.11 : Diagramme de rayonnement de la géométrie 2 à 700 Mhz

Pour la suite, la géométrie 2 sera retenue pour la simplicité de son excitation.

3.4 Simulations complémentaires de la géométrie 2

3.4.1 Étude paramétrique

Il s'agit de voir l'influence de W_p sur les performances de la géométrie 2. Ainsi, nous avons fait varier W_p tout en fixant les autres dimensions. La figure 3.12 représente le coefficient de réflexion de l'antenne simulée pour différentes valeurs de W_p .

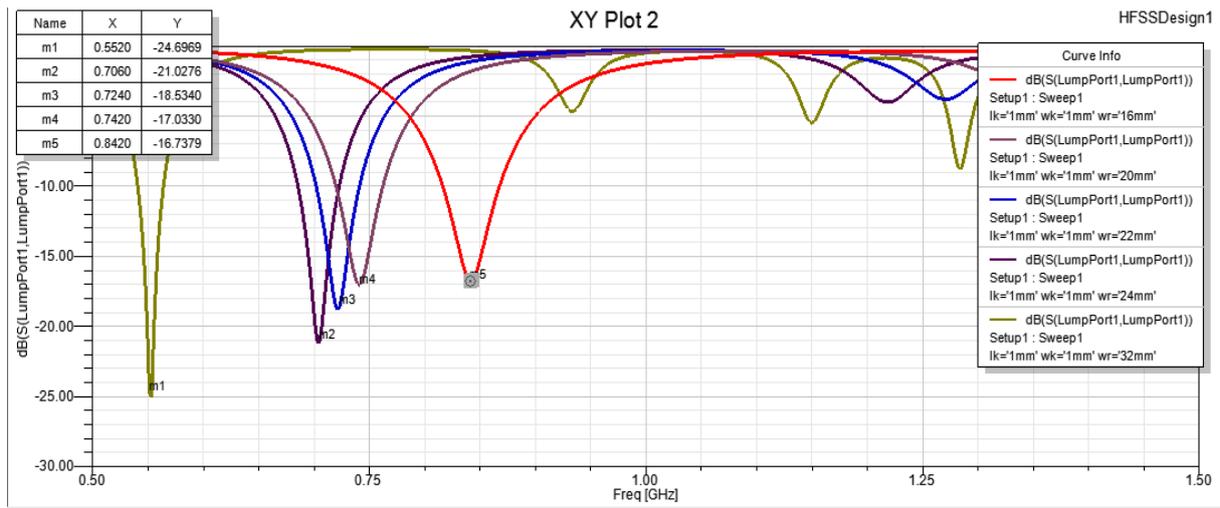


Figure 3.12 : Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la largeur W_p pour la géométrie 2

Nous remarquons sur la figure 3.12 que la largeur W_p agit principalement sur la fréquence de résonance et l'adaptation de l'antenne. Plus la largeur W_p est petite, plus la fréquence de résonance n'est élevée et l'adaptation est médiocre.

Pour la suite, nous présentons la simulation et l'optimisation d'une configuration MIMO à base de l'antenne de la géométrie 2.

3.4.2 Simulation d'une configuration MIMO

L'antenne de la géométrie 2 est composée d'un monopôle serpenté fonctionnant dans la bande LTE 700 MHz. Afin de construire une configuration MIMO, deux antennes de même type sont alors étroitement positionnées sur le même plan de masse. Le tout est imprimé sur le substrat FR4 ($\epsilon_r = 4.4$, $h=0.8\text{mm}$). La figure 3.13 représenté le système MIMO à base de la géométrie 2 ainsi formé.

