

École polytechnique de Louvain

Optimisation des antennes-relais en vue de réduire l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques dans les réseaux cellulaires

Auteur: **Gautier WATERLOT**
Promoteurs: **Christophe CRAEYE, Claude OESTGES**
Lecteurs: **Husnain ALI KAYANI, Donia OUESLATI**
Année académique 2019-2020
Master [120] en ingénieur civil en électricité

Avant-propos

Le travail réalisé pour l'obtention du diplôme de Master en ingénieur civil en électricité se porte sur la création et l'optimisation d'une antenne double bande. Le travail est divisé en trois étapes. La première étape est de concevoir une antenne double bande à l'aide du logiciel CST. La deuxième étape est d'ajouter à la simulation un radiateur parasite dont la charge des parasites peut être modifiée grâce à leur mise sous tension. La troisième étape est de construire l'antenne et de mesurer son diagramme de rayonnement sous différentes conditions en chambre anéchoïque.

Ce mémoire a été écrit durant le confinement résultant de l'épidémie de COVID-19, des conditions sanitaires inquiétantes. Durant cette période le laboratoire n'était plus accessible, je n'ai donc pas eu accès au logiciel de simulation CST et aux infrastructures de L'UCLOUVAIN depuis le 13 mars 2020. Suite à ces interdictions d'accès, l'étude faite durant ce mémoire se portera sur les aspects théoriques de la création et l'optimisation d'une antenne double bande. L'antenne est conçue et simulée à l'aide du logiciel CST. L'étude sur l'utilisation des parasites dans le champ de vision de l'antenne est simulée et interprétée grâce au logiciel Matlab. Enfin, une mise en situation d'une antenne sur la place Eugène Flagey à Bruxelles est simulée grâce à un logiciel de tracé de rayons.

Je tiens à remercier mes promoteurs, Messieurs Christophe Craeye et Claude Oestges, qui m'ont guidé et conseillé durant ce mémoire de Master. Je remercie également Husnain Ali Kayani pour son suivi durant cette année et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier les différents assistants, Simon Demey et Farzad Jabbarigargari qui m'ont permis d'obtenir les résultats de mes simulations. De plus, la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans la force et la patience que ma famille, mes amis et ma copine m'ont donné. Leurs nombreux conseils m'ont aidé à surmonter la plupart des difficultés rencontrées lors de la réalisation de ce mémoire. Finalement, je suis reconnaissant à Patrice Waterlot et Arnaud Bloquiau pour les corrections et les commentaires qu'ils ont apportés à ce document.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une recherche d'optimisation des antennes-relais en vue de réduire l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques dans les réseaux cellulaires. La recherche d'optimisation peut être divisée en deux objectifs principaux.

Le premier objectif revient à concevoir une antenne double bande qui émet sur les bandes de fréquence allouées au réseau cellulaire 4G/LTE et potentiellement 5G. Il commence par le dimensionnement des différentes parties qui composent l'antenne. Ensuite, il présente les simulations réalisées par le logiciel CST lors de l'optimisation de l'antenne ainsi que les résultats obtenus. Enfin, il confirme le bon fonctionnement de l'antenne et présente les étapes qu'il reste à mettre en place jusqu'au test de l'antenne dans une chambre anéchoïque.

Le second objectif est l'adaptation du diagramme de rayonnement de l'antenne en fonction du milieu dans lequel elle se trouve. Tout d'abord, une reconfiguration du diagramme de rayonnement de l'antenne est présentée grâce à la simulation de différents modèles de radiateur auxiliaire placés dans le champ de vision de l'antenne. Cette section permet de mettre en évidence une relation entre le diagramme de rayonnement et les charges des dipôles parasites qui composent le radiateur auxiliaire. Enfin, une mise en situation d'une antenne sur la place Eugène Flagey à Bruxelles est étudiée. Cette situation va permettre d'étudier la résilience de l'antenne face à un dépointage du champ de vision pour lequel elle a été optimisée. Différents dépointages vont être appliqués à l'antenne-relais. Les résultats présentent que l'antenne optimisée est résiliente pour un dépointage de 15 degrés. Le mémoire s'achève sur le dispositif utilisé qui permet de faire varier électroniquement les charges des dipôles qui composent le radiateur auxiliaire. Il présente le circuit utilisé ainsi que les éléments qui prennent part au radiateur auxiliaire. Enfin, il va introduire les mesures prises avec leur méthode de post-traitement.

Pour conclure, l'étude réalisée sur l'optimisation des antennes-relais en vue de réduire l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques dans les réseaux cellulaires est possible grâce à l'utilisation de la technique des radiateurs auxiliaires. Ils permettent de créer une plus grande homogénéité de l'exposition au réseau cellulaire sans modifier significativement la qualité de service de communication.

Keywords

Antenne double bande, radiateur auxiliaire, diagramme de rayonnement, élément parasite, dépointage, champ électrique, antenne-relais, réseau cellulaire.

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Vue d'ensemble et défis | 5 |
| 1.1 | Situation actuelle et réexamen | 5 |
| 1.2 | Défis du sujet | 8 |
| 1.3 | Méthodologie générale et expérimentation | 9 |
| 1.3.1 | État de l'art | 10 |
| 2 | Conception d'une antenne double bande | 11 |
| 2.1 | Conception d'une antenne double bande à 900 Mhz et à 1800 Mhz . | 12 |
| 2.1.1 | Conception des différents éléments composant l'antenne . . . | 13 |
| 2.1.2 | Conception de l'élément de bande supérieure | 14 |
| 2.1.3 | Optimisation de l'antenne | 16 |
| 2.1.4 | Conclusion | 22 |
| 3 | Étude de la formation des faisceaux avec un radiateur parasite | 23 |
| 3.1 | Effet du radiateur parasite sur le diagramme de rayonnement de l'antenne émettrice | 23 |
| 3.1.1 | Configuration des éléments de base | 24 |
| 3.1.2 | Étude de la reconfigurabilité du radiateur parasite | 26 |
| 3.2 | Étude de la reconfiguration d'une antenne optimisée | 36 |
| 3.2.1 | Le tracé de faisceau | 38 |
| 3.2.2 | Calcul du champ électrique d'une antenne | 39 |
| 3.2.3 | Comparaison du champ électrique d'antennes à l'aide de leur CDF | 40 |
| 4 | Mesures | 46 |
| 4.1 | Inductance et Varactor | 46 |
| 4.1.1 | Méthodologie et résultats | 47 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Division d'une zone géographique en cellules | 5 |
| 1.2 | Division d'une zone géographique en cellules | 6 |
| 1.3 | Diagramme de rayonnement d'une antenne de base en dB à 1800 Mhz | 7 |
| 1.4 | Antenne de base couplée à des parasites [1] | 8 |
| 2.1 | Géométrie de l'antenne proposée : vue de face | 12 |
| 2.2 | Géométrie de l'antenne proposée : vue de coté | 13 |
| 2.3 | Mise en évidence de l'élément de basse fréquence avec son replis. . . | 14 |
| 2.4 | Mise en évidence de l'élément de fréquence supérieure de l'antenne proposée | 14 |
| 2.5 | Connexion du câble coaxial par soudure | 15 |
| 2.6 | Géométrie du réflecteur métallique | 15 |
| 2.7 | Géométrie du réflecteur métallique avec le câble coaxial d'alimentation | 16 |
| 2.8 | Géométrie de l'antenne optimisée | 17 |
| 2.9 | Géométrie de l'antenne optimisée : l'élément de bande supérieure . | 17 |
| 2.10 | Paramètres S [dB] de l'antenne | 18 |
| 2.11 | Diagramme de rayonnement à 1800MHz | 19 |
| 2.12 | Diagramme de rayonnement à 900MHz | 19 |
| 2.13 | Paramètres Z de l'antenne [Ω] | 20 |
| 2.14 | Illustration du Balun double bande | 21 |
| 2.15 | Paramètres S [dB] de l'antenne alimenté par un câble coaxial | 22 |
| 3.1 | Antenne émettrice à 1800 MHz | 24 |
| 3.2 | Diagramme de rayonnement de l'antenne émettrice à 1800 MHz en $\phi = 0$ | 25 |
| 3.3 | Configuration du dispositif simulé à 1800MHz | 25 |
| 3.4 | Situation : 1 dipôle centré sur l'antenne | 26 |
| 3.5 | Champ électrique d'une antenne avec un dipôle centré | 27 |
| 3.6 | Radiateur composé de 4 dipôles | 29 |
| 3.7 | Situation : 4 dipôles centrés sur l'antenne | 29 |
| 3.8 | Champ électrique d'une antenne avec 4 dipôles centrés | 30 |
| 3.9 | Radiateur composé de 7 dipôles | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.10 | Situation : 7 dipôles centrés sur l'antenne | 31 |
| 3.11 | Champ électrique d'une antenne avec 7 dipôles centrés | 31 |
| 3.12 | Radiateur composé de 12 dipôles | 32 |
| 3.13 | Situation : 12 dipôles centrés sur l'antenne | 32 |
| 3.14 | Champ électrique d'une antenne avec 12 dipôles centrés | 33 |
| 3.15 | Radiateur composé de 4 dipôles sur 3 étages | 34 |
| 3.16 | Situation : 4 dipôles sur 3 étages centrés sur l'antenne | 34 |
| 3.17 | Champ électrique d'une antenne avec 4 dipôles sur 3 étages centrés | 35 |
| 3.18 | Vue aérienne de la place Eugène Flagey [2] | 36 |
| 3.19 | Vue aérienne de la géométrie du scénario étudié avec les bâtiments (gris) et deux antennes de Base (bleue point-flèche)[1] | 36 |
| 3.20 | Diagramme de rayonnement d'une antenne de base en dB à 1800 MHz | 37 |
| 3.21 | Représentation du cas de tracé de rayon aux abords de la Place Eugène Flagey | 38 |
| 3.22 | Représentation du cas de tracé de rayon aux abords de la Place Eugène Flagey | 39 |
| 3.23 | CDF du niveau du champ de l'antenne de base et de l'antenne avec des éléments parasites pour BS1 | 41 |
| 3.24 | CDF du niveau du champ de l'antenne avec des éléments parasites et de cette même antenne dépointée de +5/-5 degrés pour BS1 . . . | 42 |
| 3.25 | CDF du niveau du champ de l'antenne avec des éléments parasites et de cette même antenne dépointée de +10/-10 degrés pour BS1 . | 43 |
| 3.26 | CDF du niveau du champ de l'antenne avec des éléments parasites et de cette même antenne dépointée de +15/-15 degrés pour BS1 . | 44 |
| 4.1 | Impédance mesurée du circuit à 1800 MHz | 47 |
| 4.2 | Illustration du changement de référence | 48 |
| 4.3 | Dispositif de mesure du circuit | 48 |
| 4.4 | Circuit schématique du circuit mesuré à 1800MHz | 49 |
| 4.5 | Représentation de la mesure de la ligne de transmission | 49 |
| 4.6 | Impédance mesurée du circuit à 1800 MHz | 51 |
| 4.7 | Impédance mesurée du circuit à 1800 MHz | 52 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Plan des fréquences [3] | 11 |
| 2.2 | Plan des fréquences de l'antenne double bande | 18 |
| 3.1 | Tableau récapitulatif des niveaux du champ électrique pour une CDF fixée à 0,5 et différents dépointages | 45 |

Introduction

Au coeur de la polémique qui fait rage autour du déploiement massif de la 5G en Belgique, la réduction de l'exposition humaine aux radiations prend tout son sens. Les ondes électromagnétiques peuvent être intrinsèquement dangereuses lorsqu'elles dépassent la fréquence de 750 000 GHz. Les ondes, à cette fréquence, deviennent ionisantes. Elles perturbent jusqu'à la structure interne d'un atome en l'ionisant. Ces bandes de fréquence ne sont pas utilisées dans le cadre des communications cellulaires. En revanche, on parle également de la possibilité qu'au vu du déploiement important des antennes-relais, les ondes électromagnétiques provoquent des cancers. Le CIRC (centre international de recherche contre le cancer) a classé les ondes utilisées en communication cellulaire dans le groupe 2B ; à savoir potentiellement cancérigènes. Ce groupe reprend également d'autres éléments régulièrement en contact avec le corps humains comme par exemple le café ou encore la viande rouge.

Le danger principal rencontré à la fréquence des ondes électromagnétiques utilisées dans le cadre des réseaux cellulaires est l'effet thermique. Des études rapportent qu'il existe un échauffement possible du corps humain à partir d'une exposition à une onde de $4 \frac{Watt}{Kg}$. L'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), établissement mandaté par l'organisme mondial de la santé (OMS), a imposé des normes afin de prendre une marge de sécurité par rapport aux premiers effets d'échauffement perçu par le corps humain. La norme impose une exposition maximale de $0,008 \frac{Watt}{Kg}$ à savoir un champ électrique de $41 \frac{V}{m}$ à 900 MHz et de $58 \frac{V}{m}$ à 1800 Mhz. Les normes en Belgique dans le cas des antennes-relais sont prises au niveau régionale. En Flandres et en Wallonie, le standard pour le champ électrique est de $20,6 \frac{V}{m}$ à 900 MHz. Une norme additionnelle est prise sur la force du champ électrique cumulé en région Bruxelles capitale et en Wallonie. La région Bruxelles-capitale impose une norme de $3 \frac{V}{m}$ et la Wallonie est un peu plus laxiste car elle impose une norme de $6 \frac{V}{m}$.

Il s'ensuit que l'application d'un principe de précaution est une tâche difficile pour les gouvernements et les organismes de réglementation parce qu'ils doivent s'assurer que le projet est techniquement et économiquement viable.

Cependant, comme le présente l'article [1], il existe encore un degré de liberté qui n'est pas utilisé lors de l'optimisation des antennes-relais. Ce degré de liberté est en lien avec le diagramme de rayonnement de l'antenne. Cette amélioration technique induit une diminution globale de l'exposition humaine sans changer la qualité de service fournit aux utilisateurs du réseau cellulaire.

Ce mémoire s'inscrit dans cette recherche d'optimisation des antennes-relais en vue de réduire l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques dans les réseaux cellulaires. Il présente une description du contexte dans lequel le travail s'inscrit et les défis auxquels il doit répondre pour obtenir les résultats escomptés.

Pour commencer, une vue d'ensemble détaillée du projet ainsi que ses défis sont présentés dans le Chapitre 1. Dans la première section, une mise en place du contexte technique actuel et les améliorations possibles sont abordées. Ensuite, une présentation du sujet du mémoire focalisée sur les aspects techniques et les résultats espérés est décrite. La section finale de chapitre présente la méthodologie générale suivie lors de la réalisation de ce travail. Des alternatives ainsi que des connexions possibles avec d'autres recherches déjà réalisées sont présentées dans l'état de l'art. Comme introduit dans cette section, l'étude peut être divisée en deux objectifs principaux.

Le premier objectif revient à concevoir une antenne double bande qui émet sur les bandes de fréquence allouées au réseau cellulaire 4G/LTE et potentiellement 5G. Le deuxième chapitre est dédié à cet objectif. Il commence par le dimensionnement des différentes parties qui composent l'antenne. Ensuite, il présente les simulations réalisées par le logiciel CST lors de l'optimisation de l'antenne ainsi que les résultats obtenus. Enfin, il confirme le bon fonctionnement de l'antenne et présente les étapes qu'il reste à mettre en place jusqu'au test de l'antenne dans une chambre anéchoïque.

Le second objectif est l'adaptation du diagramme de rayonnement de l'antenne en fonction du milieu dans lequel elle se trouve. Cet objectif sera couvert par les chapitres 3 et 4. Dans la première section du chapitre 3, une reconfiguration du diagramme de rayonnement de l'antenne est présentée grâce à la simulation de différents modèles de radiateur auxiliaire placés dans le champ de vision de l'antenne. Cette section permet de mettre en évidence une relation entre le diagramme de rayonnement et les charges des dipôles parasites qui composent le radiateur auxiliaire. Dans la section finale, une mise en situation d'une antenne sur la place Eugène Flagey à Bruxelles est étudiée. Cette situation va permettre d'étudier la résilience de l'antenne face à un dépointage du champ de vision pour lequel elle a été optimisée. Différents dépointages vont être appliqués à l'antenne-relais. Ensuite, les résultats seront interprétés. Le chapitre 4 traite le dispositif utilisé qui permet de faire varier électroniquement les charges des dipôles qui composent le radiateur

auxiliaire. Il présente le circuit utilisé ainsi que les éléments qui prennent part au radiateur auxiliaire. Enfin, il va introduire les mesures prises avec leur méthode de post-traitement.

Finalement, une conclusion est déduite des différents résultats obtenus durant les recherches et les simulations présentées dans les différents chapitres de ce mémoire. Cette conclusion est réalisée avec un regard critique afin de sortir le plus possible d'informations et de résultats des études réalisées dans le cadre de ce mémoire.

Chapitre 1

Vue d'ensemble et défis

1.1 Situation actuelle et réexamen

Le réseau cellulaire actuel est composé d'un grand nombre de stations émettrices basses puissances. Ces antennes permettent de couvrir une large zone géographique en maximisant le nombre d'utilisateurs. Chaque antenne est dirigée vers un secteur et elle est limitée selon un angle azimutal. Les antennes généralement utilisées sont des antennes tri-sectorielles, elles émettent dans trois directions azimutales différentes, à savoir 60 degrés, 90 degrés et 120 degrés.

Le spectre de fréquence utilisé par le réseau cellulaire est limité. Afin d'augmenter le nombre d'utilisateurs simultanés, chaque fréquence du spectre est utilisée plusieurs fois dans une zone. Chaque zone est donc divisée en plusieurs cellules qui sont elles-mêmes groupées autour d'un modèle qui peut être répété. La taille de la cellule est dépendante de la puissance que peut délivrer le téléphone de l'utilisateur. Dans la Fig. 1.1, chaque modèle a une couleur différente. Ils sont composés de différentes cellules (A,B,C,D,E,F,G) qui ont chacune une fréquence de fonctionnement différente. Dans cette représentation, chaque cellule ayant la même lettre alphabétique fonctionne à la même fréquence.

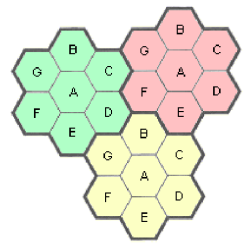


FIGURE 1.1 – Division d'une zone géographique en cellules

Dans le réseau cellulaire en activité, les antennes correspondent aux intersections de trois cellules pour éviter les interférences entre cellules ayant la même fréquence. Un autre avantage de l'installation d'antennes tri-sectorielles est la division par trois du nombre d'antennes à installer par rapport à un réseau où des antennes omnidirectionnelles sont au centre de la cellule. Cependant, lorsque la puissance n'est pas suffisante, des antennes additionnelles omnidirectionnelles peuvent être ajoutées aux antennes tri-directionnelles. La Fig. 1.2 illustre la position des antennes tri-sectorielles au sein du réseau cellulaire.

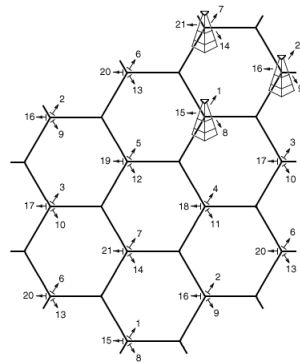


FIGURE 1.2 – Division d'une zone géographique en cellules

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est modifiable. En effet, lorsque des dipôles parasites sont ajoutés devant l'antenne de base, le diagramme de rayonnement de l'antenne est modifié. Il est donc possible de façonner le diagramme de rayonnement des antennes sans altérer la structure interne de celles-ci. La Fig. 1.3 présente par exemple la modification possible. Elle présente le diagramme de rayonnement de l'antenne initiale (Base station ,notée BS) et le diagramme de rayonnement de l'antenne en présence de dipôles parasites (Base station with parasitices,notée BSPW).

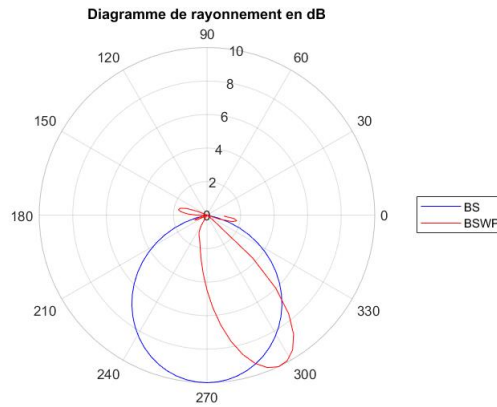


FIGURE 1.3 – Diagramme de rayonnement d’une antenne de base en dB à 1800 Mhz

Cette pratique laisse la porte ouverte à de nombreuses possibilités ; Surtout que actuellement, les antennes placées ont tendance à surexposer tout ce qui est dans son champ de vision et à sous exposer le reste de la zone. Cette technique qui consiste à placer des parasites devant l’antenne va permettre de modifier le diagramme de rayonnement en fonction de l’environnement dans lequel celle-ci se trouve. L’utilisation d’éléments parasites pourrait également être mis en place pour diminuer l’exposition de certains lieux tout en augmentant l’homogénéité de la qualité du réseau.

1.2 Défis du sujet

L'idée principale est de donner un plus grand nombre de degrés de liberté dans la forme du diagramme de rayonnement. La forme du diagramme va pouvoir être optimisée grâce , d'une part, aux essais de différents radiateurs mis dans le champ de vision de l'antenne conçue dans cette étude et d'autre part, par les simulation de propagation des ondes électromagnétiques dans l'environnement dans lequel l'antenne est implantée.

Les outils de modélisation déterministes permettent d'étudier la propagation des ondes électromagnétiques au sein d'un endroit donné. Ils permettent de caractériser la couverture, le délai de propagation, la puissance et encore d'autres données utiles à la modélisation de la propagation des ondes dans l'environnement.

La communication cellulaire par le biais des stations de base surexpose la zone située dans le champ de vision de la station et sous-expose les autres zones. Dans ce contexte, des solutions ont été trouvées afin de modifier le diagramme de rayonnement sans changer la structure de l'antenne de base. Le principe, présenté à la figure 1.4, est de placer un radiateur dont les parasites ont des charges modifiables en fonction de la tension qui leur est appliquée. Ces parasites sont placés dans le champ de vision de l'antenne émettrice afin de modifier activement le diagramme de rayonnement de l'antenne.

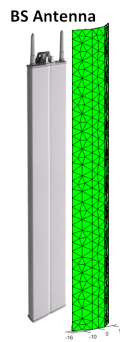


FIGURE 1.4 – Antenne de base couplée à des parasites [1]

1.3 Méthodologie générale et expérimentation

Comme présenté précédemment, la base du projet est d'optimiser une série de charges d'un radiateur auxiliaire dans le but de modifier le diagramme de rayonnement de l'antenne initiale. Le radiateur est modifiable en fonction de la tension appliquée aux charges, ce qui permet d'apporter de nouvelles propriétés de rayonnement à l'antenne, en adéquation avec le milieu dans lequel elle est installée.

Dans le dispositif utilisé pour adapter le diagramme de rayonnement de l'antenne à la zone dans laquelle elle émet, il y a deux éléments principaux. Le premier est l'antenne qui émet et reçoit selon un diagramme de rayonnement intrinsèque à sa conception. Le second élément est le radiateur auxiliaire qui va permettre d'adapter l'émission de l'antenne à son environnement.

L'étude va donc être divisée en deux objectifs. Premièrement, une antenne double bande sera conçue afin qu'elle puisse émettre sur deux bandes de fréquence. En effet, dans toute communication cellulaire, il y a une liaison montante et une liaison descendante qui utilisent deux bandes de fréquence distinctes. Dans le cas de cette étude, la fréquence utilisée pour la liaison montante se trouve autour de 900 MHz tandis que la liaison descendante est autour de 1800 MHz. L'antenne ainsi créée respectera les standards de la 4G/LTE.

Deuxièmement, l'adaptation du diagramme de rayonnement de l'antenne au milieu dans lequel elle émet sera permis grâce à la mise en place d'un radiateur auxiliaire dans la direction du champ de vision de l'antenne. Cependant, la fonction liant le diagramme de rayonnement et les charges du radiateur auxiliaire n'est pas linéaire. Il est donc important de simuler différentes situations de radiateur afin de déterminer la disposition idéale pour modéliser le diagramme de rayonnement de l'antenne à son environnement. Ensuite, une étude de cas sera réalisée. L'étude se portera sur la reconfigurabilité d'une antenne optimisée pour son environnement. Le but est de connaître la résilience de l'antenne face à un dépointage par rapport à son champ de vision initial.

Afin d'optimiser les antennes-relais en vue de réduire l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques dans les réseaux cellulaires, et grâce à la division du travail en deux thématiques distinctes, le travail a pu commencer en épluchant la littérature scientifique. Cet état de l'art va permettre de comprendre la mise en place de radiateurs auxiliaires et les interactions existantes entre les champs électriques qui entourent l'antenne et l'environnement dans laquelle elle se trouve.

1.3.1 État de l'art

Dans l'étude de la propagation dans une zone définie, l'interaction entre les champs électriques, les objets physiques et l'environnement est introduite. La méthode des moments sera la méthode de calcul choisie parmi les méthodes de calcul. Cette technique est présentée dans l'article [4]. Le principe de la méthode des moments est de résoudre des équations de Maxwell qui ont été formulées sous forme d'équations intégrales. Cette technique correspond à approximer des densités de courant de surface par une somme pondérée de fonctions de base. Elle impose ensuite des conditions limites à la surface de contours (par exemple, un champ électrique tangentiel nul sur les surfaces conductrices). L'intérêt de la technique de la méthode des moments se porte sur les sources électromagnétiques, donc seulement les surfaces de l'antenne sont discrétisées.

La modification du diagramme de rayonnement d'une antenne grâce à l'ajout de radiateurs auxiliaires parasites a déjà donné des résultats concluants par le passé avec, par exemple, l'antenne Yagi-Uda. Cette antenne à éléments parasites est utilisable pour émettre des hautes fréquences aux ultras hautes fréquences. Elle est souvent utilisée en Télécommunication terrestre. D'autres résultats concluants sont apportés par l'article [1] qui traite de la reconfigurabilité des antennes de station de base cellulaire. Ce dernier va permettre de donner une première approche quant à la reconfiguration du diagramme de rayonnement d'une antenne. Cet article utilise deux principes : le premier est d'utiliser une méthode de tracé de rayon pour concevoir le diagramme de rayonnement déterminé pour améliorer la couverture étudiée et respecter les limitations légales de puissance applicable dans la zone. Dans un second temps, un problème de conception d'un diagramme de rayonnement coïncidant avec le diagramme obtenu par la méthode de tracé de rayon est abordé. Ce diagramme de rayonnement optimisé est obtenu par la modification des charges des dipôles composant le radiateur auxiliaire parasite. Les impédances des dipôles permettent de moduler le diagramme de rayonnement initial de l'antenne de la station de base afin d'obtenir un diagramme le plus proche possible du diagramme fixé comme objectif. Afin de créer des dipôles parasites reconfigurables, des diodes Varactor sont utilisées pour créer des charges parasites modifiables. Ce concept de radiateurs auxiliaires parasites reconfigurables composés de dipôles ayant des impédances variables sera utilisé dans la suite de l'exposé.

Chapitre 2

Conception d'une antenne double bande

Actuellement, le réseau cellulaire 4G/LTE émet principalement sur deux bandes de fréquences. La première bande de fréquence se trouve autour de 900 *Mhz* et la seconde autour de 1800 *Mhz*. Une antenne fonctionnant parfaitement dans ces bandes de fréquence doit être créée afin de pouvoir mettre en évidence les modifications induites par des radiateurs auxiliaires mis dans le champ de vision de l'antenne de base. Cette antenne permettra de tester facilement l'ensemble formé de l'antenne double bande et du radiateur modifiable. A cette fin, l'idée principale reprise dans ce chapitre est de créer une antenne fonctionnant sur deux bandes de fréquence et dont les propriétés physiques permettent la mise en réseau avec différentes antennes sans modification importante de la structure de l'antenne. Cette antenne double bande sera composée d'une partie centrale alimentée par un câble coaxial interagissant avec des composants parasites.

La condition sine qua non d'une conception correcte de l'antenne est son émission sur deux bandes de fréquence définies légalement. Ces bandes, allouées aux réseaux cellulaires publics, sont définies par l'institut belge des services postaux et des télécommunications (IBPT).

L'antenne doit émettre sur les bandes de fréquences légalement définies et reprises dans le tableau 2.1.

| | |
|---------------------|------------------------|
| Liaison descendante | 880 - 915 <i>MHz</i> |
| Liaison montante | 1805 - 1880 <i>MHz</i> |

TABLE 2.1 – Plan des fréquences [3]

Il existe une seconde condition qui est la simplification de la mise en réseau de l'antenne conçue. Pour ce faire, la taille de l'antenne ne peut pas dépasser $\frac{\lambda}{2}$ où λ est la longueur d'onde à la plus haute fréquence. Dans ce cas, l'antenne ne

peut pas dépasser 16,5 cm afin de limiter les interactions entre les diagrammes de rayonnement qui composent le réseau d'antenne.

2.1 Conception d'une antenne double bande à 900 Mhz et à 1800 Mhz

La configuration proposée pour l'antenne est présentée dans la Fig. 2.1 et dans la Fig. 2.2. L'antenne est composée d'éléments de bande inférieure, d'un élément de bande supérieure et d'un réflecteur métallique. Les éléments de bande inférieure et l'élément de bande supérieure sont imprimés en cuivre sur une surface de FR4[5]. Un substrat en matériau FR4, communément utilisé pour les circuits imprimés, crée un soutien mécanique aux différents composants de l'antenne. Les éléments de bande inférieure sont de part et d'autre de l'élément de bande supérieure.

La Fig.2.1 présente les normes angulaires utilisées dans la conception de l'antenne. Cette figure présente le plan x-y passant par le centre de l'antenne comme ayant un angle d'élévation nul ($\phi = 0^\circ$). Le plan z-y est considéré comme ayant un angle azimutal (θ) égal à 0° . Le champ de vision de l'antenne est donc dirigé en $\phi = 0^\circ$ et en $\theta = 0^\circ$.

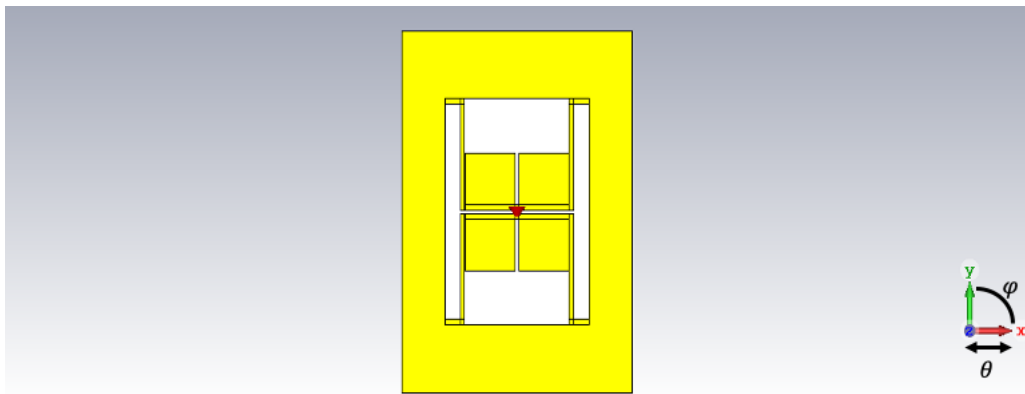


FIGURE 2.1 – Géométrie de l'antenne proposée : vue de face

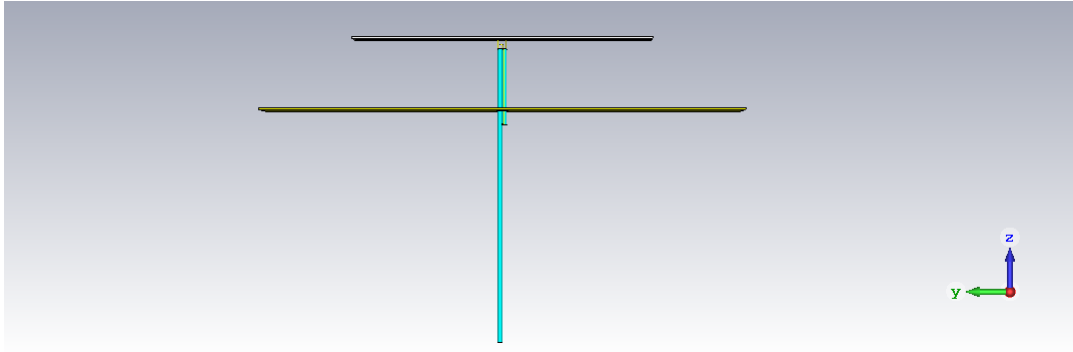


FIGURE 2.2 – Géométrie de l'antenne proposée : vue de coté

2.1.1 Conception des différents éléments composant l'antenne

Dans cette section, une description détaillée de chaque partie de l'antenne sera proposée. Les éléments décrits sont ceux de basse-bande (900 Mhz), de bande supérieure (1800 Mhz) et le réflecteur métallique. Tous ces composants permettent de créer une antenne double bande émettant sur les bandes de fréquence allouées légalement à la communication cellulaire et présentées dans le tableau 2.2. Il existe plusieurs antennes double bande qui permettent d'émettre sur les bandes de fréquence allouées aux réseaux cellulaires telles que la "dual band Small Planar Antenna" [6], la " Multi-Band Miniaturized Slot Antenna with 2-stage Bandpass Filter" [7] ou encore la "Dual Broadband Antenna" [8]. Cette dernière possède un fonctionnement similaire à l'antenne qui va être développée dans les sections suivantes. En effet, elle est composée de 3 éléments principaux. Ces 3 éléments sont un dipôle de bande supérieure alimenté par un câble coaxial, des dipôles de bande inférieure non alimentés et un réflecteur métallique.