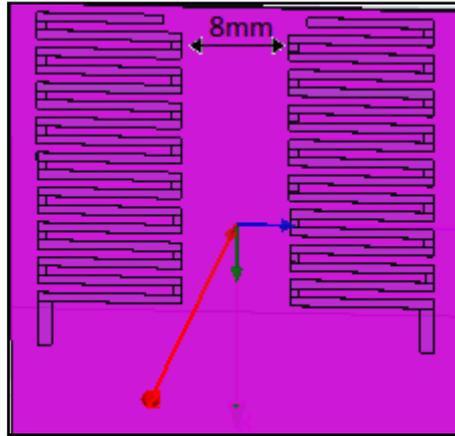


Figure 3.13: Configuration MIMO à base de la géométrie 2

Les résultats de simulation obtenus pour l'antenne MIMO compacte LTE à 700 Mhz, sont montrés sur les la figure 3.14.

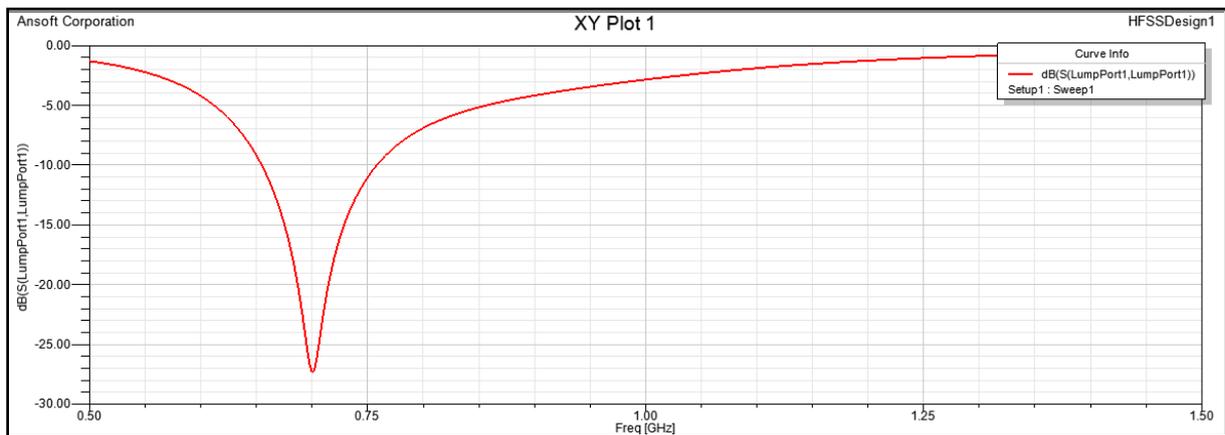


Figure 3.14 : Coefficient de réflexion de l'antenne MIMO compacte pour l'application LTE 700

Il à noter que l'antenne conçue est bien adaptée à 700 Mhz ($|S_{11}| = -28$ dB).

La figure 3.15 montre l'allure de coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{21}|$ de la configuration MIMO de la figure 3.13.



Figure 3.15 : Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et coefficient de transmission $|S_{21}|$ d'une antenne MIMO compacte pour l'application LTE 700

Nous observons d'après cette figure que l'isolation entre les deux antennes (correspondante au $|S_{12}|$) est insuffisante. La technique de ligne de miniaturisation est utilisée dans le but d'améliorer ce paramètre [26].

La position de la ligne de neutralisation a été modifiée de 2 à 10 mm (Figure 3.16). La valeur optimale trouvée est de 10 mm. Pour cette valeur, la largeur de la ligne de neutralisation a été variée de 0,5 à 2 mm. La valeur optimisée correspond à 1 mm.

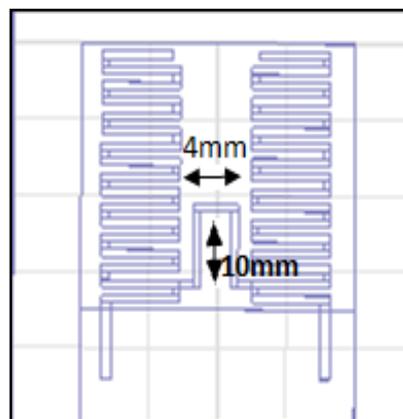


Figure 3.16: Configuration MIMO à base de la géométrie 2 avec la ligne de neutralisation

La figure 3.17 montre l'allure de coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et le coefficient de transmission $|S_{21}|$ de la configuration de la figure 3.16.