Conception des éléments de bande inférieure

Les éléments de basse-bande sont proposés dans l'article [9] ; ils sont formés de quatre dipôles. Les quatre parties sont des parties séparées et distinctes de la partie centrale de l'antenne. Les quatre dipôles qui sont opposés deux par deux sont combinés pour former une seule polarisation. Ces éléments permettent à l'antenne d'émettre dans une bande inférieure car ils sont mis en résonance par le champ électrique émis par l'élément de bande supérieure qui est le seul alimenté dans les éléments qui composent cette antenne. Les quatre éléments de basse-bande sont de même dimension et ils ne dépassent pas la longueur de $\frac{\lambda}{2}$ (16.5cm). La Fig. 2.3 présente un élément de basse-fréquence replié. Les éléments sont repliés pour réduire la taille de l'antenne et ne pas excéder λ (33cm) afin de pouvoir créer une

future antenne composée de la mise en réseau de plusieurs antennes de ce type.

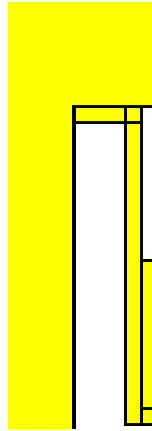


FIGURE 2.3 – Mise en évidence de l'élément de basse fréquence avec son replis.

2.1.2 Conception de l'élément de bande supérieure

L'élément central sur la Fig. 2.4 est composé de deux dipôles alimentés par un câble coaxial RG316U [10] traversant le réflecteur métallique et la couche de RF4 pour venir se connecter par soudure sur les deux éléments, comme illustré sur la Fig. 2.5.

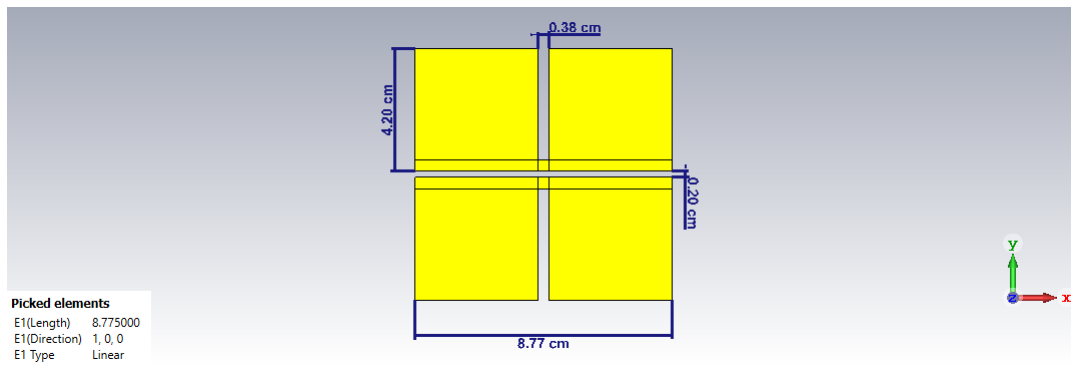


FIGURE 2.4 – Mise en évidence de l'élément de fréquence supérieure de l'antenne proposée

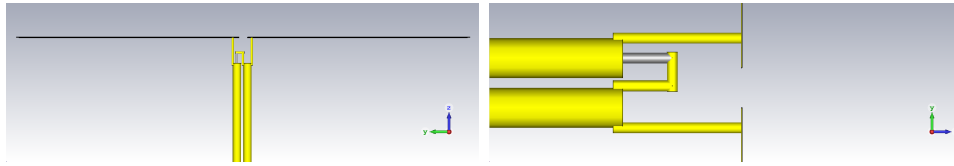


FIGURE 2.5 – Connexion du câble coaxial par soudure

Conception du Réflecteur métallique

Un réflecteur métallique, composé de cuivre, est ajouté à l'antenne pour créer un diagramme de rayonnement directionnel. Les dimensions du réflecteur ont été choisies plus grand que la taille de l'antenne pour impacter significativement le diagramme de rayonnement. La distance entre le réflecteur et l'antenne double bande modifie l'impédance de l'antenne. L'impédance de l'antenne sera abordée plus tard dans la section 2.1.3 : Optimisation de l'antenne

La Fig. 2.11 à la page 18 présente le diagramme de rayonnement en horizontal ($\phi = 0^\circ$) de l'antenne optimisée. L'antenne est dirigée vers $\theta = 0^\circ$ et le réflecteur dans le dos pour créer un champ de vision en $\theta = 0^\circ$. Les dimensions du réflecteur en cm sont $20 \times 20 \times 0.1$ de cuivre. Il est perforé en son centre d'un trou de 0.3×0.3 cm pour permettre au câble coaxial d'alimenter l'antenne comme présenté sur les Fig. 2.6 et 2.7.

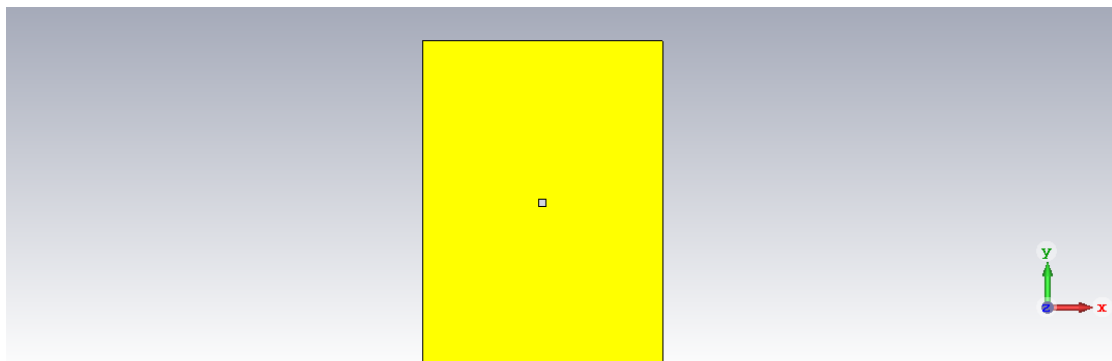


FIGURE 2.6 – Géométrie du réflecteur métallique

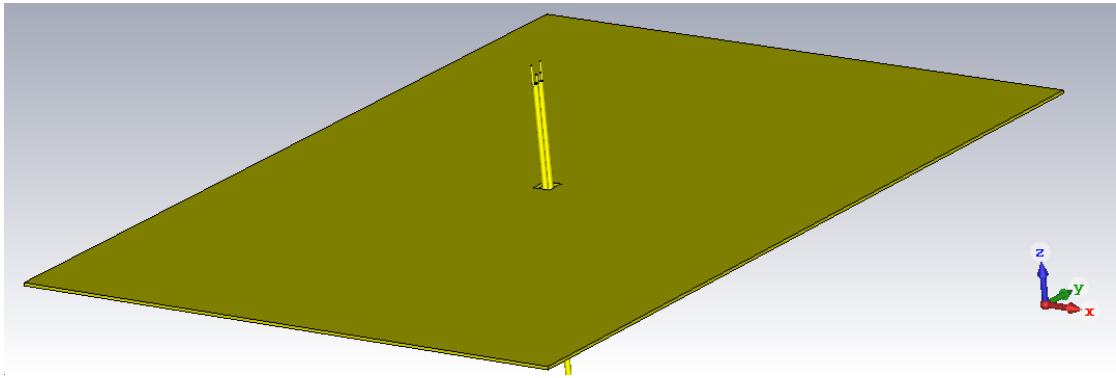


FIGURE 2.7 – Géométrie du réflecteur métallique avec le câble coaxial d'alimentation

2.1.3 Optimisation de l'antenne

La forme de l'antenne maintenant définie, celle-ci doit être optimisée afin de répondre parfaitement aux critères d'émission. A savoir, les bandes d'émission de l'antenne doivent être en adéquation parfaite avec les bandes de fréquences définies par l'IBPT (tableau 2.1) et l'antenne proposée doit respecter un dimensionnement permettant la mise en réseau de l'antenne.

Les points suivants décrivent l'antenne et présentent une vérification de ses propriétés physiques.

Dimensionnement de l'antenne

L'antenne proposée Fig. 2.1 est simulée et optimisée par le logiciel de simulation CST Studio Suite® 2020, qui est basé sur la méthode "Finite Integration Technique" qui présente certains points communs avec la FDTD (Finite Difference Time Domain). Les paramètres de la géométrie optimale de l'antenne complète sont repris dans les Fig.2.9 et 2.8 . L'antenne présentée dans ces résultats est alimentée par une source idéale (delta gap feed) c'est-à-dire qu'elle ne change aucune propriété physique de l'antenne lorsqu'elle l'alimente celle-ci.

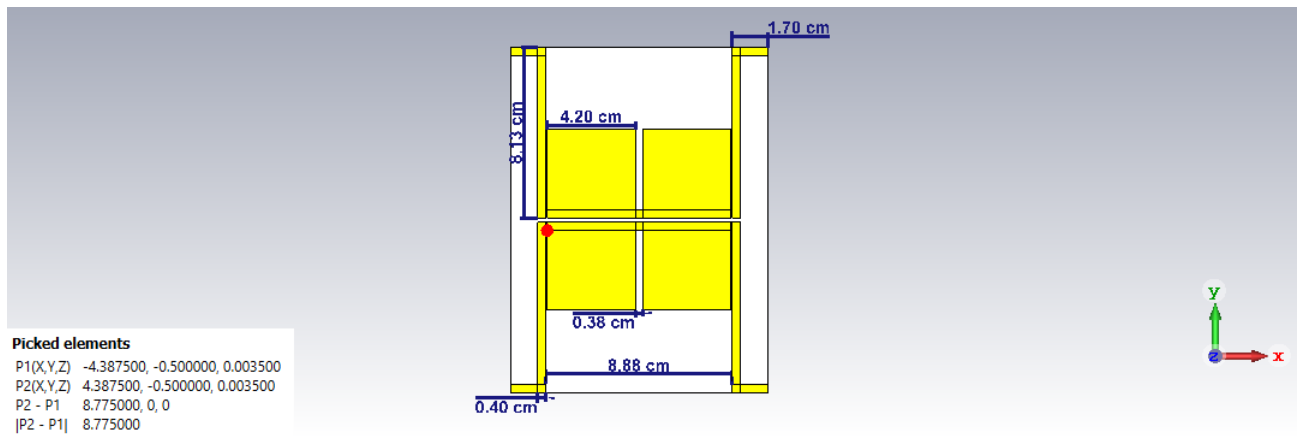


FIGURE 2.8 – Géométrie de l'antenne optimisée

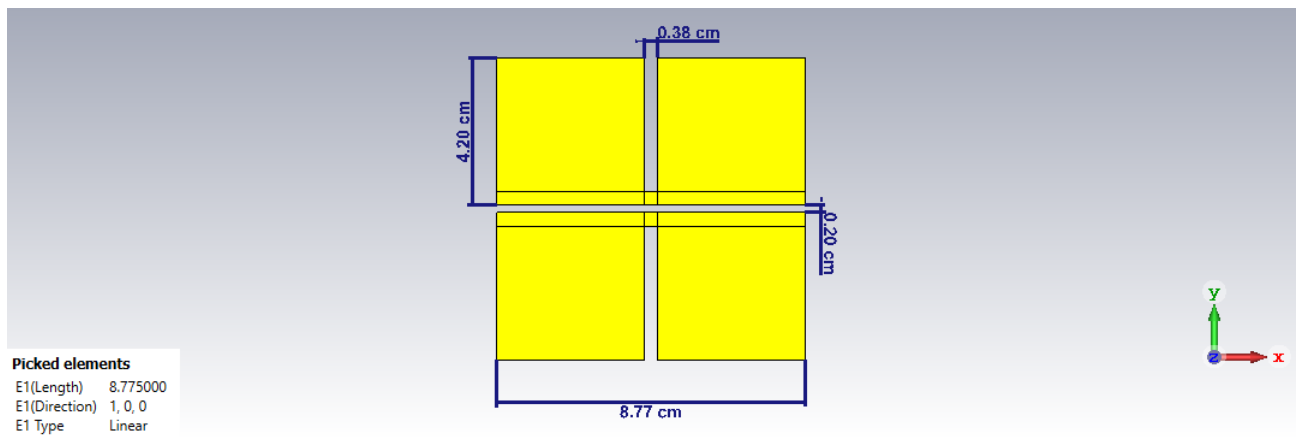


FIGURE 2.9 – Géométrie de l'antenne optimisée : l'élément de bande supérieure

Les bandes de fréquence de l'antenne grâce à son paramètre S11

L'étude du paramètre S11 de l'antenne, c'est-à-dire son coefficient de réflexion [11], montré à la Fig. 2.10, permet d'identifier les bandes de fréquence pour lesquelles l'antenne émet correctement. La bande de fréquence pour laquelle l'antenne émet est prise pour un gain de -10 dB et elle est présentée dans le tableau 2.2.

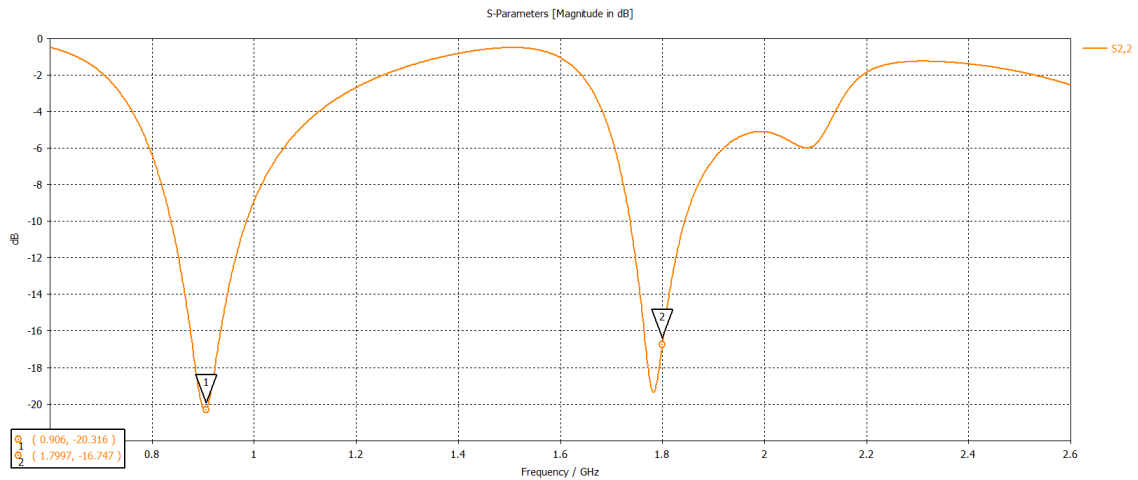


FIGURE 2.10 – Paramètres S [dB] de l’antenne

Grâce aux résultats repris dans le tableau 2.2 comparé au tableau 2.1, il est conclu que l’antenne respecte bien les spécifications d’une antenne de station de base.

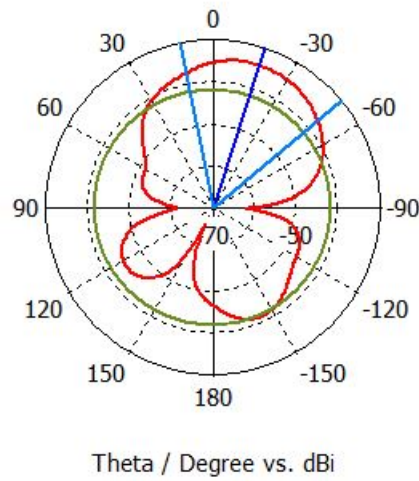
| | |
|---------------------|----------------|
| Liaison descendante | 836 - 979MHz |
| Liaison montante | 1769 - 1887MHz |

TABLE 2.2 – Plan des fréquences de l’antenne double bande

Le diagramme de rayonnement de l’antenne double bande

Le diagramme de rayonnement horizontal ($\phi = 0^\circ$) de l’antenne double bande est présenté dans la Fig. 2.11 et la Fig. 2.12 . Pour une fréquence de 1,8 GHz, l’antenne présente un lobe principal à $\theta = -18^\circ$ d’amplitude de -34,4 dBi et La largeur angulaire de ce lobe est de $61,5^\circ$ à -3dB. L’amplitude des lobes secondaires est de -7,3 dB.

Farfield Directivity Ludwig 3 Horizontal (Phi=0)



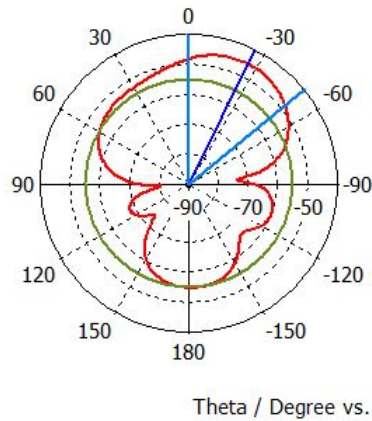
— farfield (f=1.8) [2]

Frequency = 1.8 GHz
 Main lobe magnitude = -34.4 dBi
 Main lobe direction = -18.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 61.5 deg.
 Side lobe level = -7.3 dB

FIGURE 2.11 – Diagramme de rayonnement à 1800MHz

Pour une fréquence de 0,9 GHz, l'antenne présente un lobe principal à $\theta = -26^\circ$ d'amplitude de -45,4 dBi et La largeur angulaire de ce lobe est de $51,1^\circ$ à -3dB. L'amplitude des lobes secondaires est de -9,8dB.

Farfield Directivity Ludwig 3 Horizontal (Phi=0)



— farfield (f=0.9) [2]

Frequency = 0.9 GHz
 Main lobe magnitude = -45.4 dBi
 Main lobe direction = -26.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 51.1 deg.
 Side lobe level = -9.8 dB

FIGURE 2.12 – Diagramme de rayonnement à 900MHz

Confirmation de la conception de l'antenne par ses paramètres Z

La conception de l'antenne est confirmée par les paramètres Z (impédance complexe d'entrée de l'antenne) présenté dans la Fig. 2.13. En effet, une impédance généralement considérée pour le générateur est une impédance de 50Ω . L'antenne doit idéalement avoir cette valeur d'impédance dans les bandes de fréquence de son utilisation.

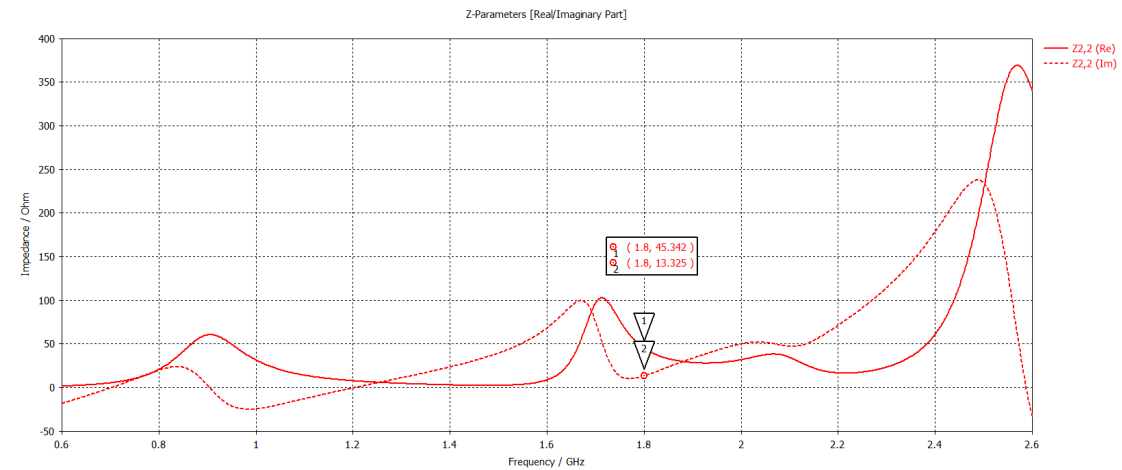


FIGURE 2.13 – Paramètres Z de l'antenne [Ω]

La Fig. 2.13 présente des impédances proches de 50Ω . En définitive, l'antenne double bande alimentée par une source idéale respecte bien les spécifications des antennes actives au sein des réseaux mobiles publiques.

Proposition de technique de mesures

Les simulations ont été fournies pour une source idéale d'alimentation de l'antenne. Afin de mesurer les caractéristiques de l'antenne en chambre anéchoïque, l'antenne doit être alimentée par un câble coaxial comme décrit précédemment. Cependant, le câble étant une structure intrinsèquement asymétrique, une fois branché sur l'antenne, il induira des courants non symétriques sur les 2 parties de l'antenne ainsi que des courants parasites sur le conducteur extérieur du câble. Ceci perturbe fortement le diagramme de rayonnement, qui perd aussi sa symétrie.

Comme décrit dans le document [12], la méthodologie pour minimiser l'impacte de l'alimentation dans les mesures est de connecter le câble coaxial perpendiculairement au plan de l'antenne afin de minimiser les courants de fuite de l'extérieur du blindage du câble, qui pourraient perturber le champ électrique de l'antenne. D'après ce même document, pour réduire de manière significative les effets du câble, un balun double bande, c'est-à-dire un circuit micro-onde qui transforme les lignes asymétriques en ligne symétrique, doit être connecté au câble de mesure pour supprimer tout courant de fuite induit à l'extérieur du blindage du câble. Le but étant d'alimenter l'antenne à l'aide d'un courant symétrique. Le balun est composé de deux séries de métal en forme de L soudées au blindage du câble. La connexion de métal au blindage du câble coaxial permet de créer un court-circuit qui est transformé en haute impédance. Cette ligne de transmission asymétrique est formée par le blindage du câble coaxial et le bout de métal comme le montre la Fig. 2.14. Les morceaux de métal doivent avoir une longueur égale à $\frac{\lambda}{4}$ à la fréquence de conception (900 ou 1800 MHz). Le balun de basse fréquence doit avoir une longueur (L) de 5,56 cm et la longueur (l) du balun de haute fréquence doit être de 2,78 cm.

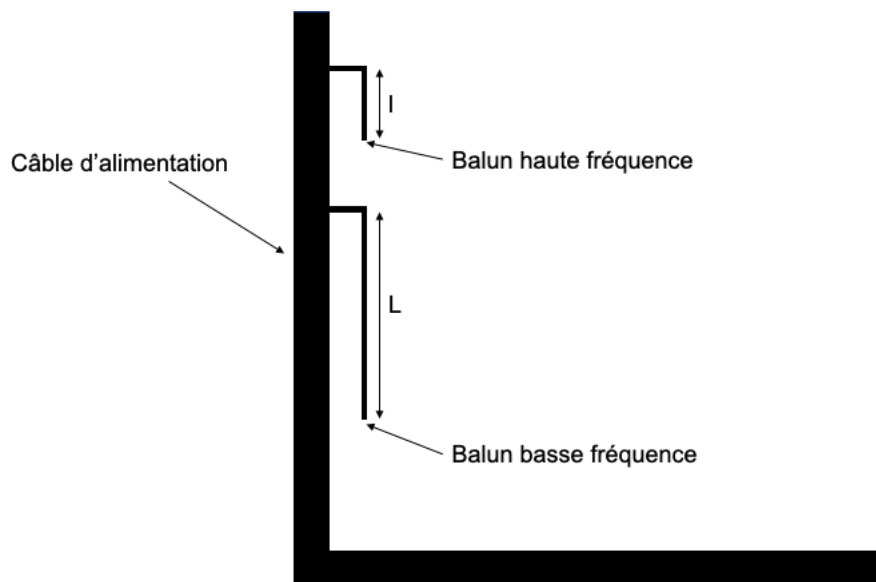


FIGURE 2.14 – Illustration du Balun double bande

En définitive, la Fig. 2.15 présente les paramètres S de l'antenne alimentée par un câble coaxial (balun). Cette figure montre en effet que les paramètres S de l'antenne alimentée par un câble coaxial présente les mêmes résultats que l'antenne alimentée par un delta feed gap et dont les paramètres S sont présentés à la Fig. 2.10.

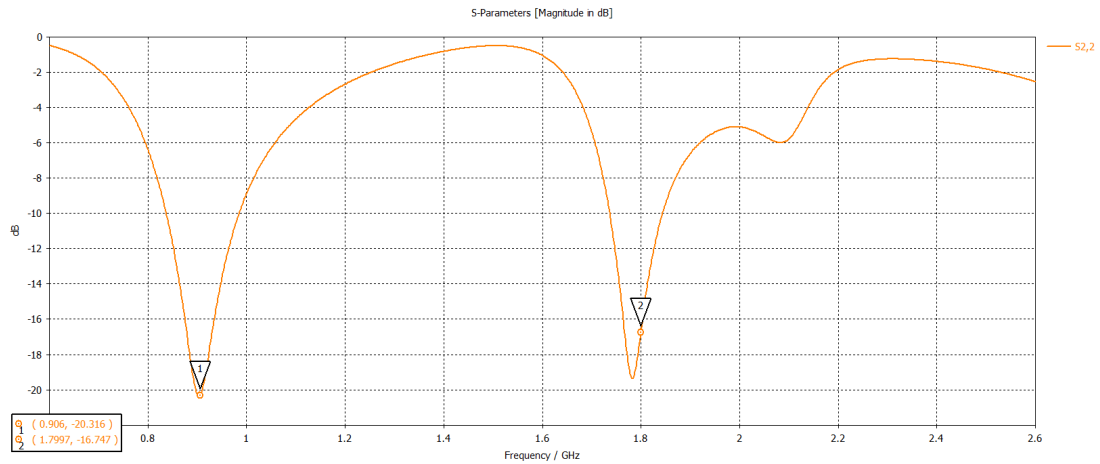


FIGURE 2.15 – Paramètres S [dB] de l’antenne alimenté par un câble coaxial

2.1.4 Conclusion

Les différents résultats proposés précédemment confirment le fonctionnement de l’antenne. Le dispositif conçu émet sur les deux bandes allouées au réseau cellulaire 4G/LTE en respectant les normes d’émissions mises en place par L’IBPT.

L’antenne présente des dimensions et elle met en oeuvre des matériaux qui permettent une fabrication facile. Enfin, elle est dimensionnée pour une intégration facile dans une mise en réseau d’antenne grâce à sa taille compacte et qui respecte les limitations de résonance des ondes électromagnétiques.

Il reste plusieurs étapes à réaliser avant le test de l’antenne en chambre anéchoïque. Tout d’abord, il s’agit de simuler l’antenne avec un câble coaxial pour l’alimentation et des parasites placé dans le cahmp de vision de l’antenne. Ensuite, la construction de l’antenne grâce aux dimensions précises de l’antenne simulées et, enfin, le test de l’antenne construite en chambre anéchoïque.

Chapitre 3

Étude de la formation des faisceaux avec un radiateur parasite

3.1 Effet du radiateur parasite sur le diagramme de rayonnement de l'antenne émettrice

Une antenne est principalement caractérisée par son diagramme de rayonnement. Ce diagramme est modifiable grâce à l'ajout d'éléments parasites dans le champ de vision de l'antenne. Les éléments parasites vont influencer l'impédance du système ce qui va modifier plus ou moins le diagramme de rayonnement de celui-ci. Ce radiateur axiliaire va permettre d'ajouter des degrés de liberté au diagramme de rayonnement de l'antenne. Les sous-sections suivantes vont permettre d'identifier l'influence de ces parasites sur le diagramme de rayonnement de l'antenne en fonction de leur disposition et de leur nombre. Plusieurs dispositions de parasites sont présentées afin de mettre en évidence les modifications du diagramme possible. Les simulations proposées sont issues de simulations dans un environnement idéal et ne présentant que comme interactions possibles, un réflecteur métallique, un dipôle métallique alimenté par une source idéale et le radiateur de dipôles parasites. Les simulations ont été réalisées à l'aide d'éléments qui resteront constants ; seules la forme et la taille du radiateur parasite vont être modifiées. Chaque dipôle qui compose le radiateur auxiliaire aura la même impédance, seule l'impédance du radiateur changera par l'ajout ou le retrait d'un dipôle. Toutes les modélisations ont été réalisées grâce au logiciel Matlab.

3.1.1 Configuration des éléments de base

Afin d'étudier le modelage du diagramme de rayonnement de l'antenne grâce à l'introduction d'éléments parasites, une configuration de base a été introduite. Cette situation initiale est composée d'un dipôle et d'un réflecteur métallique. Le premier élément est l'antenne. Cette antenne est un dipôle, émettant des ondes électromagnétiques à la fréquence de 1800 MHz et composée exclusivement de cuivre. Ce dipôle est présenté à la Fig. 3.1. Durant la suite de la section, le plan x-y passant par le centre de l'antenne est considéré comme ayant un angle d'élévation nul ($\phi = 0^\circ$). Le plan z-y est considéré comme ayant un angle azimutal (θ) égal à 270° . L'antenne émettrice présente un diagramme de rayonnement directionnel avec un lobe principal en $\theta = 270^\circ$ d'une ouverture de 100° .

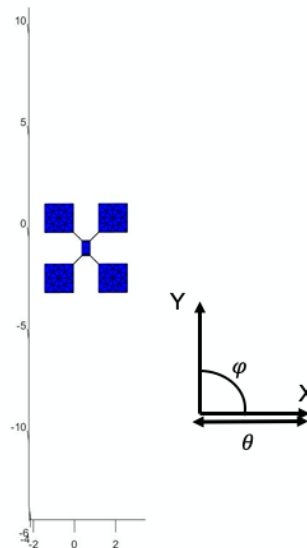


FIGURE 3.1 – Antenne émettrice à 1800 MHz

Le second élément est un réflecteur métallique qui permet de créer une antenne directionnelle. Cet élément métallique est de dimension 20 cm x 20 cm et il est placé à l'opposé du champ de vision de l'antenne émettrice.

Un troisième élément est intégré à la simulation en $\theta = 270^\circ$ et le centre de l'élément est placé en $\phi = 0^\circ$. En effet, un radiateur parasite est ajouté aux éléments de base pour modifier le diagramme de rayonnement. Ce radiateur est composé de plusieurs éléments dont chaque élément parasite est un dipôle d'une demi longueur d'onde ($8,3\text{cm}$) de largeur de $\frac{\lambda}{40}$ ($0,4\text{cm}$). La forme du diagramme de rayonnement

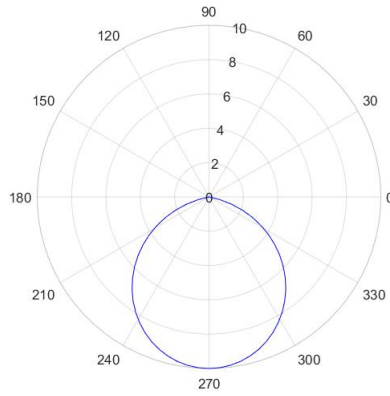


FIGURE 3.2 – Diagramme de rayonnement de l'antenne émettrice à 1800 MHz en $\phi = 0$

va varier en fonction du nombre de dipôles et de leur écartement c'est-à-dire en fonction de l'impédance du radiateur auxiliaire. La configuration des éléments de base et de l'élément modifiable est présenté sur la Fig. 3.3. L'antenne est séparée de 5 cm du réflecteur, le réflecteur de 13 cm du radiateur et le radiateur de 8 cm de l'antenne.