Figure 3.17 : Coefficient de réflexion $|S_{11}|$ et Coefficient de transmission $|S_{21}|$ d'une antenne MIMO à base de la géométrie 2 avec la ligne de neutralisation

D'après la figure 3.17, la ligne de neutralisation a permis d'améliorer le coefficient de transmission $|S_{21}|$.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie la conception et la simulation d'antennes monopoles imprimées compactes pour l'application LTE à 700 MHz. Afin de satisfaire les spécifications d'encombrement imposées (5 cm x 5cm), on a identifié deux solutions intéressantes : la première noté géométrie 1 (4.3 cm x2.3 cm) et la deuxième noté géométrie 2 (5cm x 3 cm). Une configuration MIMO à base de deux antennes compactes de la géométrie 2 à été simulée. Afin d'optimiser d'avantage cette configuration MIMO. La technique ligne de neutralisation a été utilisée et elle semble donner des meilleurs résultats.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'études se sont portés sur la conception et la simulation d'antennes pour la bande LTE 700. Dans un premier temps une antenne patch rectangulaire a été dimensionnée et simulée. Cette antenne souffrait d'une bande passante étroite et surtout d'un encombrement important. Ensuite ; deux antennes imprimées de type monopole miniaturisées à base de profils méandres ont été proposées et validées par simulation électromagnétique. La taille de ces antennes ne dépassant pas les 5 cm x 5cm. Enfin, une de ces deux solutions compactes a été testée dans une configuration MIMO.

La première partie, qui a fait l'objet du premier chapitre, a permis de décrire le principe de la norme LTE, leur bandes de fréquences ainsi que l'architecture de cette norme. Par la suite des notions de base sur les antennes ainsi qu'un état de l'art sur les antennes compactes ont été présentés.

Dans le second chapitre nous avons vu un aperçu sur les antennes imprimées de type patch. Une antenne patch fonctionnant dans la bande 700 Mhz a été conçue et simulée à l'aide d'un logiciel de simulation électromagnétique.

Le troisième chapitre présente la conception et simulation d'antennes compactes pour la bande LTE 700. Dans une première partie, les antennes imprimées de type monopole ont été brièvement présentées pour leur avantage d'être plus facile à miniaturiser en utilisant des profils irréguliers. Ensuite, la conception et la simulation électromagnétique de deux géométries d'antennes imprimées monopoles compactes à base de méandres ont été détaillées. Enfin, ce chapitre se termine par la simulation d'une configuration MIMO à base d'une des géométries précédentes.

A partir de ces travaux de projet de fin d'études, plusieurs perspectives peuvent être avancées sur ces antennes de la norme LTE 700. Tout d'abord, il paraît de continuer les recherches sur l'optimisation de la configuration MIMO des ces antennes en utilisant 2 ou 4 antennes. Ensuite, le passage à des solutions multi-bandes permettant la couverture de plusieurs standards est essentiel afin de réduire d'avantage l'encombrement réservé à la partie antennaire dans les terminaux mobiles.

Logiciel HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure, pour analyser ce comportement en détails, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue une modélisation électromagnétique par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Un projet HFSS est un dossier qui contient un (ou plusieurs) modèle(s) appelé(s) design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post-traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'environnement HFSS. Dans ce chapitre on s'intéresse à différents aspects de ce logiciel utilisé dans notre projet.

Types de solution dans HFSS

La première étape de faire une simulation est de déterminer le mode de solution qu'on souhaite réaliser. Les types d'accès et les résultats obtenus dépendent du type de solution sélectionnée. HFSS met à notre disposition trois différents types de solution, chacun optimisé pour un problème spécifique:

- **Driven Modal:** On utilise ce type quand on veut HFSS de calculer les paramètres **S modal-based** d'une structure passive en haute fréquence comme la ligne coplanaire, les guides d'ondes et les cavités résonantes. Dans ce cas les paramètres S seront calculer en fonction de les ondes incident et réfléchie.