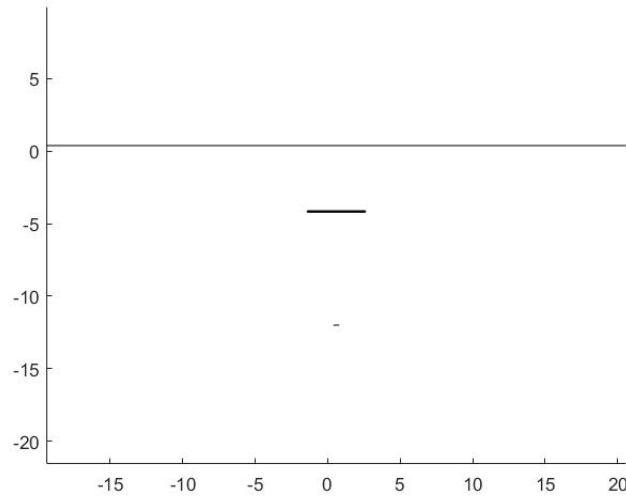


FIGURE 3.3 – Configuration du dispositif simulé à 1800MHz

3.1.2 Etude de la reconfigurabilité du radiateur parasite

Afin d'étudier l'influence du radiateur parasite sur le diagramme de rayonnement de l'antenne émettrice, plusieurs configurations d'éléments parasites seront introduites à l'élément de base dans la simulation. Leur champ électrique seront comparés à celui de l'élément de base. Ces configurations varient entre elles par leur nombre de dipôles qui composent le radiateur. Le radiateur auxiliaire mis dans le champ de vision de l'antenne émettrice prendra plusieurs configurations :

- 1 dipôle
- 4 dipôles
- 7 dipôles serrés
- 12 dipôles
- 3 étages de 4 dipôles

Pour chacune de ces formes, le diagramme de rayonnement du dispositif sera présenté pour toutes les valeurs d'angle azimutal (θ) dans le plan horizontal ($\phi = 0^\circ$).

Radiateur composé d'un dipôle centré.

La Fig. 3.4 présente la situation simulée. La situation étudiée est composée des éléments de base et d'un dipôle centré sur l'antenne émettrice.

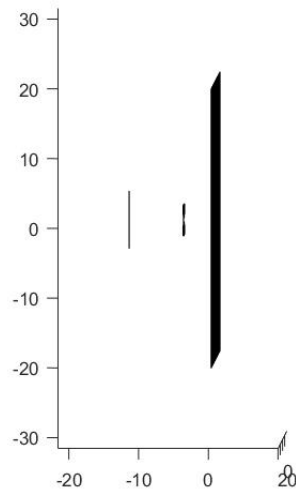


FIGURE 3.4 – Situation : 1 dipôle centré sur l'antenne

La Fig. 3.5 présente le champ électrique de l'antenne en présence d'un dipôle centré. Le champ électrique est atténué dans la direction du dipôle. Il est symétrique et

présente maintenant deux lobes principaux dans les directions $\theta = 210^\circ$ et $\theta = 330^\circ$. Leur angle d'ouverture est de 55° .

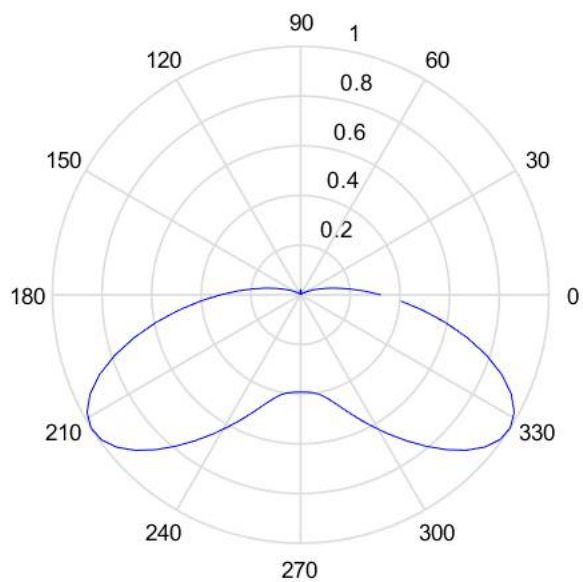


FIGURE 3.5 – Champ électrique d'une antenne avec un dipôle centré

Radiateur composé de 4 dipôles centrés.

La Fig. 3.6 présente le radiateur parasite. La situation présentée sur la Fig. 3.7 est composée des éléments de base et de 4 dipôles, centrés sur l'antenne, séparés les uns des autres de 2cm.

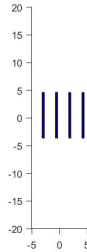


FIGURE 3.6 – Radiateur composé de 4 dipôles

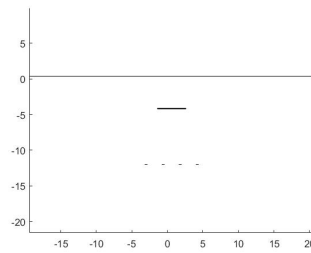


FIGURE 3.7 – Situation : 4 dipôles centrés sur l'antenne

La Fig. 3.8 présente le champ électrique de l'antenne en présence de 4 dipôles centrés. Le champ électrique est atténué dans la direction du radiateur parasite. Il est symétrique et présente maintenant deux lobes dans les directions $\theta = 210^\circ$ et $\theta = 330^\circ$. Leur angle d'ouverture est de 40° .

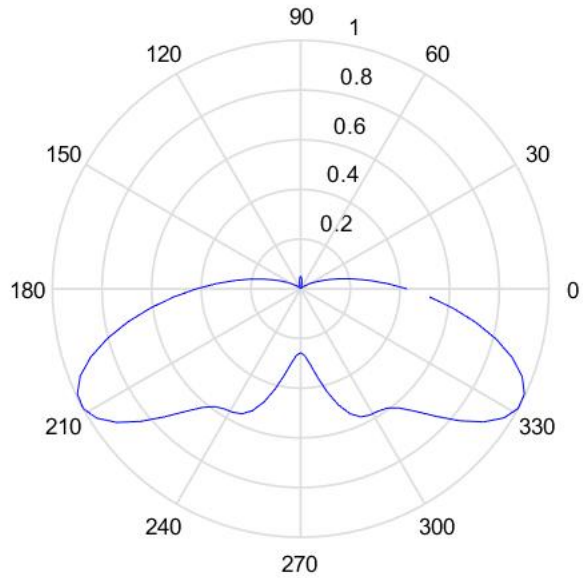


FIGURE 3.8 – Champ électrique d'une antenne avec 4 dipôles centrés

Radiateur composé de 7 dipôles centrés.

La Fig. 3.9 présente le radiateur parasite. La situation présentée sur la Fig. 3.10 est composée des éléments de base et de 7 dipôles centrés sur l'antenne. Chaque dipôle est séparé de l'autre de 0,8 cm.

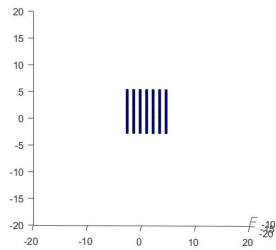


FIGURE 3.9 – Radiateur composé de 7 dipôles

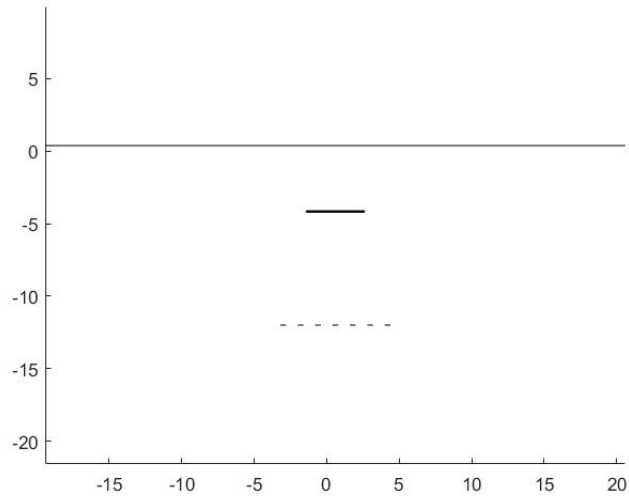


FIGURE 3.10 – Situation : 7 dipôles centrés sur l'antenne

La Fig. 3.11 présente le champ électrique de l'antenne en présence de 7 dipôles centrés. Le champ électrique est atténué dans la direction du radiateur parasite. Il est symétrique et présente maintenant deux lobes principaux dans les directions $\theta = 205^\circ$ et $\theta = 335^\circ$ et deux lobes secondaires dans les directions $\theta = 245^\circ$ et $\theta = 295^\circ$. L'angle d'ouverture des lobes principaux est de 40° et celle des lobes secondaire est de 30° .

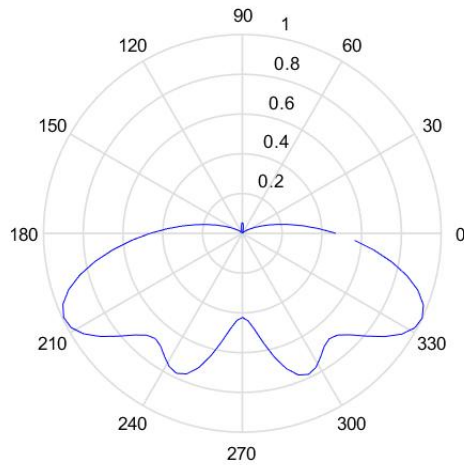


FIGURE 3.11 – Champ électrique d'une antenne avec 7 dipôles centrés

Radiateur composé de 12 dipôles centrés.

La Fig. 3.12 présente le radiateur parasite qui est centré sur l'antenne. La situation présentée sur la Fig. 3.13 est composée des éléments de base et de 12 dipôles. Ils sont séparés les uns des autres de 2cm.

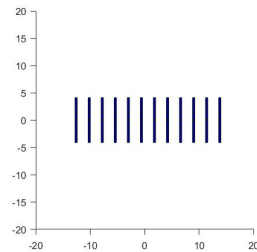


FIGURE 3.12 – Radiateur composé de 12 dipôles

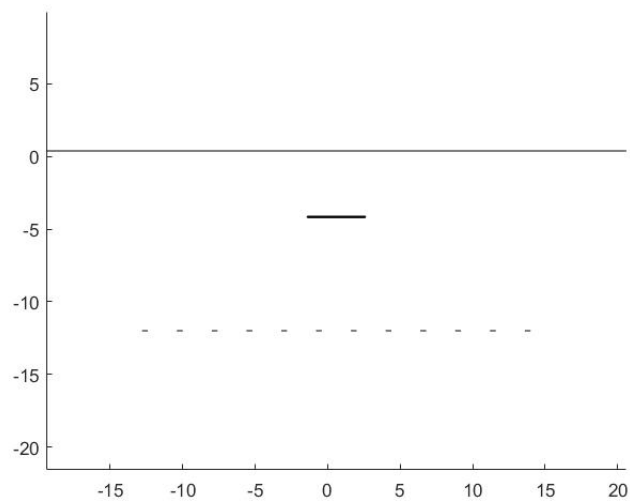


FIGURE 3.13 – Situation : 12 dipôles centrés sur l'antenne

La Fig. 3.14 présente le champ électrique de l'antenne en présence de 12 dipôles centrés. Le champ électrique est atténué dans la direction du radiateur parasite. Il est symétrique et présente maintenant deux lobes principaux dans les directions $\theta = 240^\circ$ et $\theta = 300^\circ$. Leur angle d'ouverture est de 20° . Cette configuration du radiateur auxiliaire va permettre de diminuer le champ électrique dans son champ de vision et d'augmenter l'intensité du champ électrique dans deux autres directions. L'antenne devient bidirectionnelle.

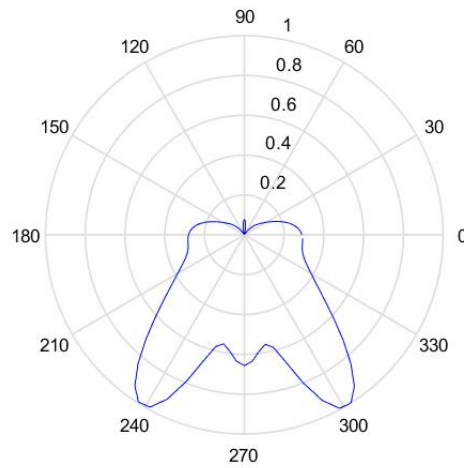


FIGURE 3.14 – Champ électrique d'une antenne avec 12 dipôles centrés

Radiateur composé de 4 dipôles sur 3 étages centrés.

La Fig. 3.15 présente le radiateur parasite. La situation présentée sur la Fig. 3.16 est composée des éléments de base et de 4 dipôles sur 3 étages centrés sur l'antenne.

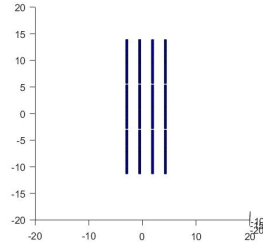


FIGURE 3.15 – Radiateur composé de 4 dipôles sur 3 étages

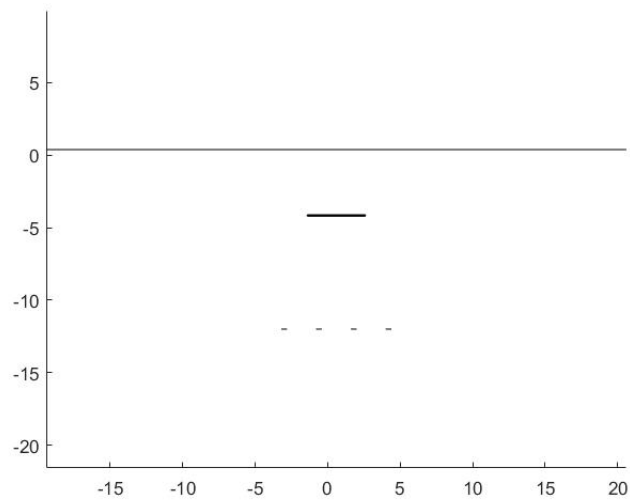


FIGURE 3.16 – Situation : 4 dipôles sur 3 étages centrés sur l'antenne

La Fig. 3.17 présente le champ électrique de l'antenne en présence de 3 étages de 4 dipôles centrés. Le champ électrique est atténué dans la direction du dipôle. Il est symétrique et présente maintenant deux lobes dans les directions $\theta = 205^\circ$ et $\theta = 335^\circ$. Leur angle d'ouverture est de 20° . L'antenne devient bidirectionnelle.

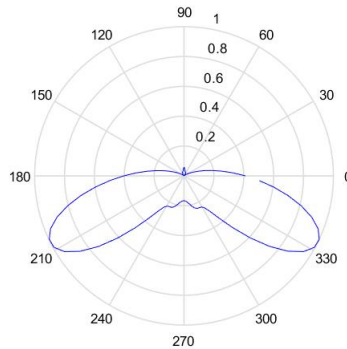


FIGURE 3.17 – Champ électrique d'une antenne avec 4 dipôles sur 3 étages centrés

Analyse des simulations

La mise en présence d'un radiateur auxiliaire et d'une antenne émettrice va permettre de modéliser le diagramme de rayonnement du dispositif. Les dipôles vont influencer la directivité de l'antenne et la direction d'émission de celle-ci. L'atténuation dans la direction principale de l'élément de base va être plus ou moins forte en fonction du nombre de dipôles et de leur espacement. La modification du diagramme de rayonnement de l'antenne par un radiateur auxiliaire est possible grâce à un couplage mutuel entre l'antenne et les parasites mis en résonance par le champ électrique émis par l'antenne.

La configuration du radiateur parasite qui a le plus modifié le diagramme de rayonnement est celle comportant 3 étages de 4 dipôles. En effet, cette situation présente un diagramme avec une forte directivité dans 2 directions différentes et une atténuation importante dans le champ de vision de l'antenne.

Des dispositions sont encore à étudier comme par exemple 4 dipôles dont chacun des dipôles a une impédance différente. Le changement d'impédance est possible grâce à l'utilisation d'une impédance qui varie électroniquement comme présentée plus tard dans le chapitre 4 : Mesures.

3.2 Étude de la reconfiguration d'une antenne optimisée

Dans cette section, l'amplitude du champ électrique (en $\frac{dB\mu}{m}$), calculé par des simulations de tracé de rayon, sera comparée dans un environnement réaliste. La zone étudiée est composée des bâtiments avoisinant la Place Eugène Flagey à Bruxelles. Dans cet environnement, le champ électrique émis par l'antenne située sur un le bâtiment 286 de la chaussée d'Ixelles à Ixelles (représentée par un point bleu sur la Fig. 3.18) est étudié dans la suite de cette section. Afin de pouvoir

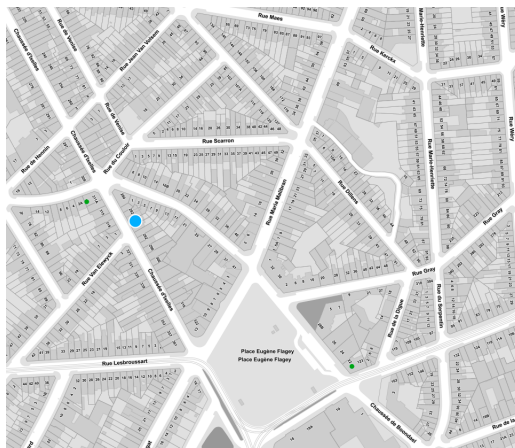


FIGURE 3.18 – Vue aérienne de la place Eugène Flagey [2]

simuler le champ électrique dans son contexte réel, les différents bâtiments ont été reproduits dans le logiciel de simulation (tracé de rayon) afin de pouvoir déterminer les différentes interactions entre les ondes électromagnétiques et les obstacles présents dans la zone. Cette cartographie est reprise à la Fig. 3.19. La direction de l'antenne étudiée est celle nommée BS1 et son champ de vision est défini par la flèche bleue.

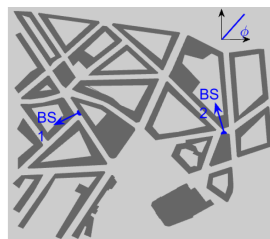


FIGURE 3.19 – Vue aérienne de la géométrie du scénario étudié avec les bâtiments (gris) et deux antennes de Base (bleue point-flèche)[1]

Dans ce scénario, un diagramme de rayonnement optimal a été calculé dans l'article [1] et il est représenté par BSWP (en rouge) sur la Fig. 3.20. Ce résultat a été obtenu grâce à la juxtaposition d'un radiateur auxiliaire de charges parasites dans le champ de vision de l'antenne de base. Pour ce qui du diagramme de rayonnement BS (en bleu), il représente celui de l'antenne de base sans parasites.

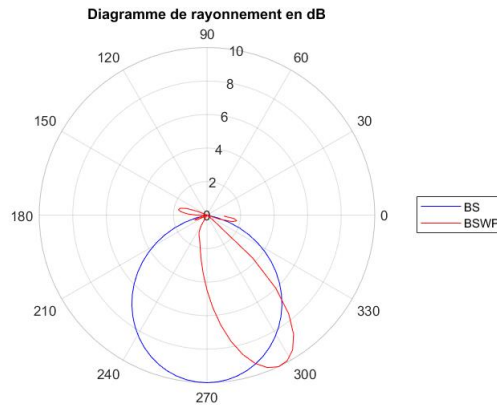


FIGURE 3.20 – Diagramme de rayonnement d'une antenne de base en dB à 1800 MHz

L'addition d'éléments parasites dans le champ de vision de l'antenne permet de façonner et de diriger le diagramme de rayonnement de l'antenne située en BS1. Dans ce contexte, en gardant la même champ de vision que l'antenne de départ (BS), son champ maximal sera tourné de 25 degré par rapport au pointage de base comme présenté par BSWP sur la Fig.1.3.

Dans la suite de cette section, le niveau de champ électrique sera étudié avec différents dépointages par rapport à l'antenne optimale BSWP (avec parasites) et $G(\theta, \phi)$ représentera son diagramme de rayonnement.

3.2.1 Le tracé de faisceau

Le logiciel de tracé de faisceau, conçu par l'UCL, va permettre de caractériser les faisceaux qui sont envoyés d'un émetteur vers un récepteur. Chaque rayon est pondéré en fonction des atténuations qu'il a subi sur son trajet. Les atténuations résultent de la longueur du chemin ainsi que du type d'interaction que le rayon a rencontré sur son chemin entre l'émetteur et le récepteur. La mise en place des diffractions et des diffusions au sein d'un logiciel n'est pas une chose aisée. Dans cet outil de modélisation des champs électriques, une méthode de tracé de rayon va être utilisée. Cette méthode considère que chaque onde électromagnétique sortant de l'émetteur est un envoi de faisceau.

Le cas étudié dans les sections suivantes est présenté sur les Fig. 3.21 et 3.22. Les faisceaux y sont représentés de différentes couleurs et partant d'une antenne émettrice apposée sur la façade d'un bâtiment de la chaussée d'Ixelles. Ces faisceaux vont être réfléchis, diffractés, diffusés en fonction des obstacles qu'ils vont rencontrer dans l'environnement de l'antenne. Grâce à toutes ces atténuations et les caractéristiques de l'émetteur et du récepteur, le champ électrique résultant va pouvoir être calculé comme le présente les sections suivantes.

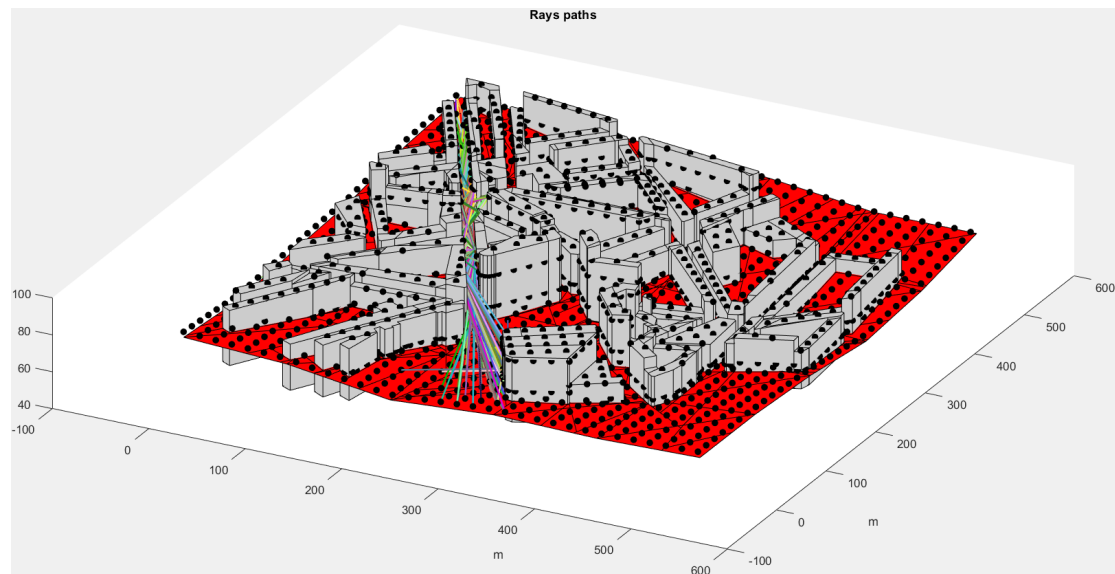


FIGURE 3.21 – Représentation du cas de tracé de rayon aux abords de la Place Eugène Flagey

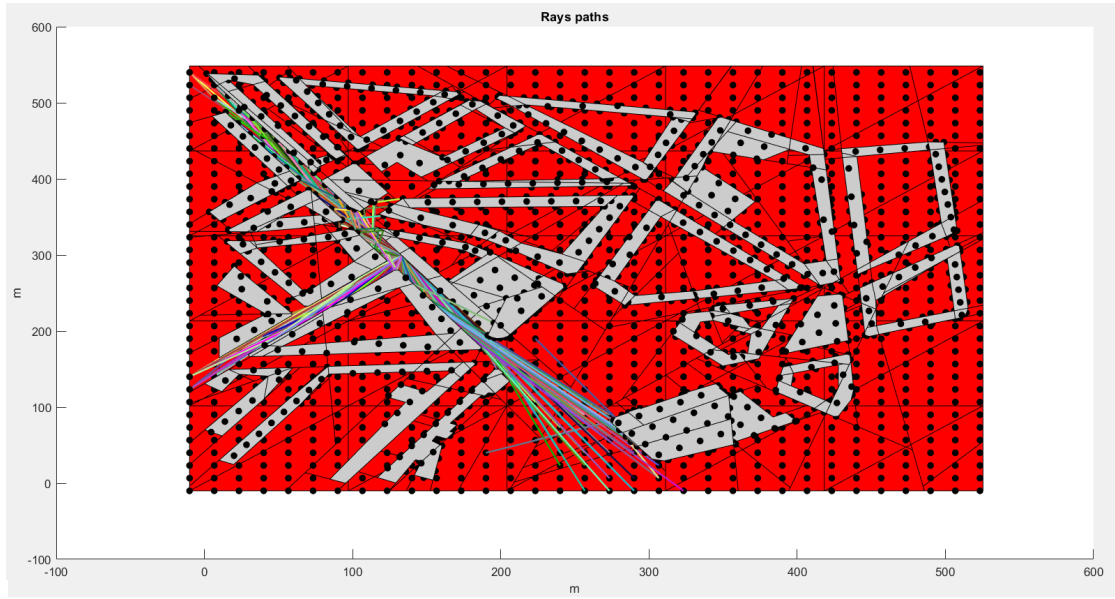


FIGURE 3.22 – Représentation du cas de tracé de rayon aux abords de la Place Eugène Flagey

3.2.2 Calcul du champ électrique d'une antenne

Pour calculer le champ électrique d'une antenne, il faut dans un premier temps connaître son diagramme de rayonnement ($G(\theta, \phi)$). Dans un deuxième temps, le niveau de chacun des champ électriques arrivant dans le diagramme de rayonnement de l'antenne réceptrice ($\alpha(\theta, \phi)$). Enfin, le champ électrique (E) est alors calculé par l'équation 3.1 :

$$E = \sum G(\theta, \phi) * \alpha(\theta, \phi) \quad (3.1)$$

Les angles θ et ϕ correspondent respectivement à l'azimut et à l'élévation. Cette formule permet de connaître à n'importe quel endroit de la zone étudiée, le champ électrique dans le scénario de l'antenne sur la chaussée d'Ixelles. $G(\theta, \phi)$ est connu par le design intrinsèque de l'antenne. Le $\alpha(\theta, \phi)$ est calculé à l'aide de simulation de tracé de rayon dans la zone de l'antenne et il correspond à l'équation 3.2. La simulation prend en compte les diffractions, réfractions, absorptions des ondes électromagnétiques dans le scénario étudié.

$$\alpha(\theta, \phi) = \sqrt{E_{\phi_x}^2 + E_{\phi_z}^2} + \sqrt{E_{\theta_x}^2 + E_{\theta_z}^2} \quad (3.2)$$

où E_{ϕ_x} correspond à la composante de l'élévation du champ E en X , E_{ϕ_z} correspond à la composante de l'élévation du champ E en Z , E_{θ_x} correspond à la composante de l'azimut du champ E en X , E_{θ_z} correspond à la composante de l'azimut du champ E en Z .

Le dépointage

Le dépointage d'une antenne est un effet causé par une perturbation de l'environnement de l'antenne comme la présence de vent. Cet effet résulte d'une déviation angulaire du champ de vision de l'antenne. Dans la sous-section 3.2.3, la réceptivité de l'antenne face à ce phénomène sera étudiée, considéré comme sa résilience au dépointage.

Afin d'étudier l'effet du dépointage sur l'antenne avec des éléments parasites, il est important de recalculer le champ électrique (E) pour chaque degré de dépointage possible. Dans la section 3.2.3, la sensibilité au dépointage en azimuth (θ) sera mesurée pour une élévation fixée ($\phi=0$ degré). L'équation 3.1 devient 3.3 lorsqu'un dépointage en azimuth de $\Delta \theta$ est introduit.

$$E = \sum G(\theta + \Delta\theta, 0) * \alpha(\theta, 0) \quad (3.3)$$

3.2.3 Comparaison du champ électrique d'antennes à l'aide de leur CDF

Afin de comparer le niveau électrique d'une antenne en la dépointant par rapport à son champ de vision original, la fonction de répartition (CDF) sera calculée. La CDF permet de calculer la probabilité cumulée de la valeur du champ électrique mesurée dans l'environnement de l'antenne. La probabilité cumulée est utilisée pour comparer les niveaux de champ pour les différentes configurations du diagramme de rayonnement de l'antenne à savoir, ceux de l'antenne d'origine, lorsqu'ils ont été optimisés à l'aide de parasites et enfin ceux de l'antenne avec parasites mais dépointée.

Comparaison des CDFs obtenues pour la diagramme initiale (BS) et le diagramme de rayonnement modulé de l'antenne (BSWP) pour l'antenne placée en BS1

La comparaison présentée à la Fig. 3.23 est faite entre les CDFs du niveau du champ électrique obtenu avec le diagramme initial (BS originale) et avec le modulé de la station située en BS1. Cela confirme une amélioration de la couverture de la zone puisque la CDF de l'antenne avec radiateur parasite est décalée vers la droite de la CDF de l'antenne de base d'approximativement 3-4 *dB*.

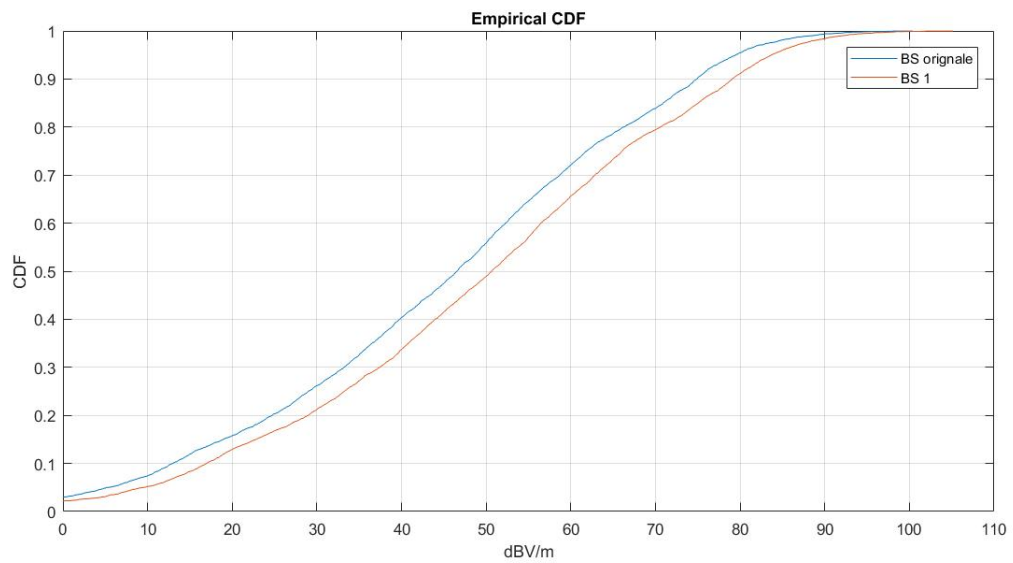


FIGURE 3.23 – CDF du niveau du champ de l'antenne de base et de l'antenne avec des éléments parasites pour BS1

Comparaison entre la CDF obtenue pour le diagramme de rayonnement modulé de l'antenne (BSWP) et celle obtenue pour le même diagramme dépointé de +5/-5 degrés pour l'antenne située en BS1

La comparaison présentée à la Fig. 3.24 est faite entre les CDFs du niveau du champ électrique obtenu avec le diagramme modulé de la station située en BS1 et pour le même diagramme mais dépointé de 5 degrés à gauche et à droite du champ de vision.