- **Driven Terminal:** On utilise ce type quand on veut HFSS de calculer les paramètres **S modal-based** de lignes de transmission à plusieurs conducteurs. Dans ce cas les paramètres S seront calculés en fonction de la tension et courant aux accès.

- **Eigenmode:** On utilise ce type pour calculer résonances d'une structure. Le logiciel trouvera la fréquence de résonance de la structure et les champs à ces fréquences.

Création une structure

Pour créer une structure en 3D il suffit de la dessiner avec les outils mis à disposition par le logiciel. Ici, nous ne décrivons que les parties les plus difficiles à mise en œuvre. L'utilisation des variables du projet HFSS nous permet de définir les variables pour les associer à certains paramètres de la structure, comme les dimensions, les propriétés des matériaux,.... L'utilisation des variables pour associer les dimensions simplifie les éventuels changements de ce dernier. Par exemple dans notre cas pour changer les excitations et dimensions du plot il suffit de changer la valeur de la variable correspondante. Pour déterminer une variable, il faut sélectionner **Project > Project Variables** et entrer son nom, sa valeur et son unité. Une fois qu'une variable a été définie on peut utiliser son nom permet aussi d'utiliser des fonctions mathématiques de variables définies. Les variable du projet ont un préfix \$ avant leurs noms.

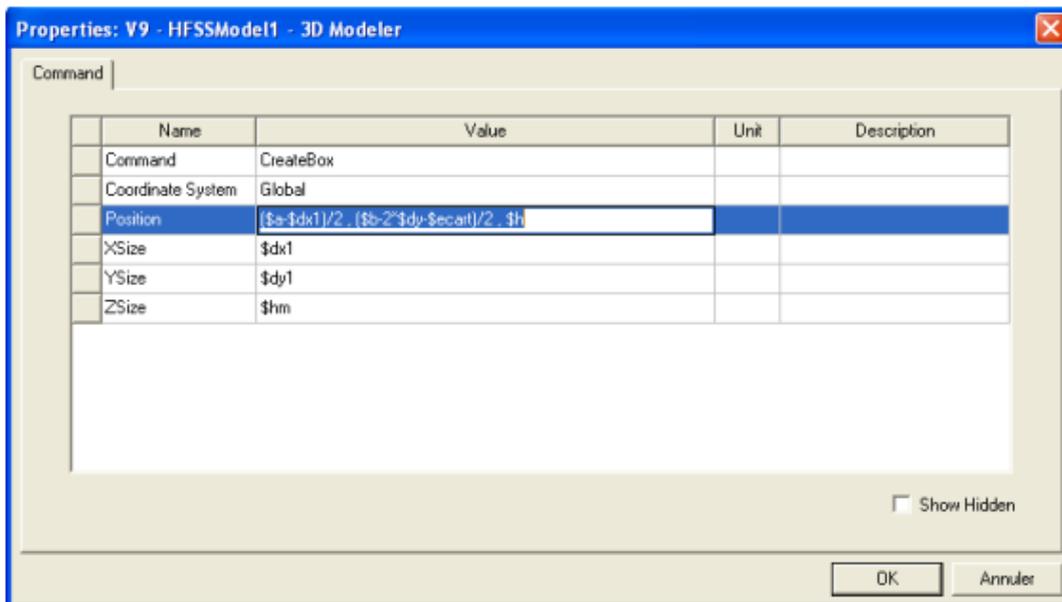


Figure A.1 : Utilisation des variables dans HFSS

Soustraction des objets

Il arrive souvent que l'on veuille éliminer quelques parties d'un objet.

- On dessine l'objet principal ainsi que les objets qu'on souhaite soustraire de celui-ci
- On sélectionne l'objet principal
- En appuyant sur le bouton CTRL on sélectionne les objets que l'on veut soustraire
- On clique sur **Subtract**
- Objets listés dans la partie "**Tool Parts**" sont à soustraire des objets listés sous "**Blank Parts**"
- Si l'on veut que HFSS garde une copie des objets soustraits on coche l'option **Clone tool objects before subtract**
- On appuie sur **OK**

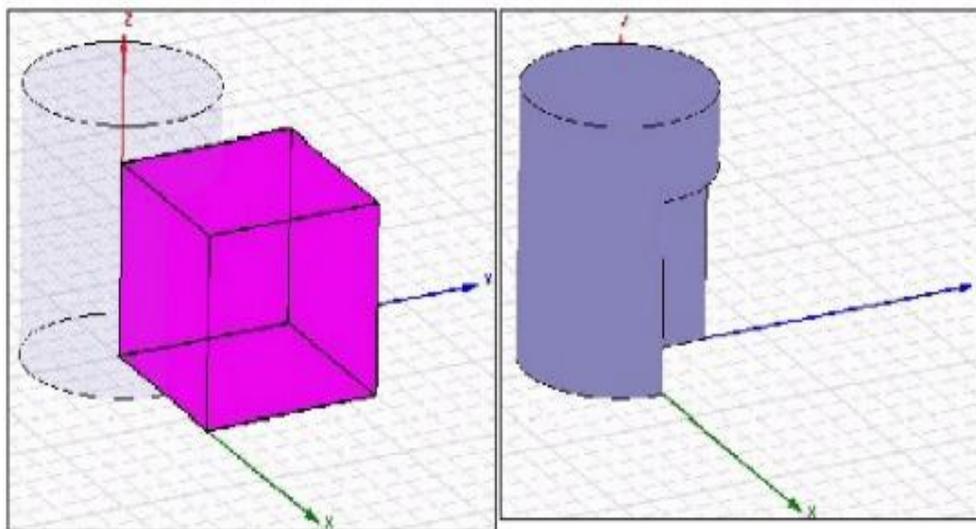


Figure A.2 : Modélisation sous HFSS

Excitation d'une structure

Après avoir dessinée une structure, pour que le logiciel soit capable de faire la simulation, il faut exciter la structure.

Standards types d'excitation utilisés par HFSS

Il existe différents types d'excitation, listés dans le tableau 1. Le plus souvent, on utilise des Wave Ports mais dans notre cas on ne peut pas utiliser ce type d'accès parce que les surfaces qui sont reliées aux excitations se trouvent dans la structure. Donc on utilise d'autre type d'accès (les accès localisés ou "Lumped Port" dans HFSS) Ces accès sont automatiquement adaptés aux générateurs internes et les charges de HFSS (50Ω)

Types d'excitations	Commentaires
Wave Port	Représente la surface à travers laquelle un signal entre ou sort d'une structure.
Lumped Port	Représente la surface interne à travers laquelle un signal entre ou sort d'une structure
Incident Wave	Représente une onde propageant impactant sur la structure.
Voltage	Représente un champ électrique constant à travers des points d'excitations.
Current	Représente un courant électrique constant à travers des points d'excitations.
Magnetic Bias	Utilisé pour définir un champ interne qui polarise un objet 3D en ferrite.

Tableau 1: Types d'excitation disponibles sur HFSS

Création une excitation de type Lumped Port

Pour placer des Lumped Port sur HFFS il faut :

- Créer une surface en contact avec notre ligne coplanaire qui va fournir la puissance à la structure et lui donner le nom « source ».
- Sélectionner dans le menu **HFFS > Excitations >Assign > Lumped port**

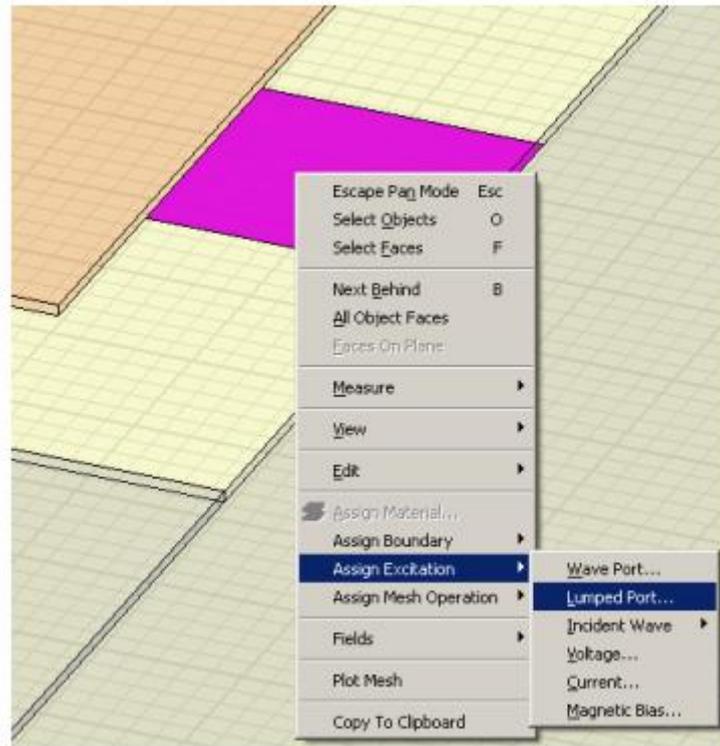


Figure A.3 : Créer un Lumped Port

- Lors de la création de l'excitation, on doit donner la direction du champ qui va de la référence vers le conducteur.

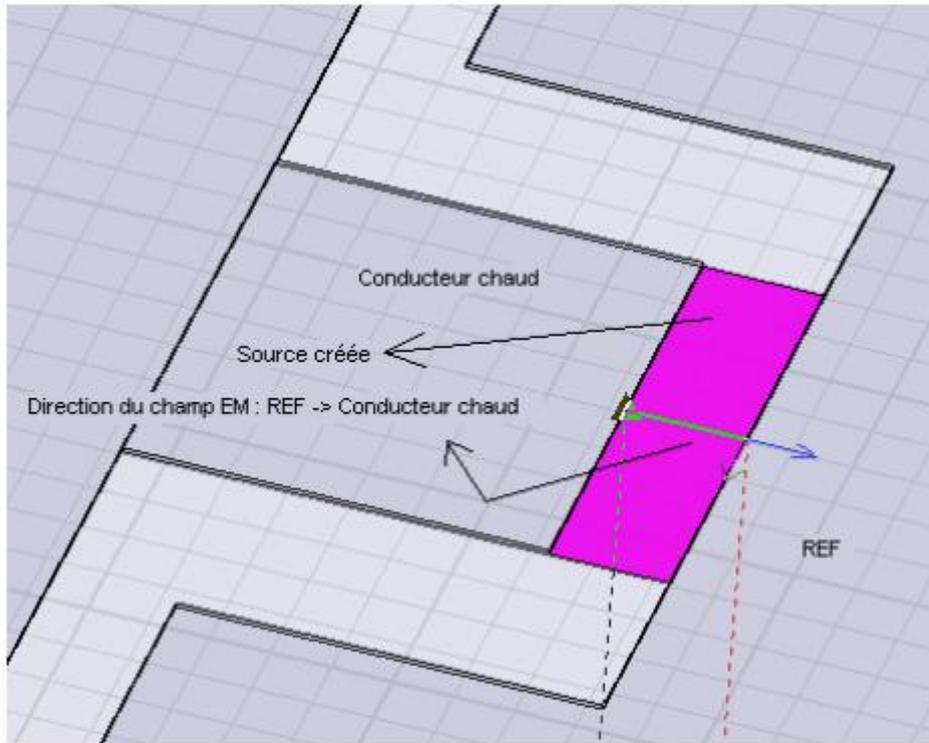


Figure A.4 : Créer un Lumped Port

- l'excitation étant définie, un numéro de port lui est attribué. On pourra s'en servir par la suite dans la détermination des paramètres S.

Génération des rapports

Une fois que la simulation est finie, on utilise les rapports pour consulter les résultats obtenus. Pour créer un rapport, on sélectionne **HFSS > Results > Create Report** et choisit le type du rapport (paramètres S ou les champs) et son format d'affichage (rectangulaire, sur l'abaque de Smith, polaire,...). La fenêtre de création des Traces s'ouvre. On choisit la quantité que l'on veut tracer et on appuie sur **OK**.

On peut aussi définir les relations mathématiques à partir des résultats obtenus: dans la fenêtre **Traces** on appuie sur **Output variables...** et on entre l'expression et le nom de variable que l'on veut définir.

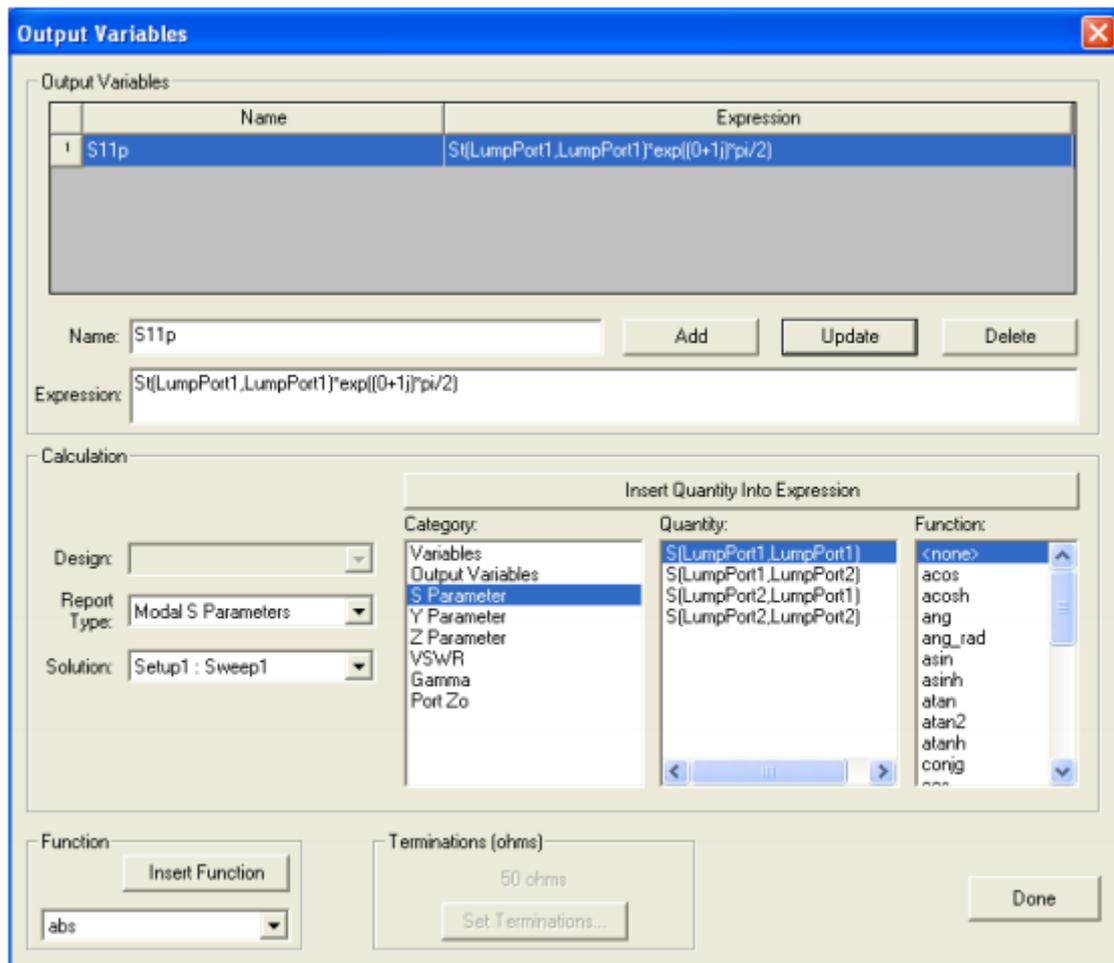


Figure A.4 : Définir un Output Variable

Bibliographie

- [1] « LTE et les réseaux 4G », Yannick Bouguen Éric Hardouin François-Xavier Wolff, Groupe Eyrolles, 2012,
- [2] <http://www.gsacom.com>
- [3] http://www.arcep.fr/uploads/tx_gsavis/11-1169.pdf
- [4] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:3GPP_Long_Term_Evolution_Country_Map.svg
- [5] « Antennes », Alexandre Boyer, support de cours, disponible sur : http://lesia.insa-toulouse.fr/a_boyer
- [6] Abdelhadi amine et haroun imane : « conception et réalisation d'une antenne multi bande pour le système GNSS », Mémoire de PFE, université de Blida, 2012.
- [7] "Antenna theory analysis and design," C. A. Balanis, 2eme edition John Wiley and Sons, 1997.
- [8] <http://www.google.com/patents/WO2005117208A1?cl=fr>
- [9] Gyubok Park, Minchan Kim, Taesik Yang, Joonho 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. APSURSI '09.
- [10] Kin-LuWong, Chao-AnLyu, andLiang-CheChou, «small-size multiband planar antenna for lte700/2300/2500 operation in the tablet computer», 2011, Wiley Periodicals Inc.
- [11] Lila Mouffok, Anne Claire Lepage, Julien Sarrazin, and Xavier Begaud, «Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for MIMO LTE Applications», International Journal of Antennas and Propagation Volume 2012, Hindawi Publishing Corporation.
- [12] 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.

- [13] Yonghun Cheon, Jungyub Lee, and Joong hee Lee, "Quad-Band Monopole Antenna Including LTE 700 MHz With Magneto-Dielectric Material", IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, vol. 11, 2012
- [14] Jae-Young Chung, Taesik Yang, Juhjung Lee, and Joongho Jeong « Low Correlation MIMO Antenna for LTE 700MHz Band», 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI).
- [15] Mohammad S. Sharawi, Sheikh S. Iqbal, and Yanal S. Faouri «An 800 MHz 2x1 Compact MIMO Antenna System for LTE Handsets», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 8, August 2011
- [16] 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
- [17] Nobuyasu Takemura and Minoru Hasegawa, «Inverted-L Antenna with Split-Ring Resonator Structures», IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010
- [18] D.-G. Yang, D. -O. Kim, and C.-Y. Kim, «Design of Internal Multi-band Mobile Antenna for LTE700/WCDMA/UMTS/WiMAX/WLAN Operation», PIERS Proceedings, Kuala Lumpur, MALAYSIA, March 27-30, 2012
- [19] Rashid Ahmad Bhatti, Soongyu Yi, and Seong-Ook Park, «Compact Antenna Array With Port Decoupling for LTE-Standardized Mobile Phones», IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, vol. 8,2009
- [20] 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.
- [21] Nassrin Ibrahim Mohamed, Tharek Abd. Rahman, Chee Yen Leow «Issues and Challenges of LTE Antenna Designs for USB Dongle Device» 2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)
- [22] Jui-Han Lu, and Zi-Wen Lin «Planar Compact LTE/WWAN Monopole Antenna for Tablet Computer Application», IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.12.
- [23] <http://www.awrcorp.com/products/optional-products/tx-line-transmission-line-calculator>

[24] Mahesh C. Bhad and Veeresh G. Kasabegoudar «Slot Loaded Electrically Small Rectangular patch Antenna For Mimo Applications » , International Association of Engineering and Technology (IAET), 2012.

[25] <http://www.emtalk.com/mpacalc.php>

[26] Ibra DIOUM, Mark CLEMENTE, Aliou DIALLO, Cyril LUXEY, Jean Pierre ROSSI, Sidi Mohamed FARSSI, « Meandered Monopoles for 700 MHz LTE Handsets and Improved MIMO Channel Capacity Performance», RADIOENGINEERING, Vol. 20, No. 4, December 2011.