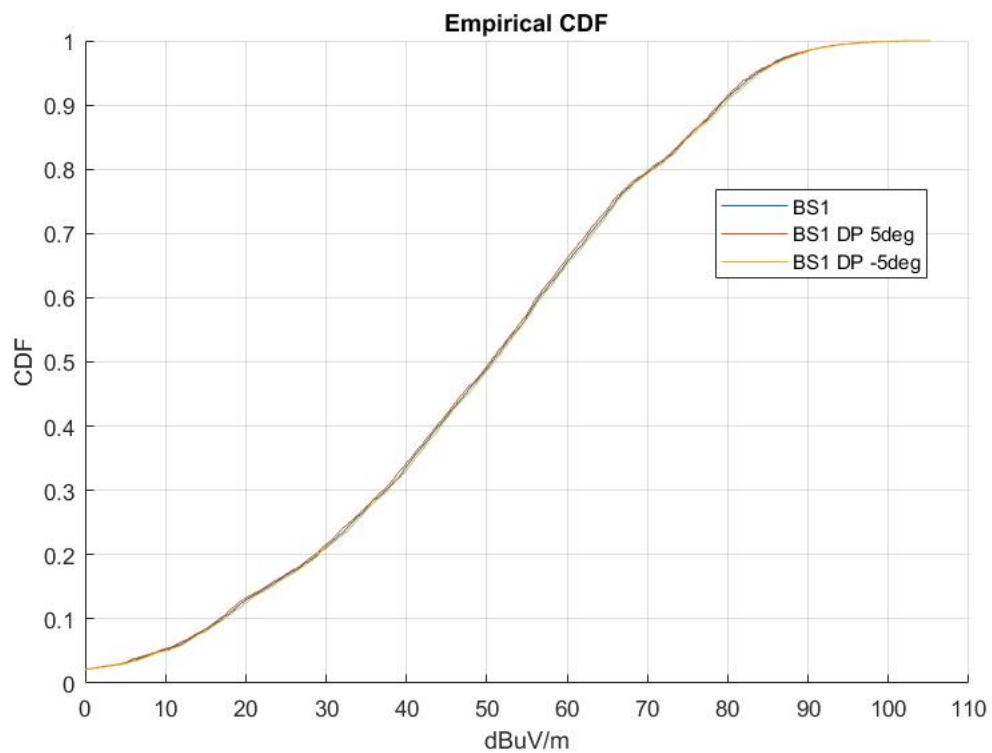


FIGURE 3.24 – CDF du niveau du champ de l'antenne avec des éléments parasites et de cette même antenne dépointée de +5/-5 degrés pour BS1

Comparaison entre la CDF obtenue pour le diagramme de rayonnement modulé de l'antenne (BSWP) et celle obtenue pour le même diagramme dépointé de +10/-10 degrés pour l'antenne située en BS1

La comparaison présentée à la Fig. 3.25 est faite entre les CDFs du niveau du champ électrique obtenu avec le diagramme modulé de la station située en BS1 et pour le même diagramme mais dépointé de 10 degré à gauche et à droite du champ de vision.

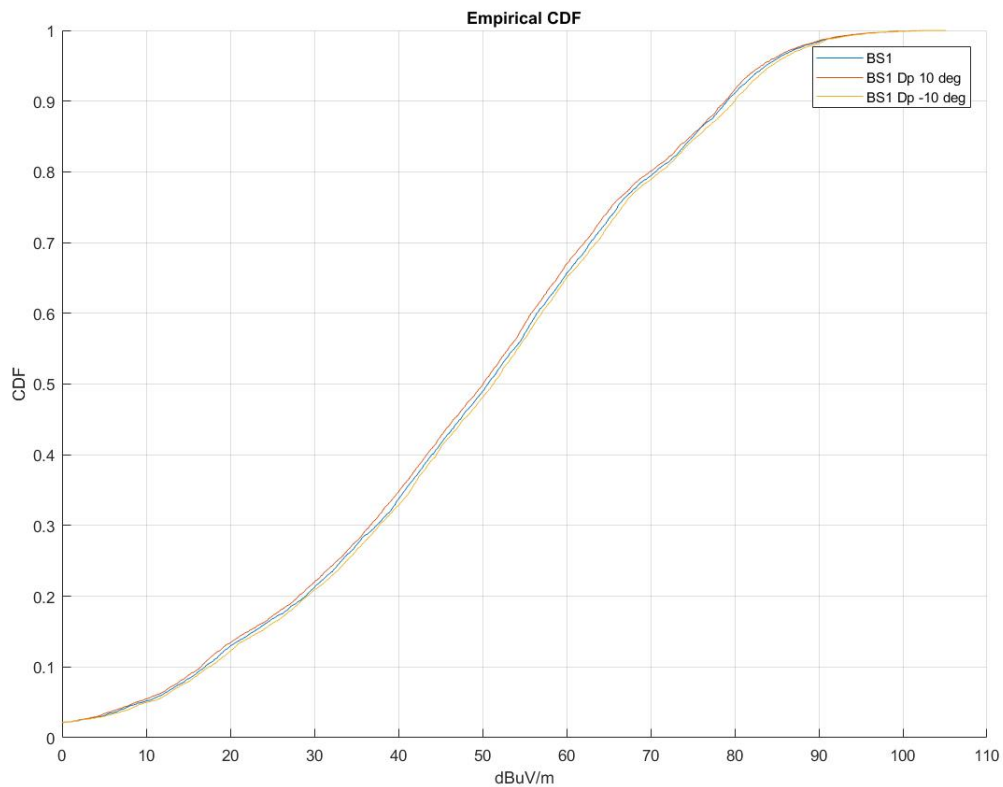


FIGURE 3.25 – CDF du niveau du champ de l'antenne avec des éléments parasites et de cette même antenne dépointée de +10/-10 degrés pour BS1

Comparaison entre la CDF obtenue pour le diagramme de rayonnement modulé de l'antenne (BSWP) et celle obtenue pour le même diagramme dépointé de +15/-15 degrés pour l'antenne située en BS1

La comparaison présentée à la Fig. 3.26 est faite entre les CDFs du niveau du champ électrique obtenu avec le diagramme modulé de la station située en BS1 et pour le même diagramme mais dépointé de 15 degré à gauche et à droite du champ de vision.

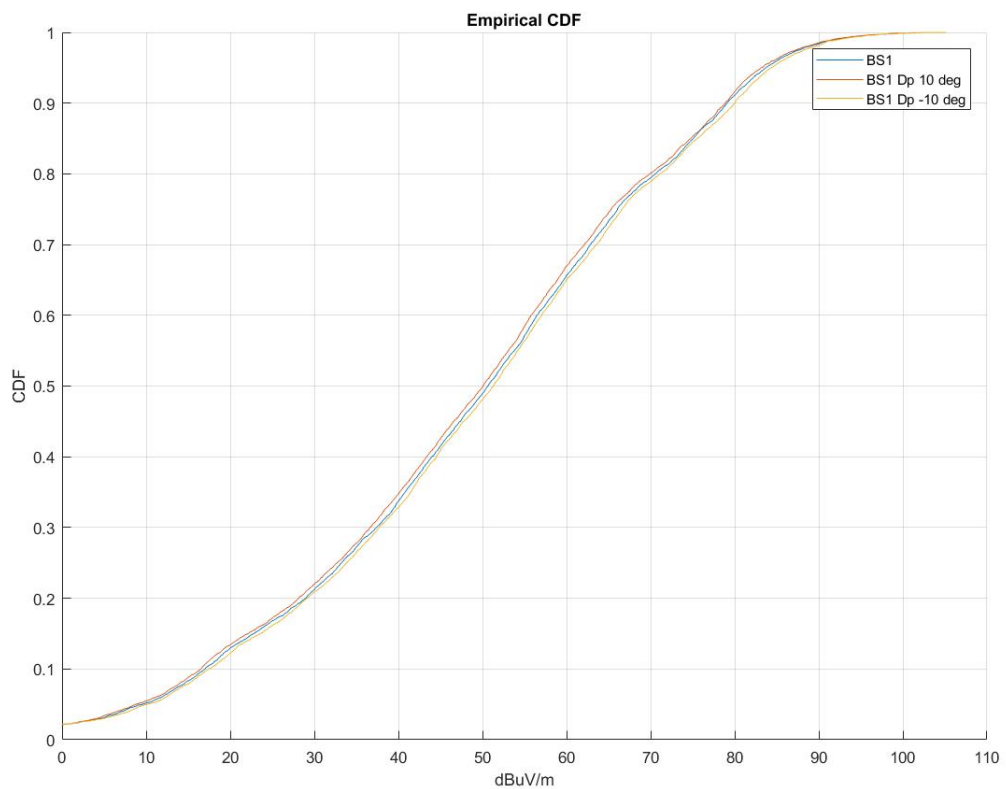


FIGURE 3.26 – CDF du niveau du champ de l'antenne avec des éléments parasites et de cette même antenne dépointée de +15/-15 degrés pour BS1

Interprétation des résultats

Le tableau 3.1 présente la valeur du niveau de champ électrique pour chacun des dépointages appliqués au diagramme de rayonnement de l'antenne optimisée (BSWP sur la figure 3.20), celui de l'antenne avec parasites. Le diagramme de rayonnement sans dépointage est repris dans le tableau 3.1 sous la valeur 0 degré. Le champ électrique a été comparé pour une valeur de la CDF en $CDF = 0,5$ ce qui permet d'être au centre de la gamme $([0,1])$ afin de minimiser les erreurs.

| Dépointage (deg) | + 15 | +10 | +5 | 0 | -5 | -10 | -15 |
|-----------------------------|-------|-----|-------|------|------|------|------|
| $CDF(0,5)(\frac{dB\mu}{m})$ | 49,68 | 50 | 50,35 | 50,6 | 50,9 | 51,3 | 51,4 |

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des niveaux du champ électrique pour une CDF fixée à 0,5 et différents dépointages

L'interprétation des résultats permet de mettre en évidence la résilience de l'antenne avec parasites au dépointage. En effet, pour une CDF de 0,5 et un dépointage allant de -15 degrés à 15 degrés par rapport au pointage de base la valeur du niveau du champ électrique ne varie que de +/- 0,8 dB.

Chapitre 4

Mesures

4.1 Inductance et Varactor

En vue de faire varier le diagramme de rayonne de l'antenne électroniquement grâce à un radiateur parasite auxiliaire, une impédance des éléments parasites qui varie électroniquement est nécessaire. Une diode Varactor a été choisie et elle est utilisée dans le sens inverse de sa polarisation. L'avantage de cette diode est que sa capacité varie en fonction du biais de tension en courant continu qui lui est appliquée. La diode MAVR-011020-1411 [13] est utilisée parce que sa gamme de capacité est de 0.19 pF à 0.025 pF correspond aux besoins définis. L'utilisation de cette diode se fera à 1800 MHz. La fiche technique [13] donne l'évolution de la valeur de la capacité en fonction de la tension en courant continu qui lui est appliquée à 1 MHz. La diode Varactor ne permet qu'une variation de l'impédance capacitive. Afin de couvrir les impédances positives et négatives, une inductance fixée est placée en série avec la diode Varactor. Cette grande inductance est placée en série avec l'alimentation en tension en courant continu afin de bloquer les courants parasites produits par la source de tension et dans le but de minimiser la diffusion provoquée par la source dans la ligne de transmission. La caractérisation du circuit formé par cette grande inductance de 32 nH en série avec la diode Varactor est présentée dans la figure 4.1 pour une fréquence de 1800 MHz.

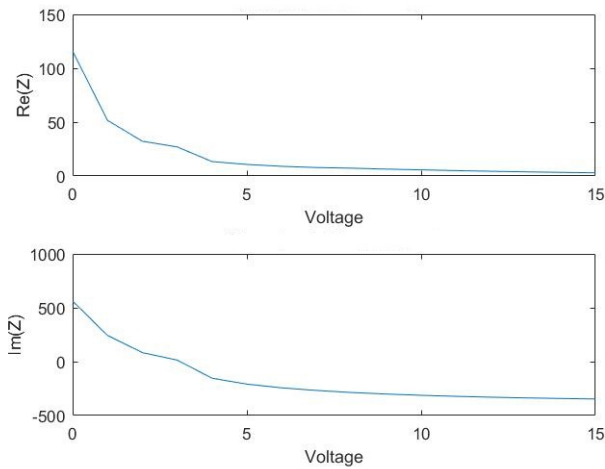


FIGURE 4.1 – Impédance mesurée du circuit à 1800 MHz

4.1.1 Méthodologie et résultats

Afin de mesurer le comportement de la Varactor mise en série avec une inductance, les mesures ont été prises à l'aide d'un VNA à une fréquence de 1800 MHz. Le VNA est un analyseur de réseau vectoriel qui permet de déterminer les paramètres S d'un circuit électrique. Dans ce cas, il est utilisé pour mesurer le paramètre S11 (coefficient de réflexion) dans le circuit composé d'une ligne de transmission à 50Ω en série avec une Varactor et une inductance.

Le post-traitement est important car il permet de changer le point de référence (Port1) de la mesure. La Fig. 4.2 présente le changement de point de référence. En effet lors de la mesure, le point de référence se situe à l'endroit où le port (qui permet la connexion avec un système de mesures (VNA)) est soudé au circuit. Grâce au post-traitement des mesures, le point de référence peut être déplacé à l'endroit de la croix sur cette même figure. Le but étant de déplacer ce point de référence de mesure entre la début de la ligne de transmission et l'endroit où l'inductance vient se souder à la ligne de transmission (matérialisé par la croix sur la Fig. 4.2). Ce changement permet d'analyser les effets de l'inductance combinée à la Varactor en minimisant les effets provoqués par la ligne de transmission.

Les mesures sont prises en faisant varier la tension de polarisation en courant continu de 0 à 15V. Cette variation fait changer la valeur mesurée de l'impédance de la Varactor.



FIGURE 4.2 – Illustration du changement de référence

Technique 1

Afin de pouvoir déplacer le point de référence en post-traitement, une ligne de transmission de 50Ω est mesurée entre le port 1 et port 2 du VNA. Ensuite, le circuit est mesuré sous différentes tensions entre 0 et 15 V à l'aide d'un T de polarisation mis en série avec le circuit comme présenté sur la Fig.4.3. Le T de polarisation permet d'alimenter la Varactor avec une tension de polarisation, tout en permettant à des signaux de haute fréquence de circuler en subissant des dégradations du signal les plus faibles possible. Le changement de point de référence est réalisé en post-traitement.

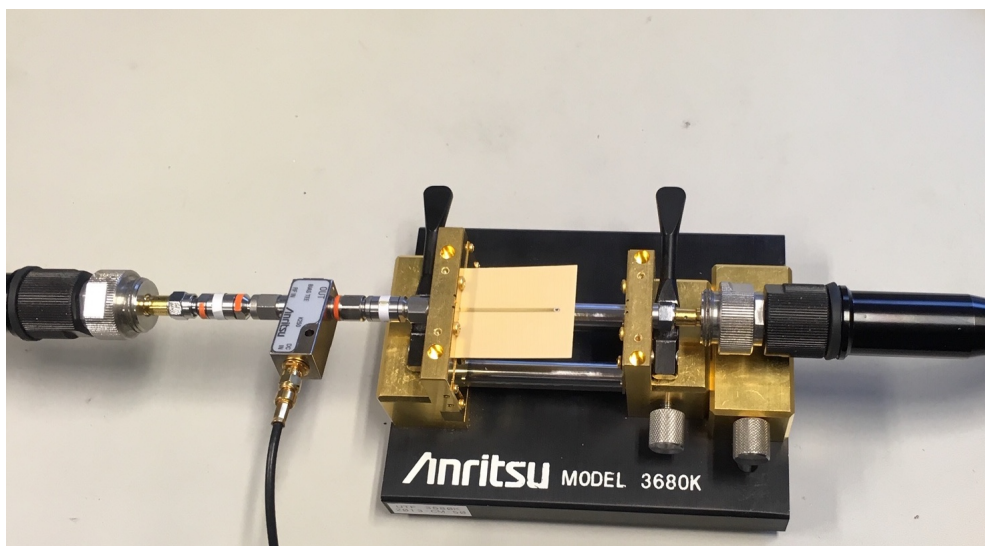


FIGURE 4.3 – Dispositif de mesure du circuit

Le changement de point de référence en post-traitement

Lors de la prise de mesures, le circuit schématique se représente comme sur la Fig. 4.4 sous la forme d'une ligne de transmission de $50\ \Omega$ terminée par une charge Z_L . Cette charge correspond à la mise en série d'une Varactor et d'une impédance.

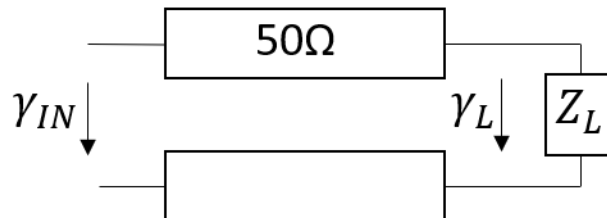


FIGURE 4.4 – Circuit schématique du circuit mesuré à 1800MHz

Le γ_{in} est mesuré à l'aide du VNA du circuit 4.4 à l'entrée du circuit. Afin de retirer l'impact de la ligne de transmission mise en série. Les paramètres S de celle-ci doivent être mesurés indépendamment. La Fig. 4.5 représente schématiquement les paramètres sur la ligne de transmission en fonction des deux ports du VNA.

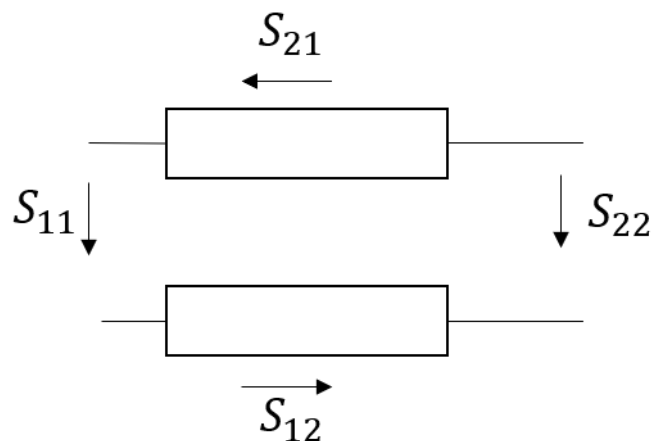


FIGURE 4.5 – Représentation de la mesure de la ligne de transmission

Les résultats des paramètres S à une fréquence de 1800 MHz sont :

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,0143457 + 0,0038520j & -0,3039570 - 0,9454727j \\ -0,3069273 - 0,9456803j & -0,0136288 - 0,0044615j \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Ces perturbations doivent être retirées du résultat afin de déterminer l'impédance de la charge Z_L . Celle-ci est déterminée par les calculs suivants.

$$\gamma_L = \frac{S_{11} - \gamma_{in}}{-\gamma_{in} * S_{22} + S_{11} * S_{22} - S_{12} * S_{21}} \quad (4.2)$$

$$Z_L = \frac{50 * (1 + \gamma_L)}{1 - \gamma_L} \quad (4.3)$$

Z_L correspond à l'impédance de la Varactor en série avec l'inductance à une tension d'alimentation en courant continu fixée. Afin de pouvoir retirer les effets capacitifs provoqués par la ligne de transmission sur les mesures d'impédances, le calcul va être réalisé à l'aide des admittances. Les effets capacitifs provoqués par la fréquence de mesures (1800 MHz) sont soustraits pour obtenir l'admittance (Y_D) qui est elle-même convertie pour obtenir l'impédance Z_D . La Fig. 4.6 présente les résultats de l'impédance de la mise en série de la diode Varactor et de l'inductance, (Z_D) du circuit qui a comme point de référence le bout de la ligne de transmission de 50 Ω (Voir section 4.1.1).

$$Z_{Lf} = \frac{-j}{2\pi * 13,06810^{-3}} \quad (4.4)$$

$$Y_D = \frac{1}{Z_L} - \frac{1}{Z_{Lf}} \quad (4.5)$$

$$Z_D = \frac{1}{Y_D} \quad (4.6)$$

Analyse des résultats obtenus

Les résultats obtenus sont présents sur la Fig. 4.6. L'impédance du circuit n'est pas tantôt positive, tantôt négative comme la théorie le préconise. Cette erreur est principalement due à la mise en série d'un T de polarisation qui, mis en série avec le circuit, permet de mesurer les paramètres S sous différentes tensions de polarisation DC.

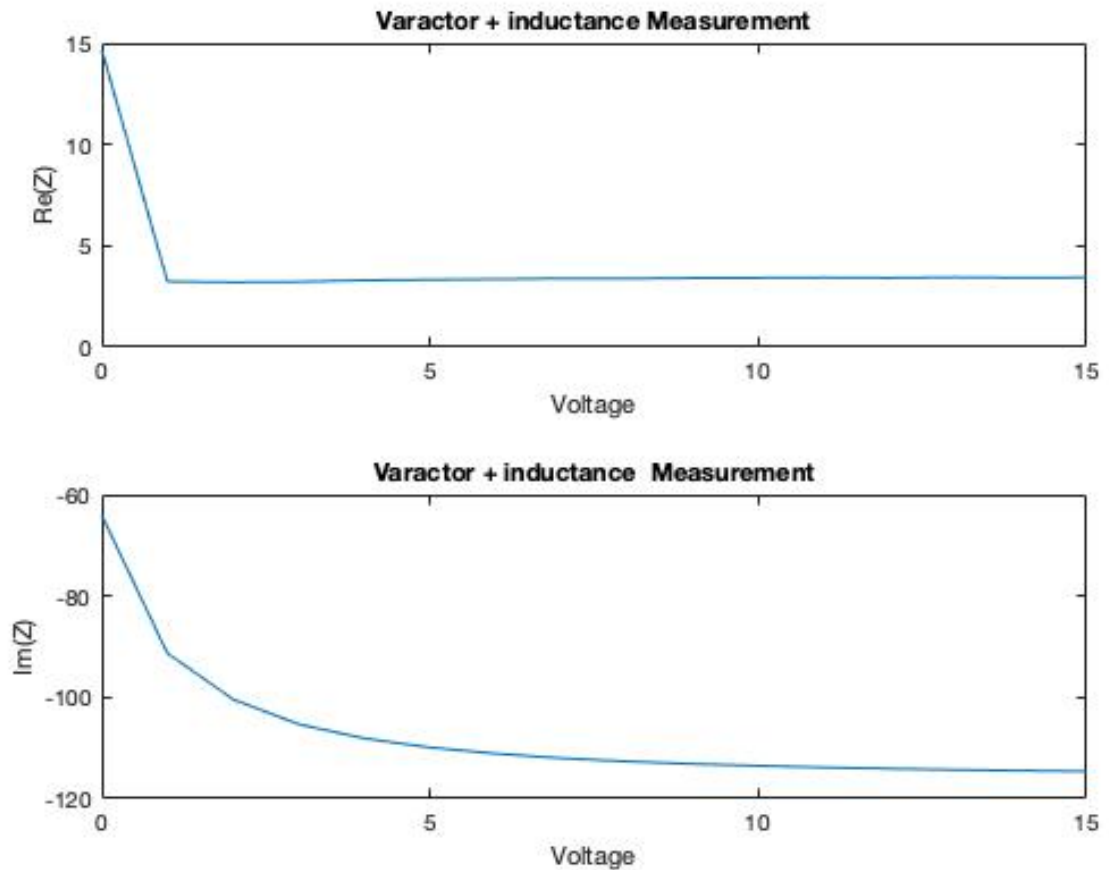


FIGURE 4.6 – Impédance mesurée du circuit à 1800 MHz

Technique 2

Dans cette deuxième technique, un VNA intégrant directement une source de tension de polarisation DC. Le point de référence est modifié directement lors de la calibration du système de mesure (VNA). Les résultats sont concluants et ils sont présentés à la Fig. 4.7. En effet, ils présentent bien les effets de la combinaison entre une Varactor et une grande inductance. L'impédance imaginaire passe de inductive à capacitive à de 0 à 15 V.

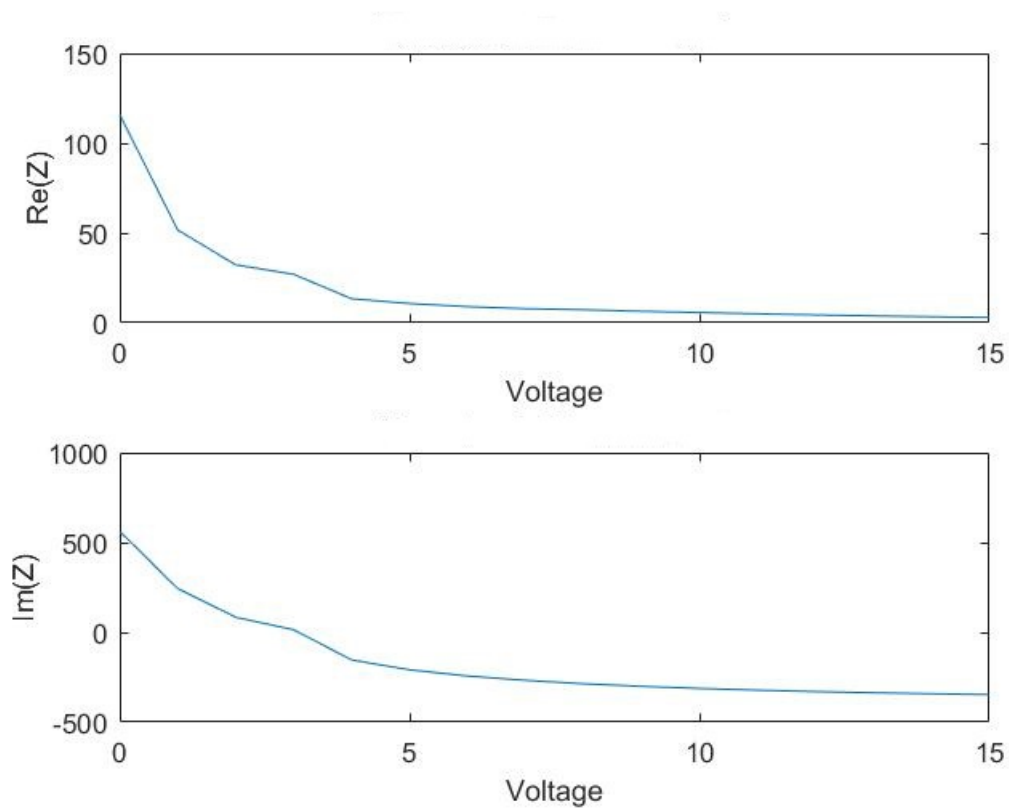


FIGURE 4.7 – Impédance mesurée du circuit à 1800 MHz

Conclusion

Pouvons-nous protéger l'être humain des ondes électromagnétiques ? Il est difficile à ce jour de répondre totalement à cette interrogation. Toutefois, les avancées technologiques nous permettent non pas de protéger l'être humain des ondes mais de diminuer l'exposition de notre corps à cet environnement. Au cours de mon étude, j'ai axé mes analyses sur l'élaboration d'une antenne qui pourrait être adapté à tout type de situations. Les antennes actuelles présentent un champ électrique qui surexpose la zone située dans le champ de vision de l'antenne tandis que les autres zones, dans lesquelles les ondes radio ne sont pas bien propagées, ont une exposition plus faible. Les antennes-relais sont composées d'une mise en réseau d'antenne avec un écran réflecteur placé à l'opposé du champ de vision de ces antennes. Elles doivent respecter les bandes de fréquence allouées par l'IBPT. Ces bandes se trouvent autour de 900 MHz et 1800 MHz pour les communications 4G/LTE.

Un moyen efficace de gérer cette surexposition est l'utilisation d'une antenne modifiable ou plutôt équipée de radiateur composé de dipôles dont les charges sont modifiables électroniquement. J'ai conçu une antenne-relais double bande afin de tester différents radiateurs auxiliaires créant différents diagrammes de rayonnement. Cette antenne est composée d'un élément central résonant dans la bande supérieure, et qui est alimenté par un câble coaxial. L'élément de haute fréquence crée un champ électrique qui met en résonance les éléments parasites et qui permettent à l'antenne d'émettre en basse fréquence également. Grâce à cette interaction, l'antenne double bande respecte les bandes de fréquence allouées à la 4G/LTE. Le dimensionnement de cette antenne a été étudié afin de faciliter sa mise en réseau, débouchant sur la construction d'une antenne-relais.

Nous savons maintenant que, diminuer l'exposition des objets et des personnes aux ondes électromagnétiques peut passer par la modification du diagramme de rayonnement de l'antenne. La mise en place d'un radiateur auxiliaire dans le champ de vision de l'antenne a ainsi été étudié sous différentes formes. Ce radiateur auxiliaire est composé de différents dipôles dont les impédances peuvent être modifiées

électroniquement. L'impédance du dipôle est créée par la mise en série d'une diode Varactor et d'une inductance.

Cette combinaison permet de modifier l'impédance en fonction de la tension de polarisation DC qui est appliquée à la Varactor. Cette impédance passe d'inductive à capacitive sur une gamme de tension de 0 à 15 V.

Il apparaît clairement qu'un radiateur auxiliaire placé dans le champ de vision d'une antenne permet de modifier le diagramme de rayonnement, comme décrit dans le chapitre 3. Ce diagramme de rayonnement dépend essentiellement de la composition de son radiateur et modifiera ainsi le rayonnement de l'antenne. Par exemple, une antenne bidirectionnelle a été créée à partir d'une antenne conçue mono-directionnelle. Cette technique laisse l'opportunité à de nombreuses conceptions de diagramme de rayonnement pour une même antenne initiale.

Grâce à la mise en situation réelle d'une antenne apposée sur la façade d'un bâtiment sis à la Chaussée D'Ixelles à Ixelles, j'ai pu modifier le diagramme de rayonnement et optimiser son efficacité dans son environnement. L'étude portait sur le calcul de son champ électrique et la perturbation au dépointage de l'antenne par rapport à son champ de vision initial. La présence du radiateur auxiliaire est résiliante dans le cas d'un dépointage. En effet, lorsqu'un dépointage de 15 degrés est provoqué, la CDF du champ électrique en 0,5 ne varie que de 0,8 dB.

Pour conclure, l'étude réalisée sur l'optimisation des antennes-relais en vue de réduire l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques dans les réseaux cellulaires est possible grâce à l'utilisation de la technique des radiateurs auxiliaires. Ils permettent de créer une plus grande homogénéité de l'exposition au réseau cellulaire sans modifier significativement la qualité de service de communication.

L'être humain n'a pas le choix d'être ou non pas exposé aux émissions d'une antenne-relais car elles sont aujourd'hui présentes partout. Ce mémoire nous amène à résoudre la problématique de cette exposition par la réalisation d'antennes qui permettent de réguler l'intensité de son champ électrique. Toutefois l'être humain reste libre d'utiliser certaines antennes. En effet, ils pourront réduire l'utilisation de son smartphone qui lui se situe en contact direct avec son corps ou utiliser une oreillette pour limiter la proximité avec le cerveau. Il y aurait là une étude plus vaste encore à mener.

Bibliographie

- [1] N. Goreux D. Vanhoenacker-Janvier C. Oestges H. A. Kayani, Q. Gueuning and C. Craeye. Reconfigurable Cellular Base station Antenna Consisting of Parasitic Radiators. Aout 2019.
- [2] Cartes des antennes émettrices. <https://geodata.environnement.brussels/client/view/3a33e35f-6b64-4b28-bb50-5b4c6b7cb29c>. Accédé : 2020-05-24.
- [3] l'Institut belge des services postaux et des télécommunications. "plan des fréquences". <https://www.ibpt.be/operateurs/plan-des-frequences>, 20-03-2020. "Le plan de fréquences belge".
- [4] Walton C.gibson. The method of moments in electromagnetics, chapman hall/crc. 2008.
- [5] C.I.P. "Fiche technique du FR4". <https://www.farnell.com/datasheets/1644697.pdf>, 2020. Fiche technique.
- [6] H. Kanaya K. Yoshida A. Ishikawa S. Fukagawa A.Tahira H. Urabe, R. K. Pokharel. Design and performance of 800mhz/2ghz dual band small planar antenna. janvier 2010.
- [7] KazuhiroHayakawa Keiji Yoshida Haruichi Kanaya, Daisuke Kanemoto. Multi-band miniaturized slot antenna with two-stage bandpass filter. 2013.
- [8] Senior Member IEEE YueHui Cui, RongLin Li and Peng Wang. Novel dual-broadband planar antenna and its array for 2g/3g/lte base stations. 2012.
- [9] Gang Zhao Guanfeng Cui, Shi-Gang Zhou and Shu-Xi Gong. A compact dual-band dual-polarized antenna for base station application. 2016.
- [10] HUBER et SUHNER. "coaxial cable : Rg316u ". <http://www.electroncom.ru/pdf/hs/cable/rg316u.pdf>, 2020. *Fichetechnique*.
- [11] D. Pozar. *Microwave Engineering, 4th edition*. Wiley, 2011.
- [12] E. G. Cimen B. S. Yarman A. Rydberg P. Lindberg, M. Sengul and A. Aksen. A single matching network design for a dual band pifa antenna viasimplified real frequency technique.

- [13] MACOM. "solderable gaas constant gamma flip-chip varactor diode mavr-011020-1411". <http://cdn.macom.com/datasheets/mavr-011020-1411.pdf>, 2017. Data sheet.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl