

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : télécommunications.

**Spécialité** : Système des télécommunications.

**Par** : NEKKACHE Abderrahmen.

### Sujet

*Etude et conception d'un système multi-antennaire MIMO ULB.*

Soutenu publiquement, le 25 / 06 / 2018 , devant le jury composé de :

**Mr. DJEMAI Abderrazak.**

MCB

Univ. Tlemcen

Président

**Mme. BELHADEF Yamina.**

MCB

Univ. Tlemcen

Examineur

**Mr. BOUACHA Abdelhafid.**

MCA

Univ. Tlemcen

encadreur



# **REMERCIEMENTS**

*A Mon Encadreur*

***Mr. Bouacha Abdedelhafid***  
*(MCA, Université de Tlemcen)*

*Votre compétence, votre encadrement as toujours suscité mon profond  
respect.*

*Je vous remercie infiniment pour votre accueil et votre patience ainsi que  
votre confiance et vos conseils.*

*Veillez trouver, dans ces modestes mots, l'expression de ma plus haute  
considération et mes profonds respects ainsi que ma grande estime.*

*Aux membres du jury*

***Président du Jury : Mr. DJEMAI ABDERRAZAK.***  
*(MCB, Université de Tlemcen)*

***Examineur : Mm. BELHADEF Yamina.***  
*(MCB, Université de Tlemcen)*

*Monsieur madame les jurys, vous m'avez fait un grand honneur en  
acceptant d'évaluer ce mémoire.*

*Je vous remercie fortement d'avoir eu la gentillesse de bien vouloir  
juger mon travail.*

*Je tien à vous exprimer mes profondes gratitude et mes sentiments les  
plus respectueux*



# ***DEDICACES***

## *Je dédie ce travail*

### *A Dieu.*

*Pour être mon appui, mon repère, ma solution et mon éternel espoir.*

*Pour la force qu'il me donne, et qu'il donne aux personnes qui m'ont aidé et soutenu. Merci pour toutes les fois où je vous aie imploré et vous m'avez exaucé. Et la meilleure des récompenses sera de voir un jour votre visage plein de Majesté.*

### *A ma mère.*

*Tu présentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, tu es ma source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'ont pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, je te remercie infiniment pour tes énormes sacrifices que je ne pourrai jamais rendre, que Dieu te garde maman.*

### *A mon petit frère Mehdi.*

*Tu représentes mon cœur mon rayon de soleils ma joies et mes plus beaux moment que dieux te garde mon frère.*

### *A toute ma famille.*

*En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

### *A mes frères et sœurs.*

*Nihelus et Chemssedine, On a passé des moments inoubliables plein d'humour et de confiance et fidélité, je vous remercie pour votre aide et vos encouragements.*

### *A mes chers amis intimes.*

*Yahya Mouhamed Amine Boudghen Mekhzem Samad Yasmine Bouchra Karam et Oussama nous n'étions Jamais considérés comme étant des amis, on formé une personne très spéciale avec une très forte personnalité et solidité. Je vous remercie infiniment pour votre aide ainsi que vos encouragements et votre fidélité.*



## Résumé

La demande de transmissions à débits de plus en plus élevés s'accroît davantage avec l'essor de nouveaux services dans les réseaux de communication sans fils. Pour répondre à cette demande, une solution consiste à augmenter la capacité de transmission du canal radio-fréquence entre la station de base et le terminal portable. Ceci peut être réalisé en augmentant le nombre d'éléments rayonnants impliqués à l'émission et à la réception de cette liaison radio-fréquence : on parle alors de technique MIMO (Multiple Input, Multiple Output).

Ce travail porte principalement sur la conception et l'optimisation de systèmes multi-antennaires pour techniques de diversité et MIMO avec l'outil de simulation CST. L'objectif final est de pouvoir proposer une structure multi-antennaires Ultra Large Bande pour des petits objets communicants.

**Mots clés :** Antennes imprimées, systèmes multi-antennaires, Diversité, Multiple Input Multiple Output (MIMO), antenne ultra large bande.

## Abstract

The transmission demand for increasing data rate becomes more and more important with the development of new services in radio communication networks. To answer to this demand, one solution consists in increasing the transmission capacity of the radio channel between the base station and the handset terminal. This can be realized by increasing the number of radiating elements involved in the transmission and the reception of this radio link: we talk about MIMO (Multiple Input Multiple Output) technique.

The work realized in this document concerns, optimization and characterization of multi-antenna systems for MIMO and diversity techniques with CST simulation tool. The main goal is to propose Ultra-wideband (UWB) MIMO antenna used for small communicant's objects.

**Key words:** Printed antennas, Multiple Input Multiple Output (MIMO), diversity, Ultra-wideband (UWB).





## Table des matières

### **Chapitre I : Système multi-antennaires.**

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction .....                                               | 4  |
| I.2 Diversité des systèmes multi-antennaires.....                    | 4  |
| I.2.1 Principe de la diversité .....                                 | 4  |
| I.2.2 Micro-diversité .....                                          | 5  |
| I.2.3 Macro-diversité .....                                          | 6  |
| I.2.4 Techniques de combinaisons de diversité .....                  | 7  |
| I.2.4.1 Combinaison par commutation .....                            | 8  |
| I.2.4.2 Combinaison par sélection .....                              | 9  |
| I.2.4.3 Combinaison par gain égal .....                              | 10 |
| I.2.4.4 Combinaison par rapport maximal .....                        | 10 |
| I.2.5 Gain en diversité et corrélation .....                         | 11 |
| I.2.5.1 Gain en diversité.....                                       | 11 |
| I.2.5.2 Corrélation.....                                             | 13 |
| I.2.5.3 Rapport de puissance de branche et gain effectif moyen ..... | 14 |
| I.3 Systèmes MIMO.....                                               | 15 |
| I.3.1 Intérêt des systèmes MIMO .....                                | 15 |
| I.3.2 Modèle du canal MIMO .....                                     | 16 |
| I.3.3 Capacité du canal.....                                         | 17 |
| I.3.4 Multiplexage spatial .....                                     | 18 |
| I.3.5 Codage spatio-temporel.....                                    | 19 |
| I.4 Conclusion.....                                                  | 20 |

### **Chapitre II : Antennes & technologie Ultra Large Bande.**

|                              |    |
|------------------------------|----|
| II.2 Antennes imprimées..... | 22 |
| II.2.1 Description .....     | 22 |
| II.2.2 Applications .....    | 23 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.3 Avantages et Inconvénients .....                                      | 24 |
| II.2.3.1 Avantage des antennes imprimées .....                               | 24 |
| II.2.3.2 Inconvénients des antennes imprimées .....                          | 24 |
| II.2.4 Techniques d'alimentation .....                                       | 24 |
| II.2.4.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban .....                | 25 |
| II.2.4.2 Alimentation par une ligne coaxiale .....                           | 25 |
| II.2.4.3 Alimentation par fente .....                                        | 26 |
| II.2.4.4 Alimentation par guides d'ondes coplanaires .....                   | 26 |
| II.2.5 Caractéristiques des antennes imprimées.....                          | 27 |
| II.2.5.1 Impédance d'entrée de l'antenne .....                               | 27 |
| II.2.5.2 Coefficient de réflexion .....                                      | 27 |
| II.2.5.3 Directivité.....                                                    | 28 |
| II.2.5.4 Gain.....                                                           | 28 |
| II.2.5.5 Diagramme de rayonnement .....                                      | 28 |
| II.3 Technologie ultra large bande.....                                      | 30 |
| II.3.1 Définition .....                                                      | 30 |
| II.3.2 Caractéristiques de la technologie ULB.....                           | 31 |
| II.3.3 Applications de l'ULB .....                                           | 32 |
| II.3.4 Techniques d'élargissement de la bande passante .....                 | 33 |
| II.3.5 Antennes Ultra Large Bande (ULB) .....                                | 34 |
| II.3.5.1 Antennes indépendantes de la fréquence .....                        | 34 |
| II.3.5.2 Antennes élémentaires .....                                         | 37 |
| II.4 Conclusion .....                                                        | 40 |
| <br><b><u>Chapitre III : Etude et Conception d'une Antenne MIMO-ULB.</u></b> |    |
| III.1 Introduction.....                                                      | 42 |
| III.2 Description du logiciel de simulation .....                            | 42 |
| III.3 Géométrie de l'antenne .....                                           | 44 |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| III.4 Etapes de conception de l'antenne ..... | 45 |
| III.5 Résultats et discussions.....           | 50 |
| Antenne seule.....                            | 50 |
| III.5.1.1 Coefficients de réflexion.....      | 50 |
| III.5.1.2 Gain de l'antenne .....             | 51 |
| III.5.1.3 Diagramme de rayonnement.....       | 51 |
| Réseau d'antenneMIMO-ULB .....                | 55 |
| III.5.1.4 Coefficients de réflexion.....      | 56 |
| III.5.1.5 Diagramme de rayonnement.....       | 57 |
| III.5.1.6 Coefficient de corrélation .....    | 59 |
| III.5.1.7 Gain de diversité .....             | 60 |
| III.6 Conclusion .....                        | 61 |

# Table de Figures

## Chapitre I :

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : Principe de la diversité. ....                                                                 | 5  |
| Figure I. 2 : Différentes configuration des antennes multiples .....                                        | 6  |
| Figure I. 3 : Exemple de macro-diversité .....                                                              | 7  |
| Figure I. 4 : Exemple de macro-diversité avec relais. ....                                                  | 7  |
| Figure I. 5 : Technique de combinaison au récepteur. ....                                                   | 8  |
| Figure I. 6 : Combinaison par commutation. ....                                                             | 9  |
| Figure I. 7 : Combinaison par sélection. ....                                                               | 10 |
| Figure I. 8 : Combinaison par gain égal. ....                                                               | 11 |
| Figure I. 9 : Combinaison par rapport maximal (MRC).....                                                    | 11 |
| Figure I. 10 : Représentation de la fonction de densité cumulative et Estimation du gain de diversité. .... | 13 |
| Figure I. 11 : Système MIMO. ....                                                                           | 16 |
| Figure I. 12 : Comparaison de la capacité du canal pour des systèmes SISO et MIMO.....                      | 18 |
| Figure I. 13 : Principe du multiplexage spatial en (a) et du codage spatio-temporel en(b). ....             | 20 |

## Chapitre II.

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II. 1 : Structure de base d'une antenne imprimée .....                                                                  | 23 |
| Figure II. 2 : Divers types d'éléments rayonnants. ....                                                                        | 23 |
| Figure II.3 : Alimentation par ligne micro ruban. ....                                                                         | 25 |
| Figure II.4 : Excitation par sonde coaxiale.....                                                                               | 25 |
| Figure II. 5 : Alimentation par couplage à travers une fente dans le plan de masse. ....                                       | 26 |
| Figure II. 6 : Alimentation par guide d'ondes coplanaire. ....                                                                 | 26 |
| Figure II. 7 : Antenne en mode émetteur.....                                                                                   | 27 |
| Figure II. 8 : Diagramme de rayonnement et courants de surface. ....                                                           | 29 |
| Figure II. 9 : Exemple de diagramme de rayonnement. ....                                                                       | 30 |
| Figure II. 10 : Différentes applications de l'ULB. ....                                                                        | 33 |
| Figure II. 11 : Antennes spirales coniques. (a) configuration ; (b) vue de côté et de dessus ; (c) exemple de réalisation..... | 35 |
| Figure II. 12 : L'antenne spirale d'Archimède. ....                                                                            | 36 |
| Figure II. 13 : Structure d'antenne log-périodique.....                                                                        | 37 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II. 14 : Antenne biconique infinie.....                     | 38 |
| Figure II. 15 : Exemple de réalisation d'une antenne discone.....  | 39 |
| Figure II. 16 : Exemple de réalisation d'une antenne papillon..... | 40 |

### Chapitre III

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.1 : CST DESIGN STUDIO suite.....                                                                                     | 43 |
| Figure III.2 : Géométrie de l'antenne étudiée (unité en mm). ....                                                               | 44 |
| Figure III. : Choix de l'application de travail.....                                                                            | 45 |
| Figure III. 4 : Choix du type de l'antenne.....                                                                                 | 46 |
| Figure III. 5 : Déterminer la plage de fréquence.....                                                                           | 47 |
| Figure III. 6 : Déterminer la plage de fréquence.....                                                                           | 47 |
| Figure III. 7 : Création du patch.....                                                                                          | 48 |
| Figure III. 8 : création de la ligne d'alimentation.....                                                                        | 48 |
| Figure III. 9 : Conception du l'alimentation.....                                                                               | 49 |
| Figure III.10 : Géométrie finale de l'antenne proposée.....                                                                     | 49 |
| Figure III. 11 : Coefficients de réflexion de l'antennes proposée.....                                                          | 50 |
| Figure III. 12 : Gain de l'antenne en dB.....                                                                                   | 51 |
| Figure III. 13 : Diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée à la fréquence 3.1 GHz<br>a) Plan E, b) Plan H, c) 3D ..... | 52 |
| Figure III. 14 : Diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée à la fréquence 8.5 GHz<br>a) Plan E, b) Plan H, c) 3D ..... | 53 |
| Figure III. 15 : Diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée à la fréquence GHz<br>a) Plan E, b) Plan H, c) 3D.....      | 54 |
| Figure III. 16 : Géométrie du réseaux MIMO-ULB proposé.....                                                                     | 55 |
| Figure III. 17 : Géométrie du réseau MIMO-ULB en 3D.....                                                                        | 56 |
| Figure III. 18 : Coefficients de réflexion de l'antennes MIMO-ULB proposée .....                                                | 56 |
| Figure III. 19 : Diagramme du réseau MIMO-ULB proposé à la fréquence 3.1 GHz<br>a)2D b) 3D.....                                 | 57 |
| Figure III. 20 : Diagramme du réseau MIMO-ULB proposé à la fréquence 5.8 GHz<br>a)2D b) 3D.....                                 | 58 |
| Figure III. 21 : Diagramme du réseaux MIMO-ULB proposée à la fréquence 11 GHz<br>a)2D b) 3D.....                                | 59 |
| Figure III. 22 : Coefficient de corrélation $\rho_{21}$ .....                                                                   | 60 |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Figure III. 23 : Gain de diversité..... | 61 |
|-----------------------------------------|----|

## Notations et abréviations

|                    |                                                                                                           |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $SNR$              | <i>rapport signal sur bruit.</i>                                                                          |
| $y(t)$             | <i>signal combine en sortie.</i>                                                                          |
| $N$                | <i>le nombre d'antennes réceptrices.</i>                                                                  |
| $w_n^*$            | <i>le conjugué du coefficient de pondération.</i>                                                         |
| $u_n(t)$           | <i>le signal plus le bruit à la réception.</i>                                                            |
| $v_n(t)$           | <i>la réponse du canal.</i>                                                                               |
| $s(t)$             | <i>le signal transmis.</i>                                                                                |
| $b_n(t)$           | <i>le bruit à la <math>n^{ième}</math> branche du système.</i>                                            |
| $w_k$              | <i>l'indice de la branche pour laquelle le SNR est <math>\gamma_k \geq \gamma_n</math>.</i>               |
| $\gamma_k$         | <i>le SNR de la branche d'indice <math>k</math> sélectionné.</i>                                          |
| $\gamma_n$         | <i>le SNR de la <math>n^{ième}</math> branche.</i>                                                        |
| $\Gamma$           | <i>le SNR moyen.</i>                                                                                      |
| $\gamma$           | <i>le SNR instantané .</i>                                                                                |
| $P(\gamma \leq x)$ | <i>la probabilité d'avoir un SNR inférieure au seille <math>x</math>.</i>                                 |
| $N$                | <i>Le nombre antennes.</i>                                                                                |
| $\rho_e$           | <i>coefficient de corrélation réel.</i>                                                                   |
| $\rho_c$           | <i>coefficient de corrélation complexe.</i>                                                               |
| $E_\theta$         | <i>le champ complexes polarisés en <math>\theta</math> des antennes <math>i</math> et <math>j</math>.</i> |
| $P$                | <i>les spectres de puissance .</i>                                                                        |
| $XPR$              | <i>la discrimination de polarisation croisée.</i>                                                         |
| $P_V$              | <i>la puissance verticale instantanée.</i>                                                                |



|           |                                                                    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| $P_H$     | <i>la puissance horizontale instantanée.</i>                       |
| $S$       | <i>paramètre de répartition .</i>                                  |
| $S_{11}$  | <i>coefficient de réflexion.</i>                                   |
| $GD$      | <i>gain de diversité.</i>                                          |
| $K$       | <i>le rapport entre les niveaux de puissance de deux antennes.</i> |
| $P_{min}$ | <i>la plus faible puissance reçu par l'antenne.</i>                |
| $P_{max}$ | <i>la puissance la plus importante reçu par l'antenne.</i>         |
| $MEG$     | <i>le gain effective moyen.</i>                                    |
| $P_{rec}$ | <i>la puissance incidente totale.</i>                              |
| $G$       | <i>gain du signal.</i>                                             |
| $N_e$     | <i>onde incidente .</i>                                            |
| $N_r$     | <i>onde réfléchie.</i>                                             |
| $e(t)$    | <i>le vecteur d'émission des signaux.</i>                          |
| $S(t)$    | <i>le vecteur de réception des signaux.</i>                        |
| $n(t)$    | <i>le vecteur bruit .</i>                                          |
| $H(t)$    | <i>est la matrice complexe des coefficients du canal.</i>          |
| $C$       | <i>capacité du canal.</i>                                          |
| $I_{Nr}$  | <i>la matrice identité de dimension <math>N_r</math> .</i>         |
| $FDD$     | <i>multiplexage par division de fréquence.</i>                     |
| $TDD$     | <i>multiplexage par division de temps.</i>                         |
| $ULB$     | <i>ultra large bande.</i>                                          |
| $Z_e$     | <i>impédance d'entrée.</i>                                         |
| $R$       | <i>résistance de l'antenne.</i>                                    |

|       |                                                           |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| $X$   | <i>réactance de l'antenne.</i>                            |
| $Z_c$ | <i>impédance caractéristiques .</i>                       |
| $D$   | <i>directivité.</i>                                       |
| $G$   | <i>gain.</i>                                              |
| $P_a$ | <i>puissance source isotrope.</i>                         |
| $LBR$ | <i>largeur de bande relative.</i>                         |
| $f_c$ | <i>la fréquence centrale .</i>                            |
| $f_H$ | <i>la fréquence supérieure de la bande de fréquences.</i> |
| $f_L$ | <i>la fréquence inférieure de la bande de fréquences.</i> |

# Introduction Générale

Récemment, la technologie MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) a attiré l'attention des chercheurs pour ses avantages bien connus en matière de réduction des évanouissements par trajets multiples et d'augmentation de la capacité de transmission. Dans la communication sans fil [1], l'évanouissement par trajets multiples est un gros problème lorsque les signaux ayant des amplitudes et des phases différentes se combinent de manière destructive au niveau du récepteur.

Les évanouissements par trajets multiples peuvent être résolus grâce à la diversité spatiale, la diversité temporelle et la diversité de polarisation, etc. Une antenne MIMO avec diversité (dans la station de base ou le terminal mobile) peut être utilisée pour améliorer la fiabilité et la capacité de transmission sans augmentation de la bande passante, et de la consommation d'énergie, ce qui améliore considérablement l'efficacité du spectre. La performance de l'antenne MIMO est déterminée par la corrélation des signaux reçus par les éléments d'antenne.

La technique Ultra-Large Bande (ULB) a connue d'un grand développement au cours des dernières années pour ses avantages, tels que, la faible puissance, le débit de données élevé dans une gamme limitée et la fabrication facile. La FCC (Federal Communications Commission) a limité l'émission maximale de 41,3 dBm / MHz entre 3,1 et 10,6 GHz.

La technologie ULB permet aux appareils grand public portables, tels que les imprimantes, les appareils photo numériques et les ordinateurs, de se connecter sans fil les uns aux autres et d'offrir un taux de transfert de données très élevé sur une courte distance [2].

La combinaison de la technologie ULB et de l'antenne MIMO est une orientation de recherche intéressante. Différentes antennes MIMO fonctionnant en UWB ont été proposées ces dernières années. Le principal défi dans la conception d'antennes en diversité est de réduire le couplage mutuel entre les éléments d'antenne dans un petit espace. Diverses méthodes de réduction du couplage mutuel ont été proposées. Une isolation élevée peut être obtenue en gravant des fentes dans le sol ou en étendant des branches la masse.

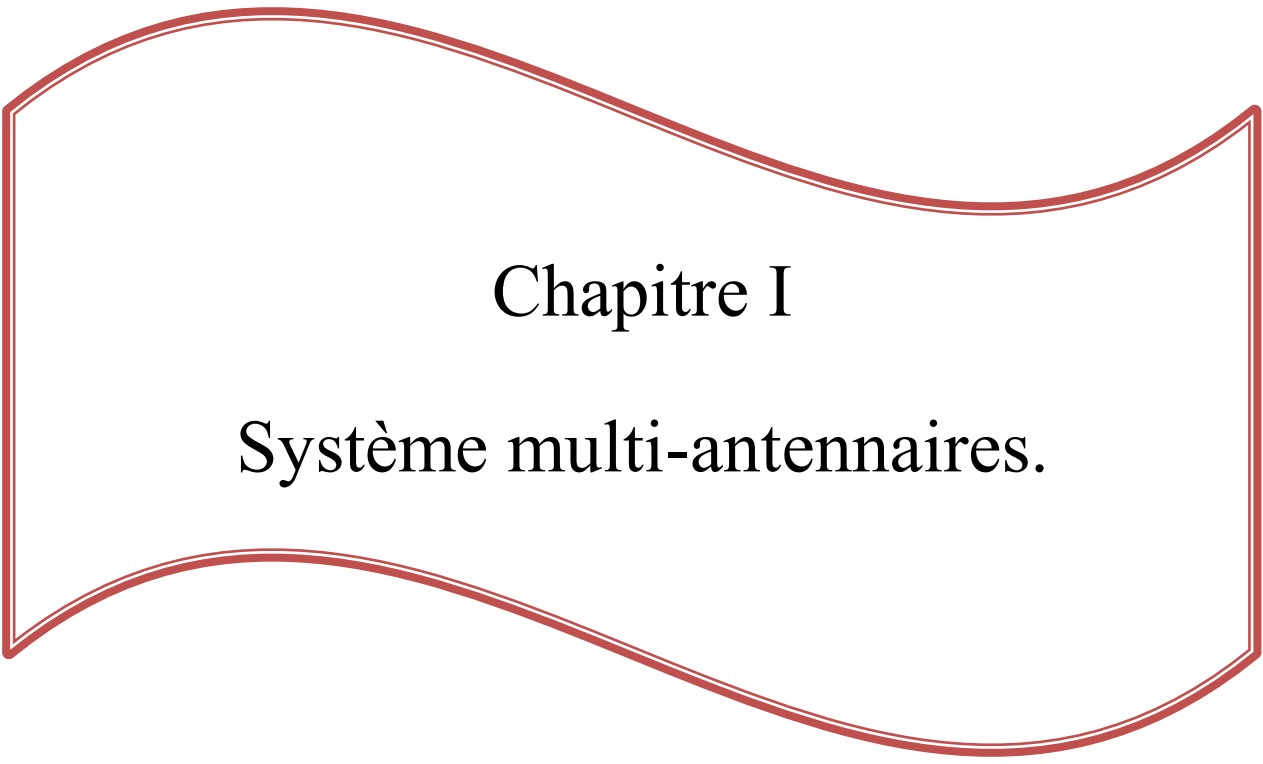
L'objectif de ce mémoire est l'étude et la conception d'une antenne MIMO Ultra large bande qui fonctionne entre [3-11 GHz], avec un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB sur la totalité de la bande.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré aux systèmes multi-antennaires MIMO. Nous commençons ce chapitre par la définition de la diversité, ses types, les techniques utilisées pour la mettre en œuvre et ses principaux paramètres. Par la suite, nous présentons des généralités sur les antenne MIMO.

Le deuxième chapitre présente, dans une première partie, les généralités sur les antennes imprimées. Dans ce contexte nous décrivons les propriétés et caractéristiques de ces antennes et l'ensemble des techniques d'alimentations utilisées pour ce type d'antennes. Dans une deuxième partie, nous présentons les principes fondamentaux de la technologie Ultra Large Bande.

La conception d'une nouvelle structure d'antenne MIMO-ULB pouvant être utilisée dans la bande [3-11 GHz] sera abordée au chapitre 3. Afin d'optimiser les performances de notre antenne dans cette bande des simulations sont effectuées (étude paramétrique et diagramme de rayonnement) à l'aide du logiciel CST Microwave Studio.

Enfin, le mémoire est terminé par une conclusion générale et des perspectives sur les futurs travaux.



# Chapitre I

Systeme multi-antennaires.

## **I.1 Introduction**

Récemment, la technologie MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) a attiré l'attention des chercheurs pour ses avantages bien connus en matière de réduction des évanouissements par trajets multiples et d'augmentation de la capacité de transmission dans la communication sans fil [4].

Cette technique se base essentiellement sur l'exploitation de la diversité introduite par l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception. Ceci conduit à la minimisation des évanouissements des trajets multiples [5].

Ce chapitre est consacré aux systèmes multi-antennaires MIMO. Nous commençons ce chapitre par la définition de la diversité, ses types, les techniques utilisées pour la mettre en œuvre et ses principaux paramètres. Par la suite, nous présentons des généralités sur les antennes MIMO.

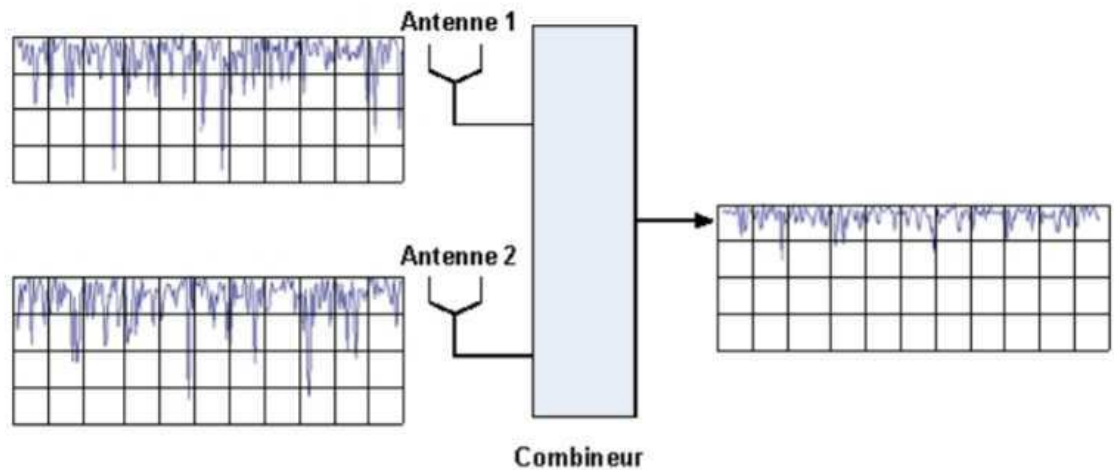
## **I.2 Diversité des systèmes multi-antennaires**

### **I.2.1 Principe de la diversité**

Le signal transmit allons de l'émetteur au récepteur subie plusieurs sortes d'atténuations comme L'affaiblissement de parcours, L'évanouissement rapide...etc.

Cependant le plus imprévisible des évanouissements est l'évanouissements de Raleigh qui est due essentiellement au multi trajet suivie par les signaux causant leur arriver de façons cumulatifs ou soustractive provoquant des variations continues et imprévisibles des phases des signaux suivant le temps, entraînant des évanouissements répétitifs. Une technique de réception spéciale appelée combinaison de récepteurs multiples mais plus connu sous le nom de diversité est envisageable[6].

Le principe de base de la diversité est que le récepteur doit disposer de plusieurs versions du signal transmis et une bonne combinaison d'antennes pour avoir des signaux à évanouissement indépendants, mais aussi une bonne technique de combinaison de signaux permettant de maximiser le SNR moyen à la sortie[7].



**Figure I.1 : Principe de la diversité.**

La figure I.1 illustre deux signaux à évanouissements indépendants et le signal combiné en sortie du combineur. Il existe très peu de chance que les signaux s'évanouissent en même temps puisqu'ils sont indépendants ainsi nous remarquons clairement que le signal combiné possède un rapport signal sur bruit (SNR) moyen supérieur par rapport à celui reçu par chaque antenne : en d'autres termes les évanouissements sont moins importants[7].

### **I.2.2 Micro-diversité**

Cette technique consiste à équiper l'émetteur et/ou le récepteur par des antennes multiples, ainsi, des configurations différentes sont possibles pour un système utilisant des antennes multiples dans un contexte de micro-diversité, il existe plusieurs configurations allant de la SISO à la MIMO passant par la MISO et la SIMO ce sont des méthodes qui vont être utilisées pour configurer les systèmes[6].

La figure I.2 représente ces différentes configurations.

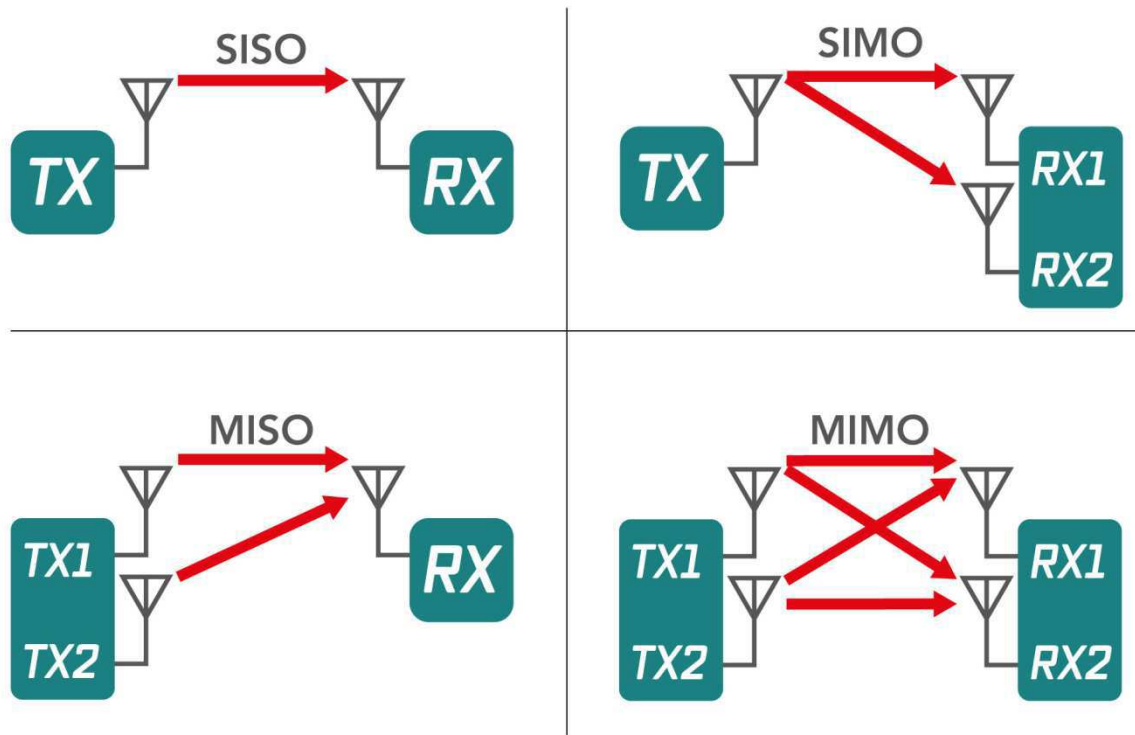


Figure I. 2 : Différentes configuration des antennes multiples

### I.2.3 Macro-diversité

Cette technique consiste à utiliser plusieurs antennes mais sur des terminaux distincts. L'avantage de cette dernière est qu'elle permet à un récepteur ayant un certain nombre d'antennes de s'associer à un ou plusieurs autres terminaux, ainsi il va gagner en diversité et améliorer la qualité et le débit mais ce qu'il faut savoir c'est comment se fait cette coopération [6].

- Les systèmes MIMO de macro-diversité : ce sont des systèmes d'antennes multiples à l'émission et à la réception qui sont différents des systèmes de micro-diversité, ces antennes sont placées sur des émetteurs et des récepteurs distincts. Un exemple d'un système de macro-diversité avec 2 antennes à l'émission et 2 antennes à la réception est illustré sur la figure I.3 [6].



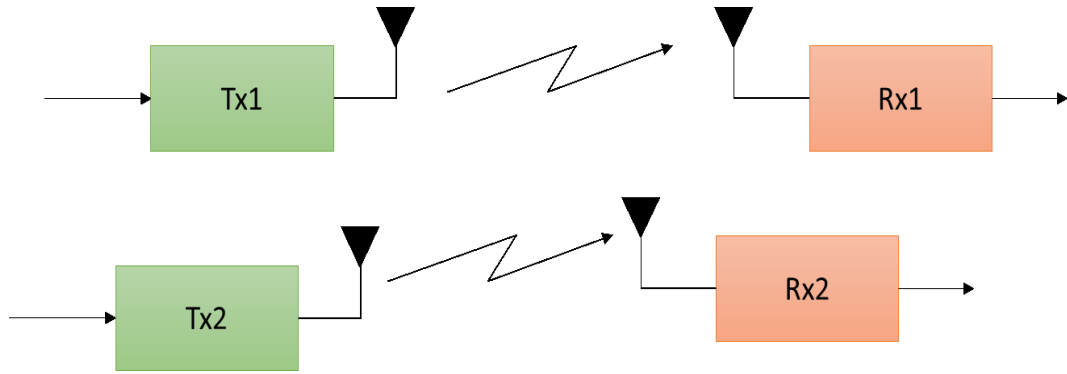


Figure I. 3 : Exemple de macro-diversité

- Systèmes à relais : consiste à assister la transmission de donnée par un ou plusieurs terminaux intermédiaires qu'on appelle relaie comme le montre la figure I.4 ci-dessous [6] :



Figure I. 4 : Exemple de macro-diversité avec relaie.

## I.2.4 Techniques de combinaisons de diversité

Grâce à différentes techniques, nous pouvons combiner les signaux pour obtenir un signal sans évanouissements. Il existe notamment des techniques de combinaisons linéaires plus ou moins complexes qui permettent de récupérer un signal avec un bon niveau moyen.

La technique générale de combinaisons des signaux est comme suite :

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n^* u_n(t) \quad (\text{I. 1})$$

$$u_n(t) = v_n(t)s(t) + b_n(t) \quad (\text{I. 2})$$

Avec :

$y(t)$  : Signal combiné en sortie.

$N$  : Nombre d'antennes réceptrices.

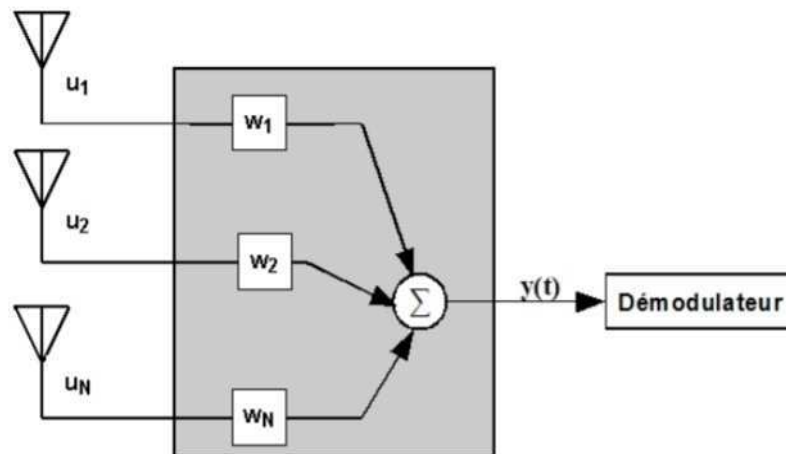
$w_n^*$  : Conjugué du coefficient de pondération.

$u_n(t)$  : Signal plus le bruit à la réception.

$v_n(t)$  : Réponse du canal.

$s(t)$  : Signal transmis.

$b_n(t)$  : Bruit à la  $n^{\text{ième}}$  branche du système [6].



**Figure I. 5 : Technique de combinaison au récepteur.**

La figure I.5 représente la technique de combinaison générale des signaux reçus sur un système multi-antennes.

Cependant, il existe quatre types de techniques de combinaison que nous pouvons utiliser dans le combineur.

#### **I.2.4.1 Combinaison par commutation**

Cette technique est caractérisée par l'utilisation d'un seul récepteur radio entre les N branche contrairement aux autres techniques qui utilisent N récepteurs radio, un récepteur pour chaque branche. A chaque instant, la branche ayant le signal supérieur au seuil fixé est sélectionné ou branché. Mais dès que le signal est inférieur au seuil, alors il y a commutation sur une autre branche. Ce seuil dépend du domaine d'utilisation de la diversité et peut être fixé par les fabricants.

Due à la taille limitée du terminal mobile, la technique de combinaison par commutation est la technique qui est actuellement implémentée dans la plupart des terminaux utilisant la diversité d'antennes [7].

La figure I.6 ci-dessous illustre le système a combinaison par commutation.

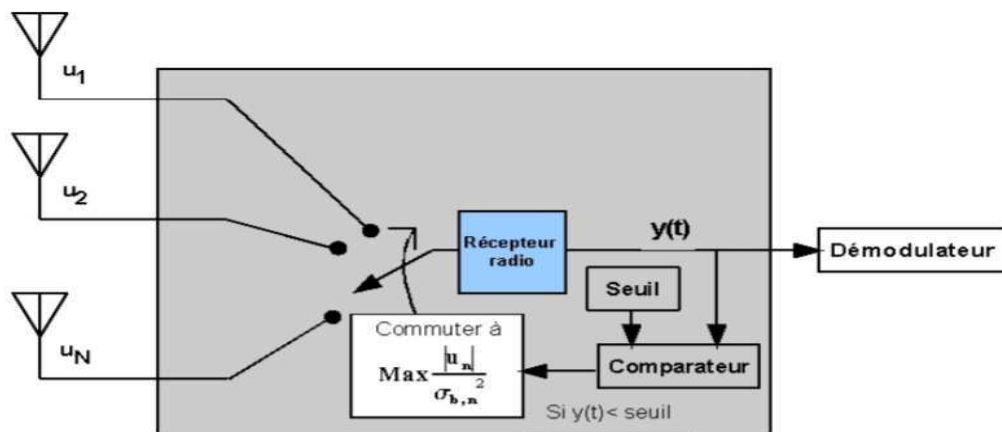


Figure I. 6 : Combinaison par commutation.

#### I.2.4.2 Combinaison par sélection

La combinaison par sélection est similaire à celle de la technique par commutation, excepté que N récepteurs radios sont requis. Elle consiste à choisir le signal ayant la puissance maximale ou le meilleur rapport signal sur bruit (SNR) parmi tous les signaux indépendants arrivant aux récepteurs.

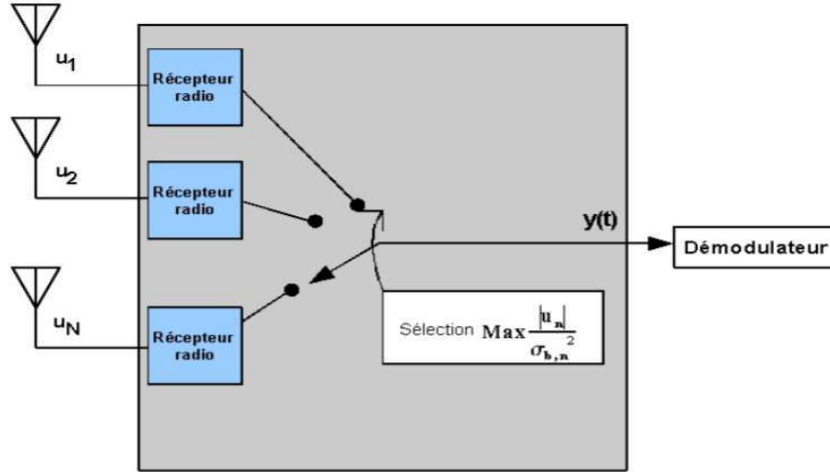


Figure I. 7 : Combinaison par sélection.

Pour la méthode de la combinaison par sélection (SC),  $w_k$  dont  $k$  représente l'indice de la branche pour laquelle le SNR est  $\gamma_k \geq \gamma_N$  ; ( $\gamma_k$  représente le SNR de la branche d'indice  $k$  sélectionné,  $\gamma_n$  est le SNR de la  $n$ ème branche) [7] Ainsi :

$$w_k = \begin{cases} 1 & \text{si } k = n \\ 0 & \text{si } k \neq n \end{cases} \quad (\text{I. 3})$$

Avec  $n = 1, \dots, N$ .

#### I.2.4.3 Combinaison par gain égal

Les deux techniques précédentes n'utilisent que le signal d'une branche à chaque instant comme signal de sortie. Pour améliorer la puissance moyenne du signal de sortie, les signaux de toutes les branches peuvent être combinés pour former le signal de sortie. Cependant, les signaux de toutes les branches ne sont pas en phase. Chaque signal doit donc être multiplié par un Co-phaseur pour que les signaux ne soient plus déphasés. La figure I.8 illustre le système à combinaison par gain égal [7].

#### I.2.4.4 Combinaison par rapport maximal

La technique de combinaison par gain égal présente un inconvénient majeur est que si l'une des branches a un signal très faible, cela entraînera une réduction du signal combiné à la sortie. La technique MRC intervient pour régler le problème en appliquant un coefficient de pondération sur chaque branche avant que tous les signaux ne soient combinés Ainsi pour

maximiser le signal à la sortie du combineur, une branche avec un SNR élevé, donnera un coefficient de pondération élevé ce qui permettra de choisir les signaux à combiner [7].

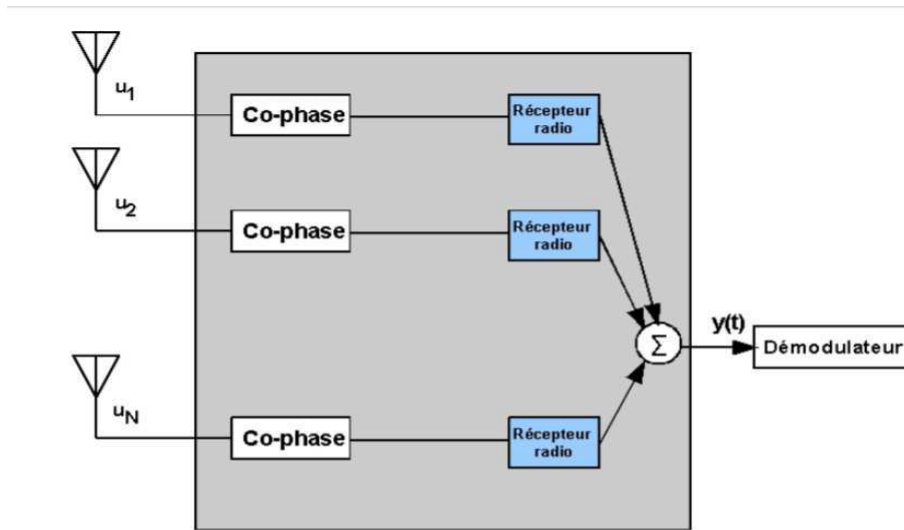


Figure I. 8 : Combinaison par gain égal.

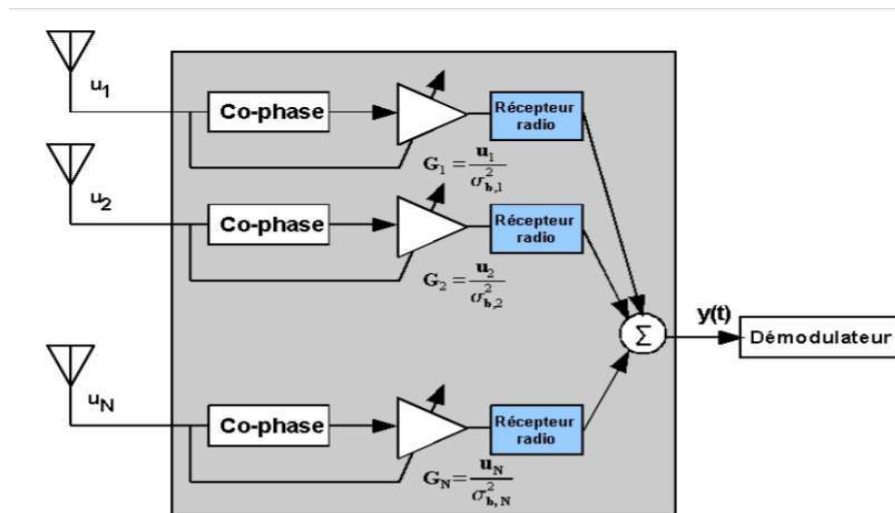


Figure I. 9 : Combinaison par rapport maximal (MRC)

## I.2.5 Gain en diversité et corrélation

### I.2.5.1 Gain en diversité

Deux canaux à évanouissement indépendants ont peu de chance de s'évanouir simultanément. Ainsi on peut définir le gain de diversité comme étant l'amélioration du

rapport signal sur bruit (SNR) des signaux combinés par rapport à un SNR reçu par une antenne unique. La fonction de distribution est comme suite :

- Pour un canal de Raleigh a une seule antenne :

$$P(\gamma \leq x) = (1 - e^{-\frac{x}{\Gamma}}) \quad (\text{I. 4})$$

- Pour un canal de Raleigh ayant des antennes multiples :

$$P(\gamma \leq x) = (1 - e^{-\frac{x}{\Gamma}})^N \quad (\text{I. 5})$$

Avec :

$\Gamma$  : SNR moyen.

$\gamma$  : SNR instantané

$P(\gamma \leq x)$  : Probabilité d'avoir inférieure au seuil  $x$

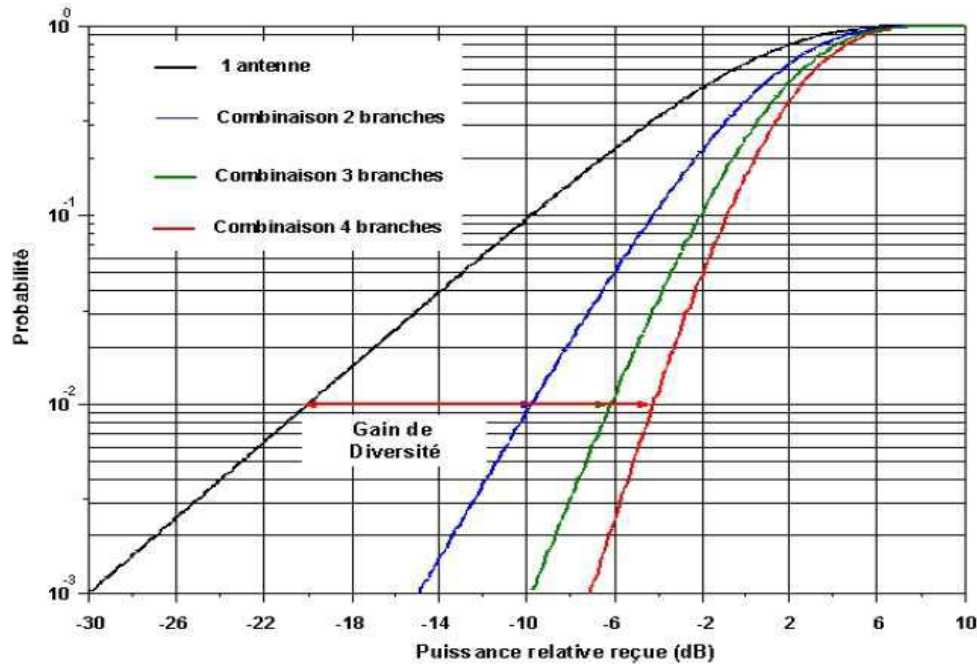
$N$  : Nombre antennes.

Le gain de diversité peut être exprimé par :

$$GD = \frac{P_{div}}{P_{ant}} \quad (\text{I. 6})$$

Où  $P_{div}$  est le niveau de puissance après combinaison de diversité et  $P_{ant}$  est le niveau de puissance de l'antenne de référence.

La figure 1.10 illustre les tracés des probabilités précédentes pour une antenne combinaison par sélection avec  $N$  antennes indépendante recevant des signaux avec des SNR moyen égaux. La figure montre une réduction de la probabilité d'avoir des évanouissements en dessous d'un certain seuil quand nous passons d'un système d'une antenne à  $N$  antennes. Sur cette même figure le gain de diversité est aussi présenté en fonction du nombre d'antennes à la réception ce gain de diversité est pris ici au moment où  $P(\gamma \leq x)$  est de 0.01. La figure montre que le gain de diversité passe de 10.2 dB à 15.7 dB en passant de 2 à 4 antennes [8].



**Figure I. 10 : Représentation de la fonction de densité cumulative et Estimation du gain de diversité. [8]**

Ce gain de diversité n'est vraiment significatif que si toutes les antennes du système ont une efficacité totale égale à 100% ce qui est loin d'être évident en pratique. Ainsi le gain en diversité réaliste d'un système doit également prendre en compte l'efficacité totale de chaque antenne.

### I.2.5.2 Corrélation

Pour l'obtention d'une bonne diversité plusieurs condition doivent être satisfaite, l'une d'entre elle c'est d'avoir une faible corrélation entre les signaux sur les différentes antennes de notre système. La corrélation entre deux signaux reçus peut être décrite par le coefficient de corrélation complexe ou par l'enveloppe de corrélation, plusieurs études en permis de déterminer différente limite supérieure, dans le [8] la limite supérieure acceptable est de 0.5 pour l'enveloppe de corrélation, et dans le [9] la valeur de 0.7 est définie comme la limite supérieure pour le coefficient de corrélation complexe [8].

Pour le calcul du coefficient de corrélation les amplitudes instantanées et les phases relatives des différents signaux sont utilisées. L'enveloppe de corrélation  $\rho_e$  qui est une valeur réelle est égale au module au carré du coefficient de corrélation complexe, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_e \approx |\rho_c|^2 \quad (I. 7)$$

Il existe une autre approche plus simple pour le calcul de l'enveloppe de corrélation est celle d'utiliser le paramètre  $S$  des antennes. L'auteur dans [9] à montrer que dans un environnement multi trajet isotrope le calcul de l'enveloppe du coefficient de corrélation avec le paramètre  $S$  est réalisable à condition que la structure du système soit sans perte et que l'une des deux antennes doit être charger par une impédance de  $50\Omega$  si l'autre antennes est alimenter[8].

Dans ce cas la représentation de l'expression de l'enveloppe de corrélation est comme suite :

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|}{(1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2))(1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2))} \quad (I. 8)$$

Précédemment en étudiant le gain de diversité en à supposer l'indépendances des branches l'une par apport à l'autre ce qui veut dire une corrélation nulle cette supposition est plutôt difficile agarantie du fait de l'espaceréduit entre les antennes. Si le coefficient est non nul ( $\rho_e > 0$ ) alors le gain de diversité diminue.

Dans [10] l'auteur à analyser l'influence de la corrélation sur le gain de diversité, les résultats montre que la dégradation du gain de diversité en fonction de l'enveloppe de corrélation est donnée par le facteur de dégradation DF défini par [8] :

$$DF = \sqrt{1 - \rho_e} \quad (I. 9)$$

### 1.2.5.3 Rapport de puissance de branche et gain effectif moyen

Un autre paramètre très important pour avoir une bonne diversité est que les niveaux de puissance des signaux des différentes antennes du système de diversité ne doivent pas être largement différents. Il faut alors que les antennes reçoivent pratiquement la même puissance des différents signaux reçu ceci est très important pour avoir une bonne diversité [8].

Pour cela en définie le rapport entre les niveaux de puissance de deux antennes noté  $k$  par l'expression suivante :

$$k = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (I. 10)$$



Où  $P_{min}$  représente la plus faible puissance reçue par l'une des antennes et  $P_{max}$  représente la puissance la plus importante.

Il existe une autre méthode pour calculer le BPR (Branch power ratio), c'est d'utiliser le gain effective moyen MEG (Mean effective gain) des antennes comme suite :

$$k = \min\left(\frac{MEG_1}{MEG_2}, \frac{MEG_2}{MEG_1}\right) \quad (I. 11)$$

Le gain effectif moyen a été proposé par *Taga* comme une quantité pour prendre en compte le comportement aléatoire du champ entrant causé par la complexité de l'environnement [8]. Le gain effectif moyen est le gain moyen d'une antenne dans un environnement mobile. Il est défini dans [11] comme étant le rapport entre la puissance moyenne reçue par une antenne sur un chemin aléatoire  $P_{rec}$  et la puissance incidente totale ( $P_v + P_H$ ). C'est une caractéristique incluant le diagramme de rayonnement, l'efficacité de l'antenne et les effets de propagations. Le MEG doit être proche de 1 pour assurer un bon gain de diversité [8].

## I.3 Systèmes MIMO

La technologie MIMO venant pour surmonter les contraintes de transmission haut débit a alimenté énormément les recherches sur les canaux spatio-temporels et leurs systèmes.

### I.3.1 Intérêt des systèmes MIMO

Les systèmes de transmission possédant une antenne en émission et une antenne en réception ou ce qu'on appelle les SISO souffrent en matière de capacité du canal alors que la demande de transmission en haut débit et en expansion. Les concepteurs ont développé plusieurs méthodes, comme l'élargissement de la bande spectrale ou l'augmentation des niveaux de puissance de transmission, pour remédier à ce problème, mais ces méthodes se heurtent au problème de la limitation de la bande passante et la variation de l'espace de propagation du signal [8].

Les systèmes avec des antennes multiple dans les 2 extrémités de la liaison ou ce qu'on appelle les systèmes MIMO sont apparue comme étant les systèmes les plus prometteurs. Ils permettent d'augmenter la capacité du canal sans pour autant modifier la bande passante ou

augmenter la puissance du signal, ces systèmes utilisent la méthode de diversité spatial pour contrer les effet multi-trajet.

Si les systèmes de communication utilisent par défaut la dimension temps, les système MIMO rajoute a cette dernière la dimension spatiale qui fait des systèmes MIMO des systèmes sans fils spatiaux temporelle.

Dans un système avec  $N_e$  antennes d'émission et  $N_r$  antenne de réception et en supposant que la distribution des  $N_e$  et  $N_r$  est identique, la capacité du canal peut être multiplier par  $MIN(N_e, N_r)$  en comparaison avec un système SISO.

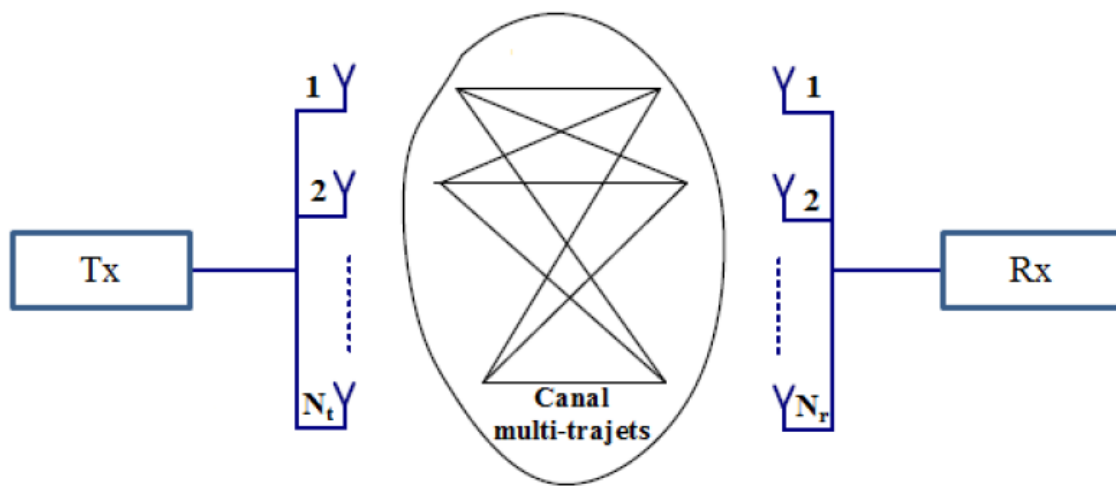


Figure I. 11 : Système MIMO.

Cependant la réalisation d'un système MIMO pose le problème des dispositifs de taille réduite. En fait, son implémentation en LTE implique que plusieurs antennes doivent être montées dans un espace très confiné. Cependant, l'intégration de plusieurs antennes dans un petit objet communicant tout en gardant un haut niveau de performances n'est pas aisée. En effet, l'espace limité entre les différentes antennes provoque un couplage mutuel et une faible isolation, entrainant une forte corrélation et une diminution de la capacité du canal [8].

### I.3.2 Modèle du canal MIMO

Dans les systèmes MIMO les flux de données sont envoyés aux  $N_e$  antennes après avoir subi un codage et une modulation de leur information. Ces antennes font rayonner les signaux à travers le canal de propagation radio. Le système peut être représenté par la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & \dots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \dots & \dots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_{N_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{N_t} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 12})$$

Ou bien simplement :

$$S(t) = H(t).e(t) + n(t) \quad (\text{I. 13})$$

Avec :

$e(t)$  : Vecteur d'émission des signaux de taille  $N_e$ .

$S(t)$  : Vecteur de réception des signaux de taille  $N_r$ .

$n(t)$  : Vecteur bruit de taille  $N_e$ .

$H(t)$  : Matrice complexe  $N_e \times N_r$  des coefficients du canal  $h_{ij}$  représentant le gain d'émission  $j$  et de réception  $i$ .

L'une des raisons qui a poussé les chercheurs à développer le concept MIMO c'est la possibilité d'utiliser des canaux orthogonaux entre les antennes, ce qui fournit systématiquement une augmentation de la capacité du canal selon les niveaux de corrélation entre les coefficients de la matrice du canal MIMO, plusieurs techniques se présentent pour une corrélation faible en utilise la technique de diversité pour l'exploitation du canal de propagation dans le cas contraire en utilise le beamforming.

En note aussi que les techniques de diversité et de multiplexage spatial peuvent être exploiter pour une meilleure exploitation du canal MIMO [12].

### I.3.3 Capacité du canal

Les chercheurs ont démontré que la capacité du canal évolue linéairement avec le nombre minimum des antennes en émission ou en réception ainsi la capacité du canal est définie ainsi :

$$C = \log_2 \left( \det \left[ I_{N_r} + \frac{\gamma}{N_e} H \cdot H^* \right] \right) \text{bits/s/Hz} \quad (\text{I. 14})$$

$I_{N_r}$  étant la matrice identité de dimension  $N_r$ ,  $\gamma$  le SNR au niveau de la réception.

Ainsi pour un SNR élevé la linéarité de l'augmentation de la capacité du canal en fonction du SNR par rapport au facteur  $\min(N_e, N_r)$  est vérifié.

La figure illustre l'évolution de la capacité en fonction du nombre d'antennes en émission et en réception et du SNR. Un canal de Rayleigh est considéré pour cette simulation [8].

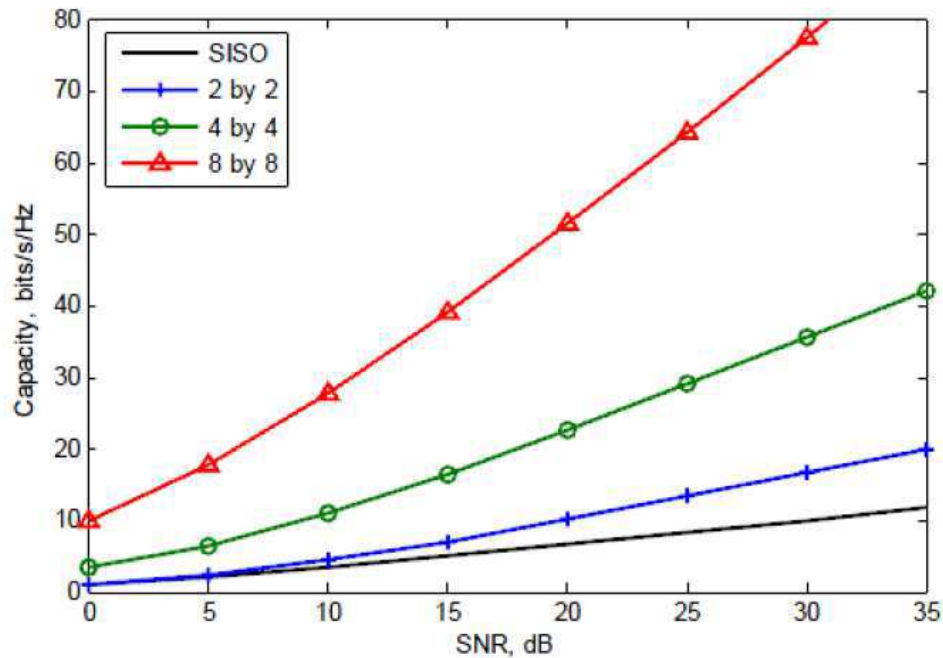


Figure I. 12 : Comparaison de la capacité du canal pour des systèmes SISO et MIMO.

### I.3.4 Multiplexage spatial

Une technique pour maximiser le débit de transmission de donnée et le multiplexage spatial, dans ce dernier les flux indépendants de données sont transmis sur des canaux parallèles pour chaque antenne du réseau avec un SNR donné. La technique consiste à émettre simultanément  $N_t$  symboles de modulation sur  $N_t$  antennes d'émission sans codage espace-temps de ces symboles. Ainsi, le multiplexage spatial améliore la capacité du canal avec le nombre d'antenne en émission et en réception. Dans un système MIMO idéal, le maximum de canaux parallèles que l'on peut avoir est égal à  $\min(N_e, N_r)$ . Ainsi le premier schéma de multiplexage spatial utilisé est appelé BLAST (Bell labs Layered Space-Time) [8].

L'efficacité spectral peut être considérablement améliorée avec le multiplexage spatial mais le manque de diversité d'antennes causant un important niveau d'erreur diminue le débit surtout quand le SNR est bas. La diminution du SNR cause le dysfonctionnement du multiplexage spatial à cause de la difficulté d'identification des signaux non corrélés. Ceci a poussé les chercheurs à combiner le multiplexage spatial avec d'autres techniques. Dans les études de [13] et [14], les chercheurs ont proposé la combinaison du multiplexage avec la modulation OFDM, mais seulement cette technique nécessite la connaissance du canal au niveau du récepteur pour améliorer les performances du système [8].

### **I.3.5 Codage spatio-temporel**

Les codages spatio-temporels consistent à introduire une corrélation spatiale et temporelle entre les signaux qui sont transmis par les différentes antennes de manière intelligente pour augmenter le gain de diversité et fournir un codage afin de minimiser les erreurs en réception.

Cette technique est conçue spécialement pour l'utilisation d'antennes multiples en émission. Elle permet d'améliorer la performance du système par l'exploitation des antennes multiples pour le gain de diversité plutôt que pour le gain de multiplexage spatial des flux de données parallèles. Il ajoute de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propres au canal radio [8].

La différence que présente cette technique avec le multiplexage spatial est que celle-ci prend un seul flux de données pour le coder dans le temps et dans l'espace afin de produire des flux de données pour chaque antenne d'émission.

Il est à noter que cette technique est utilisable quand le canal n'est pas connu aux moments de l'émission. Elle n'augmente pas la capacité du canal linéairement avec le nombre d'antennes utilisées cependant elle améliore la qualité et élargit la zone de couverture [8].

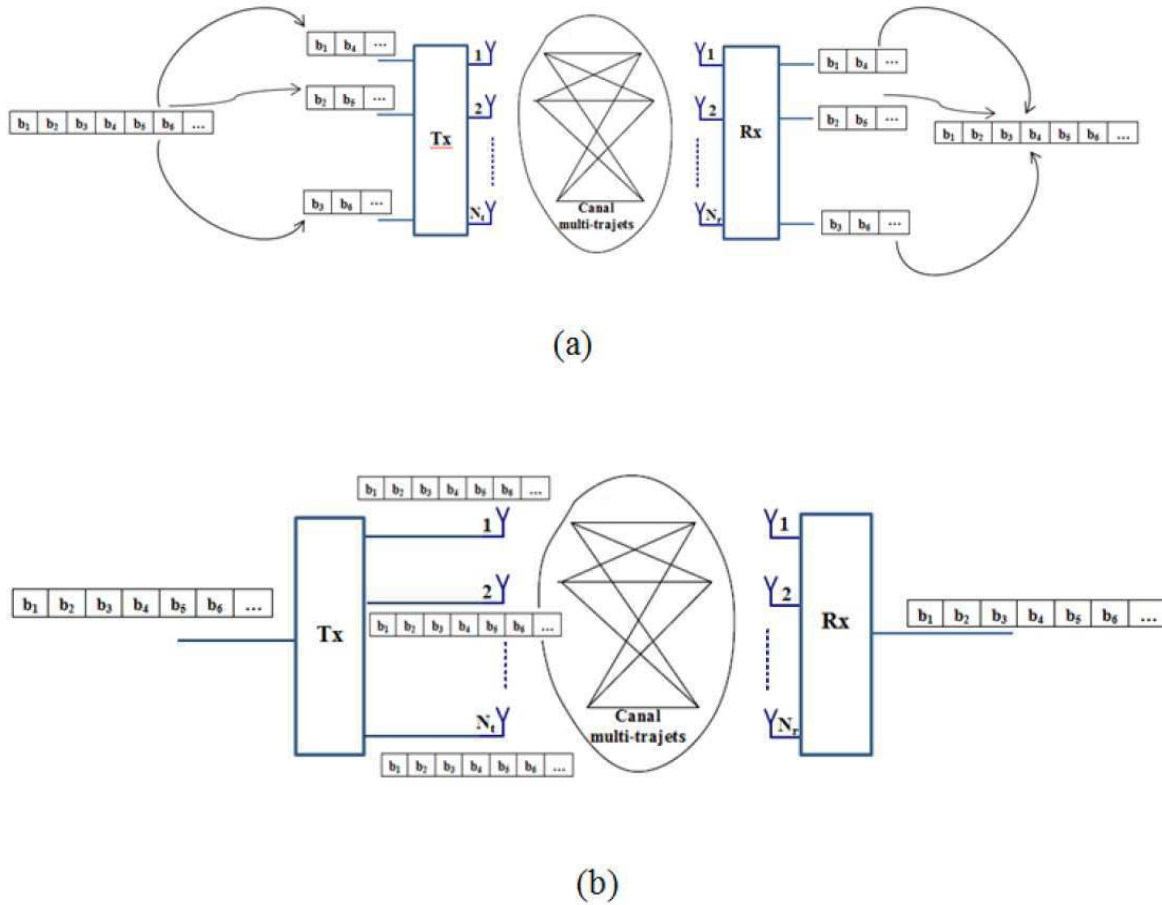


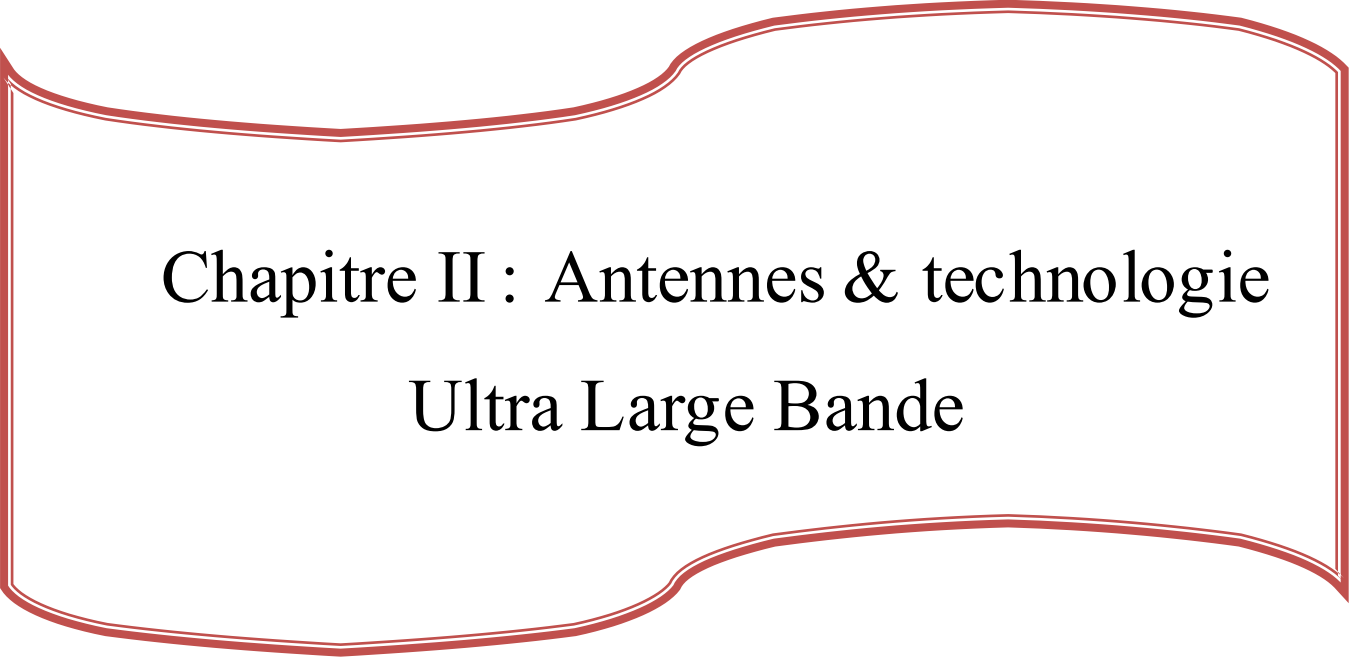
Figure I. 13 : Principe du multiplexage spatial en (a) et du codage spatio-temporel en (b).

## I.4 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à l'étude des antennes MIMO. Dans ce contexte, nous avons commencé par la définition de la diversité, les différentes techniques pour l'exploiter et ses principaux paramètres.

Par la suite nous avons présenté les systèmes MIMO et leurs techniques de multiplexage spatial et temporel.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des antennes et la technologie ultra large bande.



# Chapitre II : Antennes & technologie Ultra Large Bande

## **II.1 Introduction**

Ces dernières années, le domaine de la communication a connu d'énormes progrès dans le but de répondre aux besoins croissants des utilisateurs, ce qui nécessitera non seulement le développement de systèmes de communication performants, mais aussi leur adaptation aux besoins spécifiques.

La technologie ULB est une des technologies émergentes qui a mobilisé une grande attention des scientifiques et de l'industrie dans le monde entier après la réservation de la bande 3.1-10.6GHz pour les applications ULB. Cette technologie possède de nombreux avantages, tel qu'une large bande passante, de très hauts débits (jusqu'à plusieurs centaines de Mbits/s) et une immunité excellente aux interférences multivoies. Grâce à ces avantages, la technologie ULB est employée pour de nombreuses applications : des systèmes micro-ondes de télécommunication jusqu'aux applications radar.

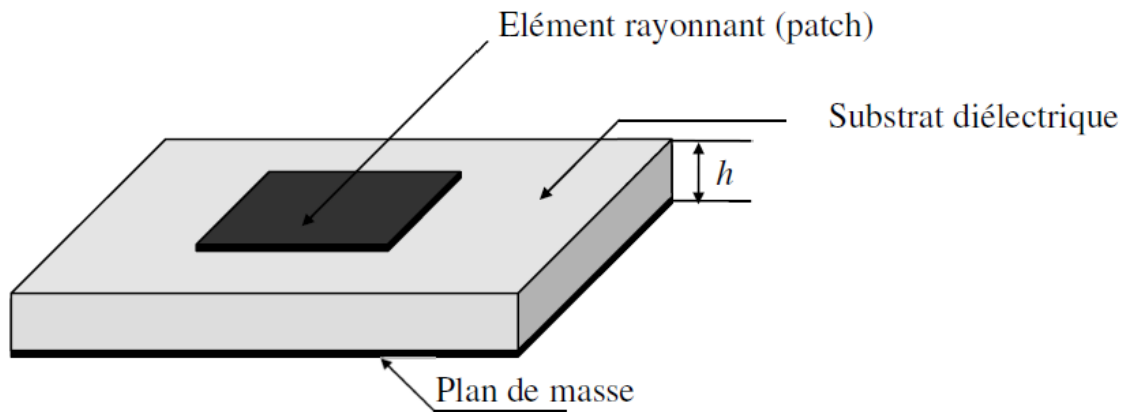
Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, les éléments de base pour des structures d'antennes imprimées. Nous présenterons leurs avantages et inconvénients, leurs applications, les différentes techniques d'alimentations et leurs principales caractéristiques. La suite du chapitre est consacrée à la technologie Ultra Large Bande (ULB) et ses différents aspects.

## **II.2 Antennes imprimées**

### **II.2.1 Description**

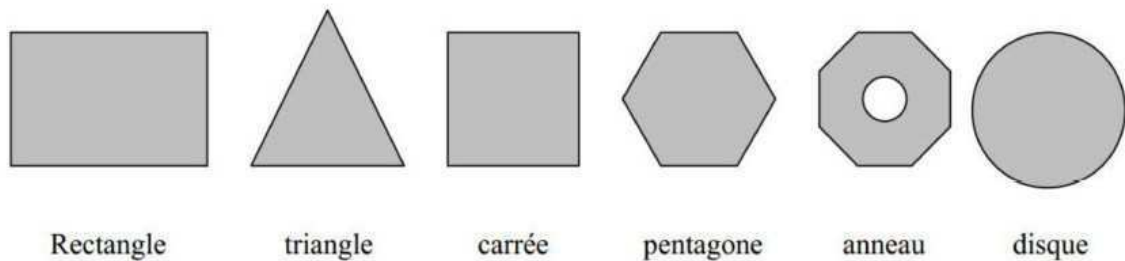
Les antennes imprimées (ou encore les antennes micro-rubans), représentée dans la figure II.1, sont construites par la technique des circuits imprimés. Elles sont constituées d'un mince conducteur métallique (habituellement de 17,5 à 35  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en hyperfréquence et 9  $\mu\text{m}$  en millimétrique) de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat épais utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par l'effet joule et améliorer la bande passante de l'antenne, la face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse [15].





**Figure II. 1 : Structure de base d'une antenne imprimée**

En pratique, les formes des éléments rayonnants les plus utilisées sont montrées sur la Figure II.2 :



**Figure II. 2 : Divers types d'éléments rayonnants.**

## II.2.2 Applications

Vu l'explosion technologique dans les télécommunications et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient incapable de répondre à ces exigences. Pour cette raison, les antennes imprimées remplacent les antennes classiques dans un bon nombre d'applications parmi les quelles on peut citer :

- Les télécommunications par satellites.
- La commande et le contrôle.
- La télémessure par missile.
- Les équipements portatifs.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.

- Les récepteurs satellite de navigation.

### **II.2.3 Avantages et Inconvénients**

Les antennes imprimées ont une structure plane. On peut donc exploiter tous les avantages de la technologie des circuits imprimés. Celles-ci présentent alors de nombreux avantages par rapport aux antennes conventionnelles.

#### **II.2.3.1 Avantage des antennes imprimées**

- Un faible poids.
- Une faible épaisseur.
- Un coût réduit dans le cas d'une réalisation en grande série.
- Elles peuvent être polarisées linéairement ou circulairement (droite ou Gauche) par simple changement de la position d'alimentation.
- Possibilité d'intégration des éléments actifs, directement sur le même substrat (oscillateurs, amplificateurs, modulateurs....).
- Un encombrement réduit (conditions d'utilisation sur les systèmes embarqués) et compatibilité aisée.
- En raison de leur faible coût et encombrement, on peut facilement les associer en réseau afin d'améliorer leur gain.

#### **II.2.3.2 Inconvénients des antennes imprimées**

- Bande passante étroite.
- Faible gain.
- Supporte uniquement des faibles puissances.
- Faible efficacité de rayonnement.
- Faible pureté de polarisation.

Pour remédier à ces inconvénients plusieurs travaux de recherches ont été menés et ont abouti à des progrès considérables améliorant les performances de ces antennes [16].

### **II.2.4 Techniques d'alimentation**

L'excitation est un point très important dans l'étude des antennes imprimées. En effet, l'énergie est fournie à l'élément rayonnant d'une manière où on peut influencer directement sur son rayonnement et modifier ses performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la

manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les méthodes d'alimentation des antennes patchs peuvent être classées en deux catégories :

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

#### II.2.4.1 Alimentation directe par une ligne micro ruban

Dans ce type d'alimentation, une bande de conduite est reliée directement au bord du patch du micro ruban. La bande de conduite est plus petite dans la largeur par rapport au patch (figure II.3).

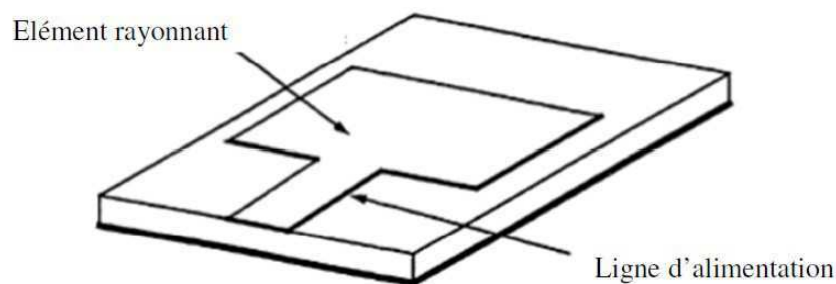


Figure II.3 : Alimentation par ligne micro ruban.

#### II.2.4.2 Alimentation par une ligne coaxiale

L'alimentation des éléments rayonnants peut aussi être effectuée par connexion directe à une ligne coaxiale (figure II.4) dont le conducteur central est connecté en un point situé sur l'axe de symétrie de l'élément, plus ou moins près du bord, afin d'adapter les impédances, le conducteur extérieur est relié au plan de masse [17].

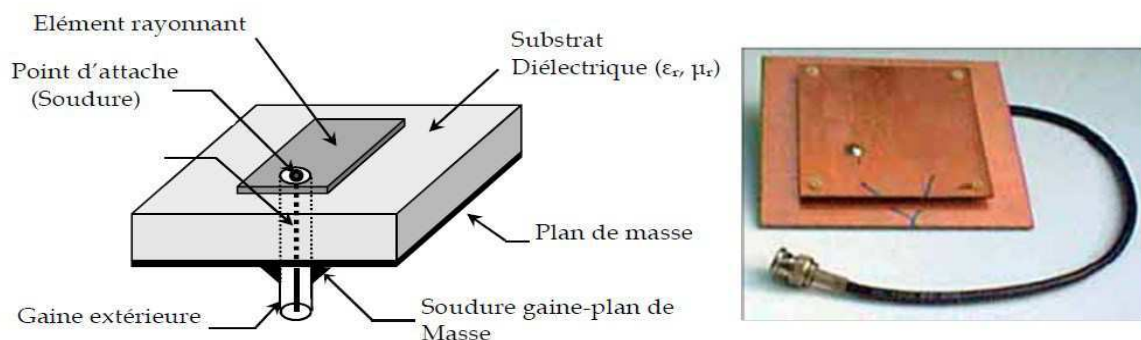


Figure II.4 : Excitation par sonde coaxiale.

### II.2.4.3 Alimentation par fente

Dans la structure représentée par la figure II.5, un plan de masse commun sépare la ligne micro-ruban d'alimentation (située en dessous) et l'élément rayonnant imprimé (située au-dessus). C'est par l'intermédiaire de la fente usinée dans le plan de masse que s'effectue le couplage électromagnétique entre l'élément rayonnant et la ligne micro ruban [17].

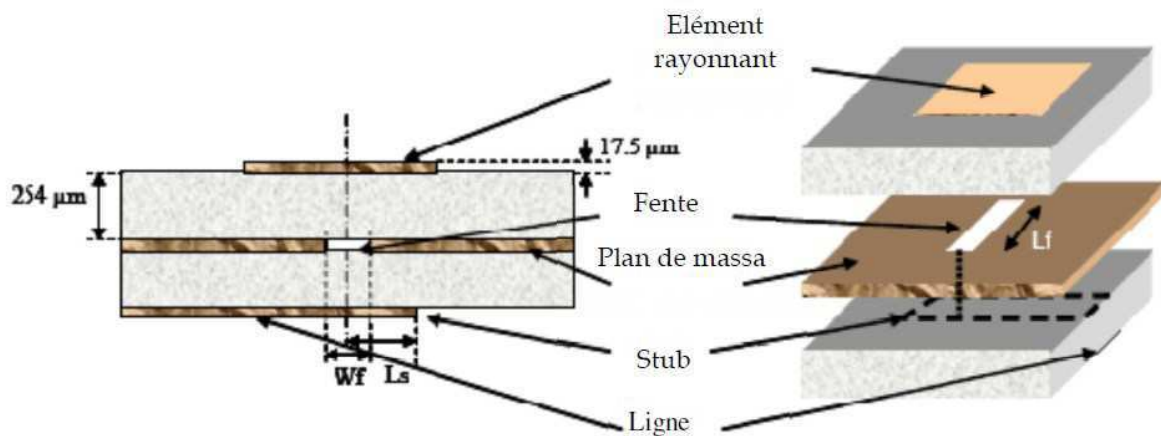


Figure II. 5 : Alimentation par couplage à travers une fente dans le plan de masse.

### II.2.4.4 Alimentation par guides d'ondes coplanaires

Le guide d'ondes coplanaire est une ligne de transmission efficace largement utilisée, qui présente l'avantage de placer la ligne d'alimentation au même niveau que le plan de masse. Il est constitué d'un ruban central métallique placé entre deux plans de masse parallèles entre eux, déposés sur la même face d'un substrat diélectrique (Figure 1.6).

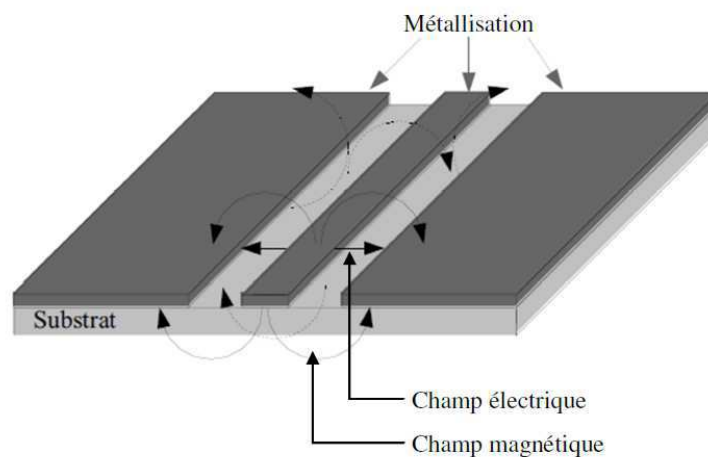


Figure II. 6 : Alimentation par guide d'ondes coplanaire.

## II.2.5 Caractéristiques des antennes imprimées

Les paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'évaluer la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et, ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation, à savoir l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, la directivité, le gain, le diagramme de rayonnement et le taux d'onde stationnaire.

### II.2.5.1 Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée  $Z_e$  est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension  $V_e$  sur le courant  $I_e$  présenté à l'entrée (Figure I.7).

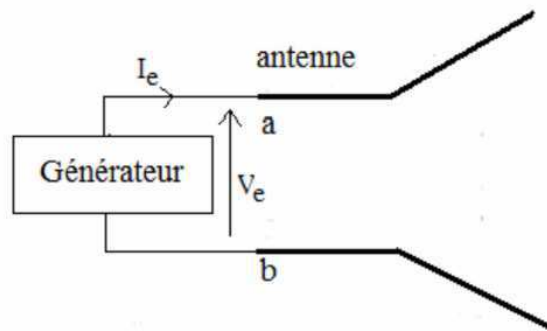


Figure II. 7 : Antenne en mode émetteur.

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$Z_e$ : impédance d'entrée aux bornes a et b.

$R$  : résistance de l'antenne aux bornes a et b.

$X$  : réactance de l'antenne aux bornes a et b.

Généralement, pour qu'une antenne ait un bon rendement, il est nécessaire qu'elle ait une bonne adaptation d'impédance avec l'émetteur, la ligne de transmission, et l'antenne aient presque la même impédance.

### II.2.5.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident.

Généralement ce coefficient  $\Gamma$  est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance caractéristique  $Z_c$  par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (\text{II. 2})$$

On peut représenter  $\Gamma$  sous forme de paramètre S en dB tel :

$$S_{11(\text{dB})} = 20 \log(\Gamma) \quad (\text{II. 3})$$

### II.2.5.3 Directivité

La directivité caractérise l'aptitude d'une antenne à concentrer l'énergie dans une ou plusieurs directions privilégiées.

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  est une mesure relative de la puissance rayonnée dans une direction  $P(\theta, \varphi)$  par rapport à la puissance isotrope rayonnée notée  $P_I$  [18] :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_I} \quad (\text{II. 4})$$

### II.2.5.4 Gain

En général, une antenne rayonne une puissance qui varie en fonction de la direction considérée. On appelle gain  $G(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$ , le rapport de la puissance  $P(\theta, \varphi)$  dans cette direction à la puissance  $P_A$  d'alimentation d'une source isotrope de référence par unité d'angle solide.

Le gain est proportionnel à la directivité. Il porte la même information sur les directions de rayonnement. Le gain s'exprime en décibel (dB). On utilise quelquefois la notation *dB*i pour préciser la référence au rayonnement isotrope. Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB.

D'après les définitions précédentes, le gain  $G$  peut s'écrire comme suit:

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (\text{II. 5})$$

### II.2.5.5 Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de diagramme de rayonnement. La direction du maximum de rayonnement est appelée l'axe de rayonnement de l'antenne. La représentation de cette fonction donne les caractéristiques du rayonnement dans l'espace. Classiquement, on a pris l'habitude de représenter le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H. Le plan E est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique. Le plan H est défini comme le plan contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique. Le diagramme de rayonnement, généralement en coordonnées logarithmiques, est présenté soit en coordonnées rectangulaires, soit en coordonnées polaires, dans les deux plans perpendiculaires (E et H).

Certaines représentations en trois dimensions ont l'avantage de montrer toutes les directions de rayonnement dans l'espace, mais permettent difficilement une appréciation quantitative.

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  $(\theta_0, \varphi_0)$  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 (figure II.8).

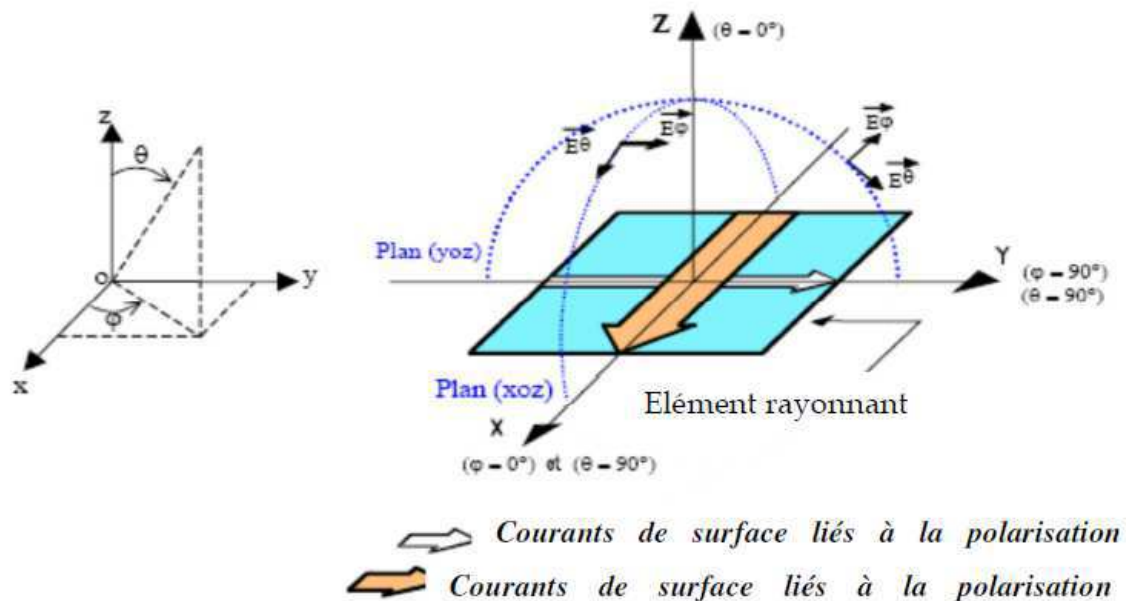


Figure II. 8 : Diagramme de rayonnement et courants de surface.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est principalement relié à sa géométrie mais peut aussi varier avec la fréquence. Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne

rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. Dans ce cas, la fonction caractéristique de rayonnement est égale à 1 quel que soit la direction considérée.

En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes ». Le lobe principal correspond à la direction privilégiée du rayonnement. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue donc on cherche à les atténuer.

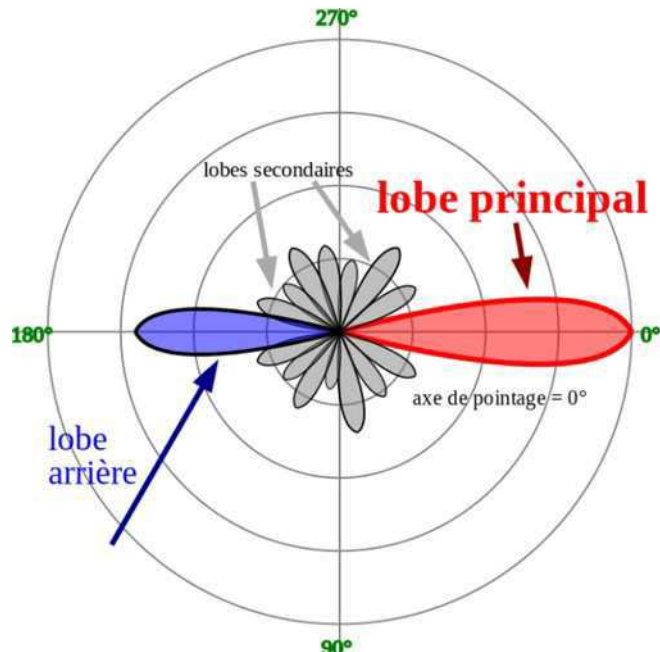


Figure II. 9 : Exemple de diagramme de rayonnement.

## II.3 Technologie ultra large bande

### II.3.1 Définition

Les communications ULB ne sont pas une nouvelle technologie, en fait, elles ont été utilisées la première fois par Guglielmo Marconi en 1901. Cependant, l'avantage d'une grande largeur de bande et la possibilité de mettre en œuvre des systèmes à utilisateurs multiples.

L'Ultra Large Bande (ULB ou UWB pour Ultra Wide Band) a connu un fort engouement dès son apparition en Février 2002 aux États-Unis d'Amérique d'une décision de la Commission Fédérale des Communications (FCC) autorisant l'émission en dessous d'un certain seuil, de signaux dans une bande de fréquences allant de 3,1 à 10,6 GHz. Cette technique de transmission radio consiste à utiliser des signaux dont le spectre s'étale sur une large bande de fréquences, typiquement de l'ordre de 500 MHz à plusieurs GHz. Elle fut



autrefois utilisée pour des applications radars et militaires, puis transposée il y a quelques années aux applications de télécommunications, suscitant ainsi un intérêt grandissant au sein de la communauté scientifique et industrielle.

Le terme ultra large bande désigne les systèmes qui transmettent et reçoivent des ondes dont la largeur de bande relative LBR (FractionalBandWidth) est supérieure ou égale à 0.25. La largeur de bande relative LBR est définie de la façon suivante [19]:

$$LBR = \frac{f_H - f_L}{f_c} \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (\text{II. 7})$$

$f_c$  : représente la fréquence centrale de la transmission.

$f_H$  : représente la fréquence supérieure de la bande de fréquences.

$f_L$  : représente la fréquence inférieure de la bande de fréquences.

### **II.3.2 Caractéristiques de la technologie ULB**

La technologie à bande ultra-large (ULB) possède certaines caractéristiques intéressantes :

➤ ***Une faible susceptibilité à l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples :***

L'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples peut réduire l'efficacité des systèmes de communication classiques (non ULB). Dans le cas des communications ULB, le signal transmis possède une grande largeur de bande et, comme la fenêtre d'observation au récepteur est étroite, les réflexions multiples avec des retards inférieurs à la nanoseconde peuvent être résolues et additionnées de manière constructive pour donner un gain comparable à celui d'une propagation par trajet unique direct.

➤ ***Une insensibilité au brouillage :***

Une caractéristique importante des systèmes ULB est leur gain de traitement élevé, qui donne une indication de la résistance d'un système au brouillage.

➤ *Des communications protégées :*

Les signaux ULB sont plus secrets et potentiellement plus difficiles à détecter que les signaux de radiocommunication classiques, parce qu'ils occupent une grande largeur de bande, ils peuvent être produits sous une forme semblable au bruit, et peuvent être transmis à un niveau de densité spectrale de puissance bien inférieur au bruit de fond des récepteurs de radiocommunication classiques, et peuvent être transmis avec un code de synchronisation unique à des millions de bits par seconde. Ces caractéristiques permettent la transmission protégée de signaux avec une faible probabilité de détection (LPD) et une faible probabilité d'interception (LPI).

➤ *Une simplicité relative des systèmes :*

Dans les systèmes de communication sans fil qui utilisent la technologie ULB, l'information de la bande de base peut moduler directement des impulsions courtes au lieu de moduler une onde sinusoïdale. Dans cette forme de mise en œuvre, l'émetteur-récepteur ULB ne comprend aucun synthétiseur à boucle à verrouillage de phase, ni oscillateur commandé par tension, ni mélangeur, ni amplificateur de puissance. L'émetteur-récepteur ULB a donc une architecture relativement simple par comparaison à l'émetteur-récepteur superhétérodyne, ce qui pourrait se traduire par des coûts inférieurs de l'équipement.

➤ *Des propriétés de pénétration.*

Les signaux ULB ont une bonne capacité de pénétration dans les murs et les obstacles et ils permettent la localisation avec une grande précision. Ces propriétés seraient également utiles dans des applications telles que l'imagerie médicale

### **II.3.3 Applications de l'ULB**

Il existe trois grandes catégories d'applications principales pour les systèmes ULB : la détection, la géolocalisation et les communications sans fils. Les deux premiers ne demandent pas un gros débit d'information, mais nécessitent une bonne précision sur de grande distance et une robustesse aux trajets multiples, tandis que les communications sans fils peuvent tirer profit des très hauts débits à courte portée offerts par ULB. Les possibilités d'utilisation commerciales de la technologie ULB sont donc multiples [20]. La figure II.9 représente les différentes applications de l'ULB :

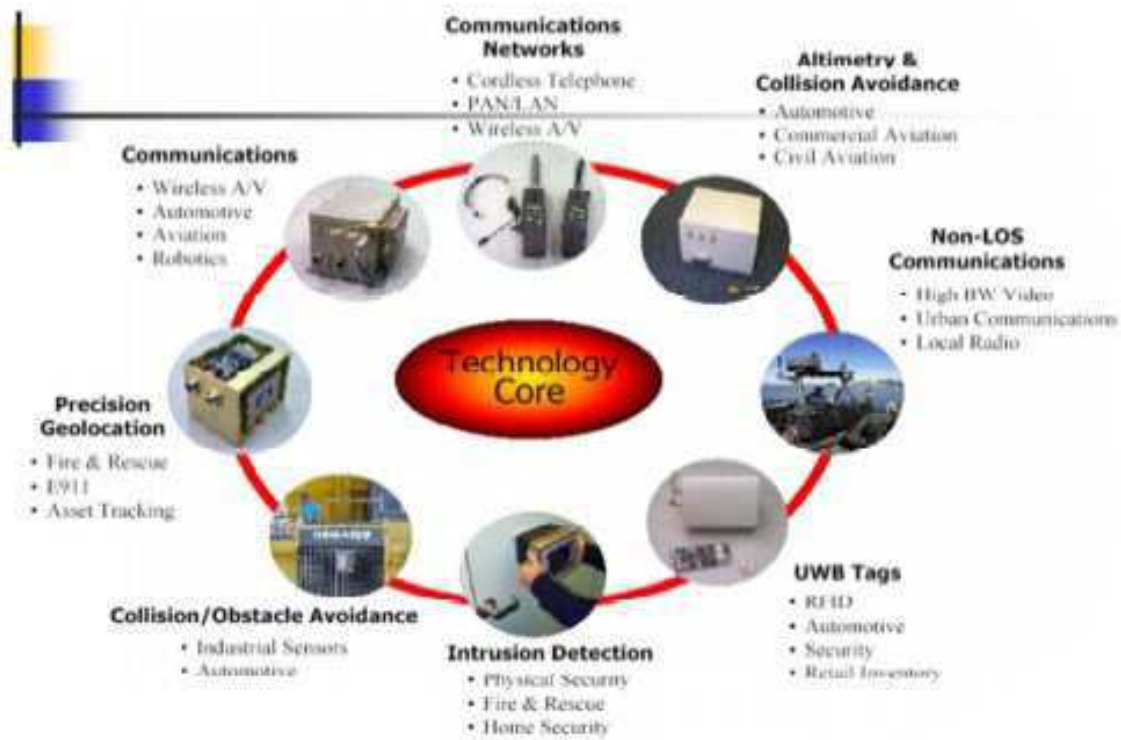


Figure II. 10 : Différentes applications de l'ULB.

### II.3.4 Techniques d'élargissement de la bande passante

Différentes techniques ont été envisagées pour élargir la bande passante et stabiliser le diagramme de rayonnement. On peut citer, pour augmenter la bande passante du monopole, l'utilisation d'un court-circuit, le décalage de l'alimentation, l'utilisation des encoches, et la technique de l'évasement symétrique.

Les techniques d'alimentation en large bande peuvent également être efficaces, à condition qu'elles présentent une large bande d'adaptation en impédance. Pour y arriver, il est intéressant de recourir aux alimentations par couplage : il s'agit d'une ligne de transmission alimentant un patch par une ouverture dans un plan de masse (parfois en forme de H). L'antenne comprend deux couches, pour le patch et pour la ligne de transmission. Le plan de masse est donc au milieu de ces deux couches. Cette structure bénéficie d'une bande large de 25%.

On peut faire un couplage par une ligne coaxiale. Une sonde alimente la plaque circulaire ou en forme de L. Cette plaque est séparée de l'élément rayonnant, ce qui permet d'obtenir

une bande de largeur allant jusqu'à 39%. Toutefois, le diagramme de rayonnement affiche une symétrie si la plaque est en forme de L.

On peut également ajouter une charge résistive entre le patch rayonnant et le plan de masse, afin d'obtenir une antenne large bande de dimensions réduites. Ici, la résistance sert à faire le court-circuit et permet une bonne réduction des dimensions de l'antenne. Cette utilisation de la résistance rend l'antenne mieux adaptée en impédance sur une bande de fréquences encore plus large. Comme désavantage de cette technique, l'on retient que l'efficacité de l'antenne est réduite du fait de la présence de pertes par effet joule dans la charge résistive. Avec la charge capacitive ajoutée, l'éventail de fréquence centrale peut être plus large. Cette technique peut être combinée avec d'autres techniques de réduction citées plus haut, afin d'obtenir des antennes compactes à bande plus large.

On peut également élargir la bande passante en ajoutant des fentes dans une structure. Si ces fentes sont latérales et près des bords rayonnants, on élargit la bande passante des antennes patch conventionnelles.

Depuis 1992, date de la 1ère utilisation du monopole circulaire, plusieurs études ont conduit à l'utilisation du monopole carré sous sa forme planaire pour des applications ultra large bande.

Afin d'élargir la bande passante du monopole ou de garder stable son diagramme de rayonnement, on a essayé plusieurs différentes techniques. D'abord, on a tenté d'utiliser un court-circuit, puis de décaler l'alimentation, puis d'utiliser des encoches, puis enfin la technique de l'évasement symétrique. Le même effet physique (ajout des modes supplémentaires à la structure) est à la base de toutes ces techniques [21]

## **II.3.5 Antennes Ultra Large Bande (ULB)**

### **II.3.5.1 Antennes indépendantes de la fréquence**

Les antennes indépendantes de la fréquence sont connues depuis longtemps et ont été définies par Rumsey en 1957. Ce sont des antennes qui sont entièrement définies par leurs dimensions angulaires. Les performances de l'antenne (diagramme de rayonnement, impédance d'entrée) sont indépendantes de la fréquence. Pour ce type d'antenne, si l'on multiplie toutes les dimensions de l'antenne par un facteur X, les performances de l'antenne restent inchangées, seule la fréquence de travail augmente du même pour le facteur X.

Théoriquement, ces antennes présentent une bande passante infinie, cependant, en pratique leur bande passante est finie à cause des dimensions finies de l'antenne [22].

### II.3.5.1.1 Antennes spirales

Ces antennes ont été décrites par Dyson en 1959. Il existe trois types de spirales: spirale équi-angulaire (spirale logarithmique), spirale conique et la spirale de type Archimède.

#### a) Antenne à spirale logarithmique

L'antenne spirale équi-angulaire ou logarithmique fait partie des antennes indépendantes de la fréquence, puis qu'elle peut être définie uniquement par ses angles. Son équation en coordonnées polaires  $(\rho, \theta)$  peut s'écrire sous la forme :

$$\rho = k e^{a \theta} \quad (\text{II. 8})$$

Où  $k$  et  $a$  sont deux constantes.

#### b) Antenne spirale conique

Cette antenne est une forme dérivée de la précédente : En effet, il suffit, pour la réaliser d'imprimer les spirales sur un cône en matériau diélectrique servant de support pour le dessin. Une représentation pratique de l'antenne spirale conique est présentée sur la figure II.11 :

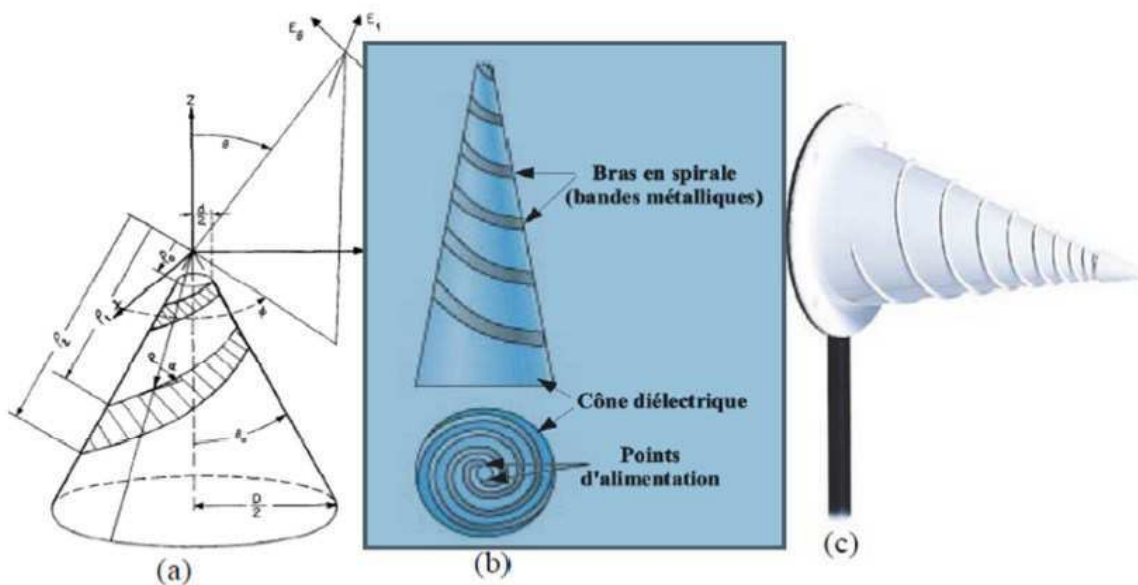


Figure II. 11 : Antennes spirales coniques. (a) configuration ; (b) vue de côté et de dessus ;(c) exemple de réalisation

Théoriquement, elle possède une bande passante infinie, mais en pratique, du fait de ses dimensions finies, elle couvre une bande passante de quelques octaves. La bande passante est uniquement limitée par les dimensions des rayons externes de la spirale. Contrairement à l'antenne précédente qui avait un rayonnement bidirectionnel, cette antenne a un rayonnement unidirectionnel, le maximum du champ étant orienté selon l'axe du cône.

**c) Antenne à spirale d'Archimède**

L'antenne à spirale d'Archimède est formée de deux brins (figure II.12). Ces brins sont deux spirales autour d'un même centre d'expansion. Elles sont imprimées sur un même substrat. Le substrat étant planaire et servant de support à la structure.



**Figure II. 12 : L'antenne spirale d'Archimède.**

Ce type d'antenne est plus utilisé que les antennes à spirale logarithmique car, à performance égale (même bande passante), cette structure est plus compacte que la spirale logarithmique : L'étalement linéaire des brins de la spirale permet de faire plus de tours par unité de surface que l'antenne équi-angulaire. Ses spécificités ressemblent beaucoup à celles des types d'antennes à spirales que l'on a vues précédemment. Sa bande passante est de plusieurs octaves et est limitée par les rayons externes de la spirale, sa polarisation est circulaire et son diagramme de rayonnement bidirectionnel.

### II.3.5.1.2 Antenne log-périodique

Les antennes log-périodique ont été conçues pour la première fois par Duhamel et Isabell en 1959. Elles s'appuient sur le principe d'une antenne dimensionnée pour toutes les fréquences mais de façon périodique et non répétitive comme c'est le cas des antennes que l'on a vues précédemment. Ainsi, si une structure rayonnante est transformée en une autre structure identique par la multiplication de ses dimensions par  $\tau$ , toutes les deux présentent les mêmes performances (adaptation et diagramme de rayonnement) l'une à la fréquence  $f$  et l'autre à la fréquence  $f/\tau$ . En répétant cette transformation  $N$  fois les performances sont les mêmes aux fréquences  $f_0\tau^N$  où  $f_0$  est la fréquence de référence et ont une période de répétition de  $\log(\tau)$  en fonction de  $\log f$  d'où leur appellation. Leur principe est donc bien analogue aux antennes dites indépendantes de la fréquence.

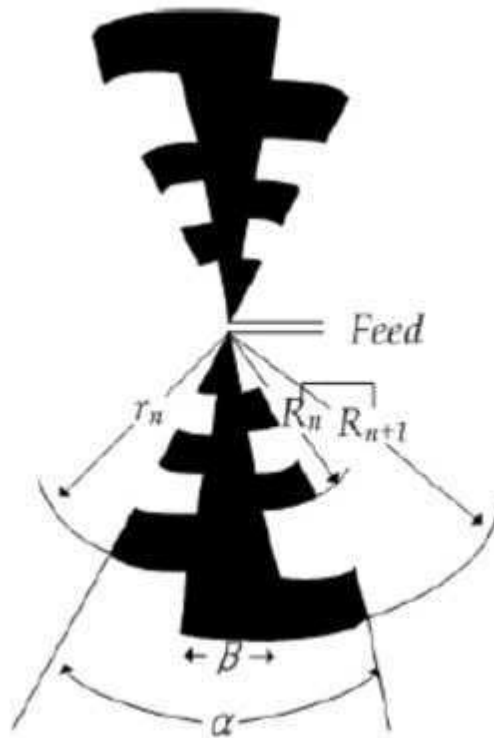


Figure II. 13 : Structure d'antenne log-périodique.

### II.3.5.2 Antennes élémentaires

De très bonnes performances en termes de largeur de bande peuvent également être obtenues à partir d'antennes dites élémentaires. Cette catégorie d'antennes ULB est en fait une évolution des simples dipôles ou monopôles dont le comportement est bien connu et décrit

dans de nombreux ouvrages. En effet, une caractéristique exploitée de ces antennes est que leur bande passante augmente avec le diamètre, et donc la surface de leur cylindre rayonnant. Cette idée est développée et donne naissance à des antennes de formes évasées coniques, triangulaires, rondes ou elliptiques qui possèdent alors des propriétés ultra large bande. De plus, ces antennes conservent les caractéristiques intéressantes de rayonnement omnidirectionnel ainsi que les règles de dimensionnement des antennes monopôles ce qui en fait des structures relativement compactes.

#### a) Antenne biconique

La fin des années 1930 apporte un renouveau d'intérêt pour les antennes possédant de larges bandes passantes, notamment dans le cadre des recherches pour la télévision. Ainsi, l'antenne biconique est introduite par Carter en 1939. Son concept est basé sur le fait que des structures d'antennes filaires plus épaisses amenaient à des bandes passantes plus large. Celle-ci pouvait être encore plus étendue si les conducteurs s'évasent pour former la structure biconique (Figure II.14).

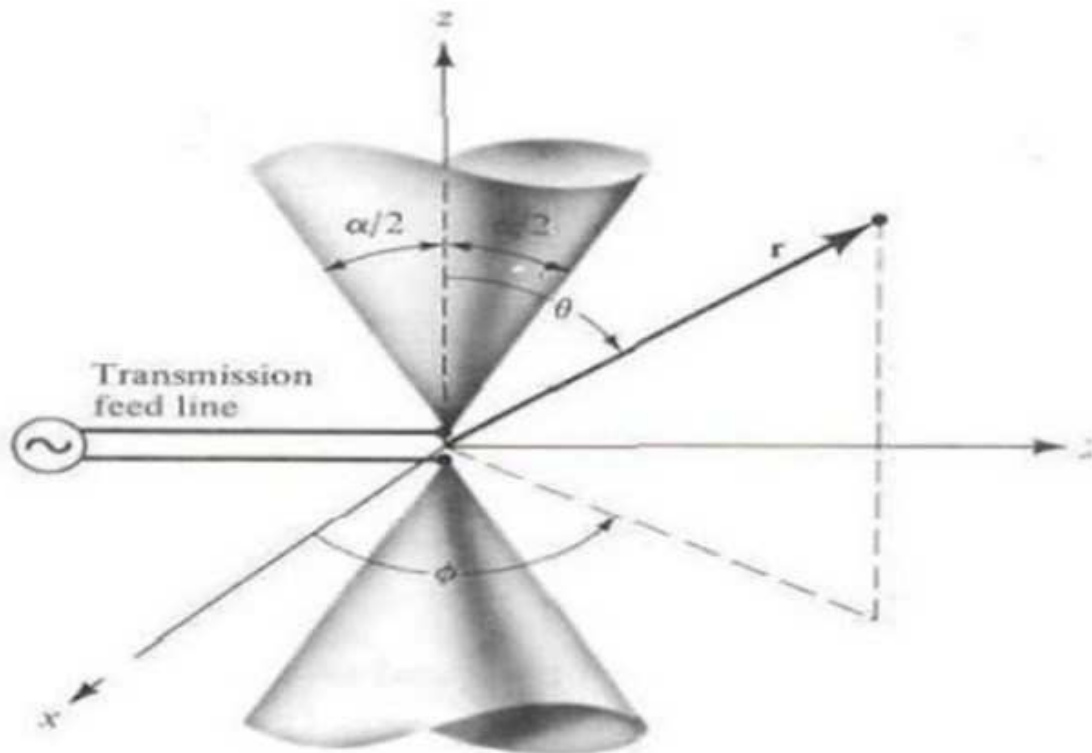


Figure II. 14 : Antenne biconique infinie.



### b) Antenne discone

L'antenne discone est une antenne biconique dont un des cônes est remplacé par un plan de masse infini ou de dimensions pouvant être considérées comme telles par rapport à la longueur d'onde la plus basse. Ce plan de masse est généralement de forme circulaire ce qui fait que la structure totale de l'antenne est constituée d'un disque et d'un cône (d'où son appellation). La figure II.15 illustre un exemple pratique d'une antenne discone.



Figure II. 15 : Exemple de réalisation d'une antenne discone.

### c) Antenne papillon

De part ses bonnes caractéristiques en termes de bande passante, mais également de rayonnement, l'antenne biconique représente une bonne base pour concevoir de nouvelles antennes ULB. Le but principal de ces antennes est de conserver ses caractéristiques idéales, tout en étant plus légères, et en présentant une géométrie plus simple, moins coûteuse à réaliser et surtout moins encombrante. Ainsi, l'antenne papillon est une version planaire de l'antenne biconique finie, qui peut être imprimée sur substrat. Il s'agit donc d'une structure symétrique.

De même que pour cette dernière, les courants sont concentrés principalement aux bords de la structure, ce qui permet également d'utiliser des techniques de réalisation filaires tout en gardant des performances équivalentes lorsque l'application visée nécessite une exposition au vent.



**Figure II. 16 : Exemple de réalisation d'une antenne papillon.**

L'antenne papillon présente de moins bonnes performances en termes de bande passante que l'antenne biconique, celle-ci étant limitée par la troncature de l'antenne. Cependant, son impédance d'entrée varie plus avec la fréquence que celle de l'antenne biconique finie de mêmes dimensions. Il en découle une moins bonne qualité d'adaptation ainsi qu'une bande passante plus faible, mais qui peut tout de même atteindre des valeurs supérieures à 100% [23].

## **II.4 Conclusion**

Ce chapitre a fait l'objet dans la première partie de généralités sur les antennes imprimées, leurs techniques d'alimentation les plus utilisées ainsi que leurs emplois dans différents services et secteurs des communications et autres.

Dans la seconde partie de ce chapitre notre intérêt s'est porté sur la technologie ULB. Après une description de cette technologie ainsi que les différentes phases de son développement, du début confidentiel durant les années 80 et 90 jusqu'à l'enlèvement de la

confidentialité vers 1994, sont présentés. On est passé ensuite à la présentation des avantages de l'ULB. Les caractéristiques de la technologie ULB sont aussi présentées. Par la suite on a abordé les divers types d'applications de l'Ultra Large Bande. Enfin, on a terminé ce chapitre par une exposition des divers types d'antennes Ultra Large Bande.

A red decorative frame with a wavy, irregular border, resembling a stylized book cover or a frame for a title page. It has a double-line effect.

**Chapitre III : Etude et Conception**  
**d'une Antenne MIMO-ULB**

### **III.1 Introduction**

Le développement instance des objets connectés et la demande d'un débit de plus en plus élevé ont poussé les concepteurs à chercher de nouvelles technologies pour répondre à cette demande. L'une des technologies, qui s'est imposée comme étant la solution clé, est l'utilisation des antennes MIMO. Ce type d'antenne permet d'augmenter les débits d'une manière spectaculaire.

Ce chapitre est consacré à la conception d'une antenne MIMO-ULB. Pour cela, nous commençons par concevoir une antenne ULB seul avec de bonnes performances. Cette antenne sera par la suite exploitée pour la conception de l'antenne MIMO-ULB.

Plusieurs paramètres seront analysés pour juger les performances de l'antenne MIMO-ULB proposée, dont le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le coefficient de corrélation et le gain diversité.

### **III.2 Description du logiciel de simulation**

Le logiciel CST MICROWAVE STUDIO est un outil spécialisé pour la simulation électromagnétique 3D de composants haute fréquence. Il permet l'analyse rapide et précise des dispositifs à haute fréquence (HF) tels que les antennes, les filtres, les coupleurs, les structures planaires et multicouches.

CST développe une suite de solutions de modélisation électromagnétique de haute performance. Celle-ci permet de caractériser, concevoir et optimiser le comportement électromagnétique d'un équipement avant de passer à la phase de réalisation au laboratoire. Ceci permet de réaliser des économies conséquentes sur le coût et le temps de développement, de réduire les risques et ainsi augmenter les performances et les profits.

En motionne aussi que le CST MICRO WAVE STUDIO est un logicielle de simulation électromagnétique de structure passive en 3 Dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (Finite Intégration technique). Cette méthode permet de décrire l'espace en trois dimensions, ceci a rendu le logicielle applicable pour un bon nombre de problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences réalisant des calculs temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la

plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST, discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles.

CST Microwave Studio fait partie de la CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de module conçue pour différents types d'application.

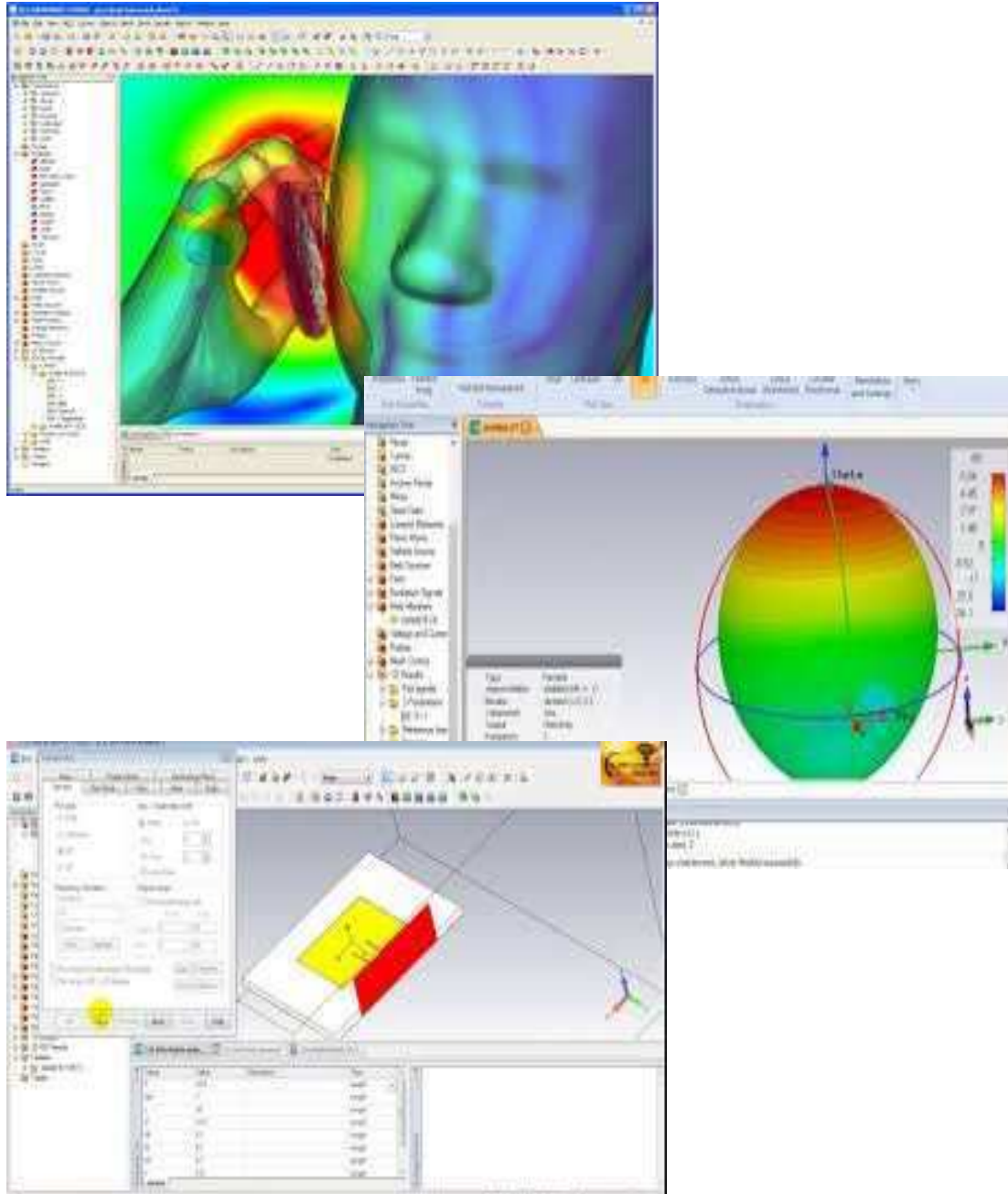


Figure III.1 : CST DESIGN STUDIO suite.

### III.3 Géométrie de l'antenne

La géométrie de l'antenne proposée est constituée d'un élément rayonnant de forme rectangulaire en U alimenté par une ligne micro-ruban. La structure de cette antenne est illustrée sur la figure III.2.

Le patch avec sa ligne d'alimentation est imprimé sur la face supérieure d'un substrat de type Taconic TLC-30 standard de permittivité relative  $\epsilon_r = 3$  et d'épaisseur  $h = 1.575 \text{ mm}$ . Le substrat est partiellement mis à la terre. Afin d'augmenter la bande passante de l'antenne, on a ajoutée des encoches sur les extrémités de l'antenne.

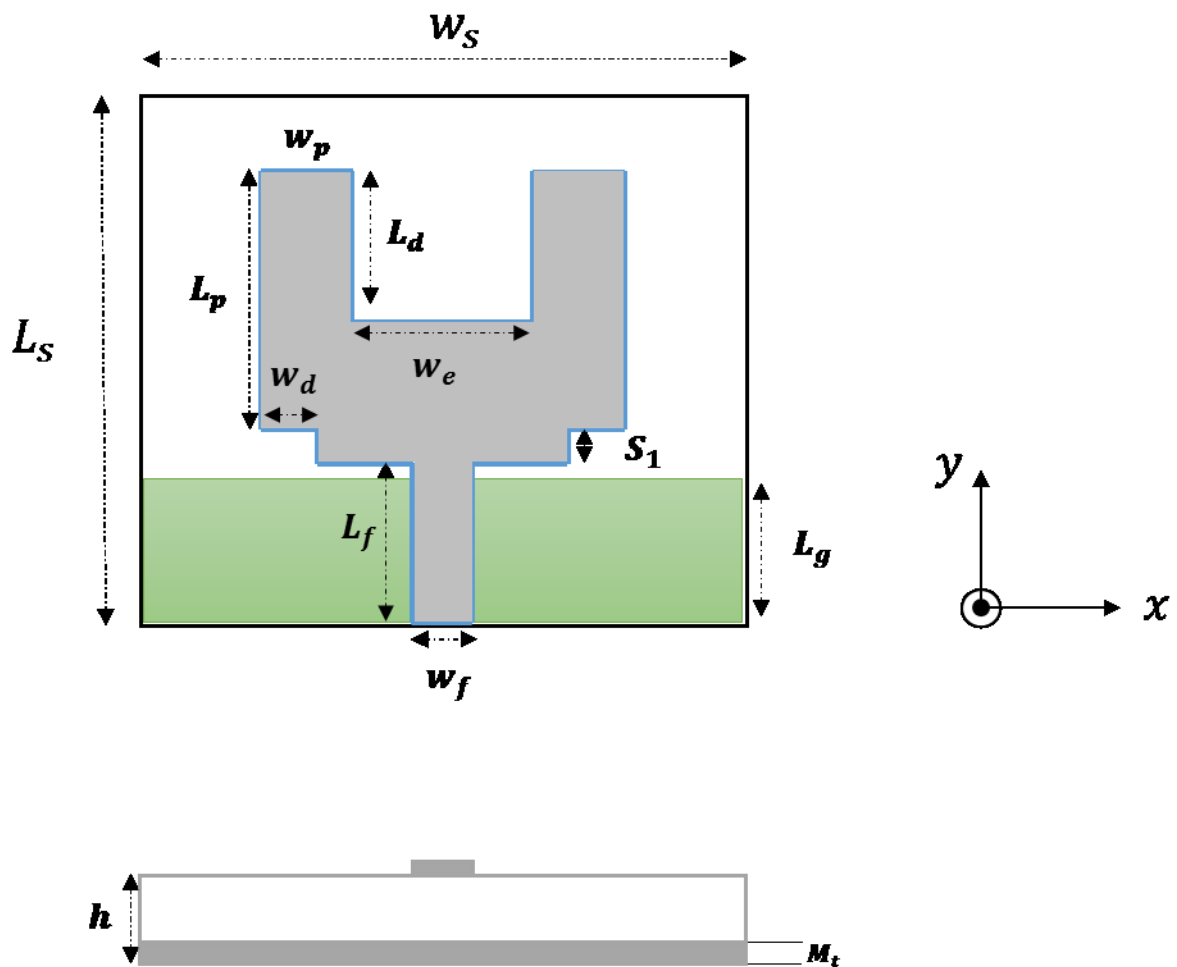


Figure III.2 : Géométrie de l'antenne étudiée (unité en mm).

Le tableau III.1 ci-dessous présente les différentes dimensions de notre antenne après son optimisation.

Tableau III. 1 : Dimensions de l'antenne proposée.

| Paramètre | Valeur optimisée |
|-----------|------------------|
| $w_s$     | 40 mm            |
| $L_s$     | 35 mm            |
| $L_f$     | 10,5 mm          |
| $w_f$     | 3,9 mm           |
| $L_g$     | 9,5 mm           |
| $L_p$     | 17 mm            |
| $w_p$     | 6 mm             |
| $w_d$     | 3,75mm           |
| $w_e$     | 12mm             |
| $S_1$     | 2,25 mm          |

### III.4 Etapes de conception de l'antenne

L'étape 1 est la sélection de l'application dans laquelle la structure sera créée (Figure III.3).

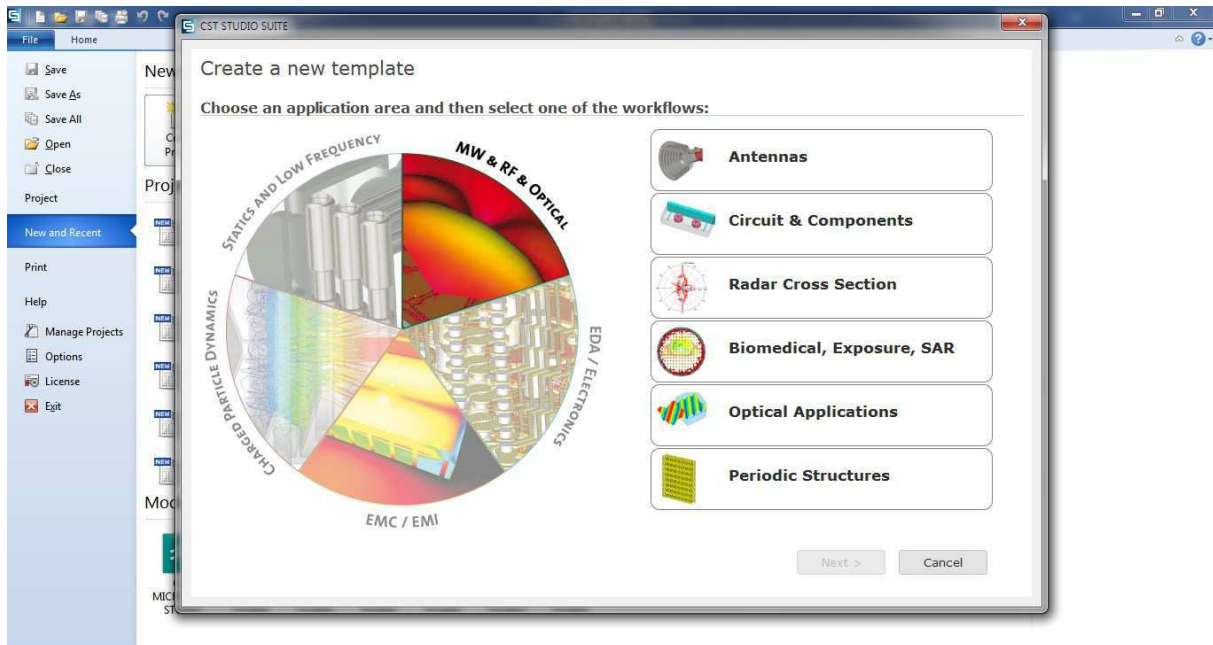


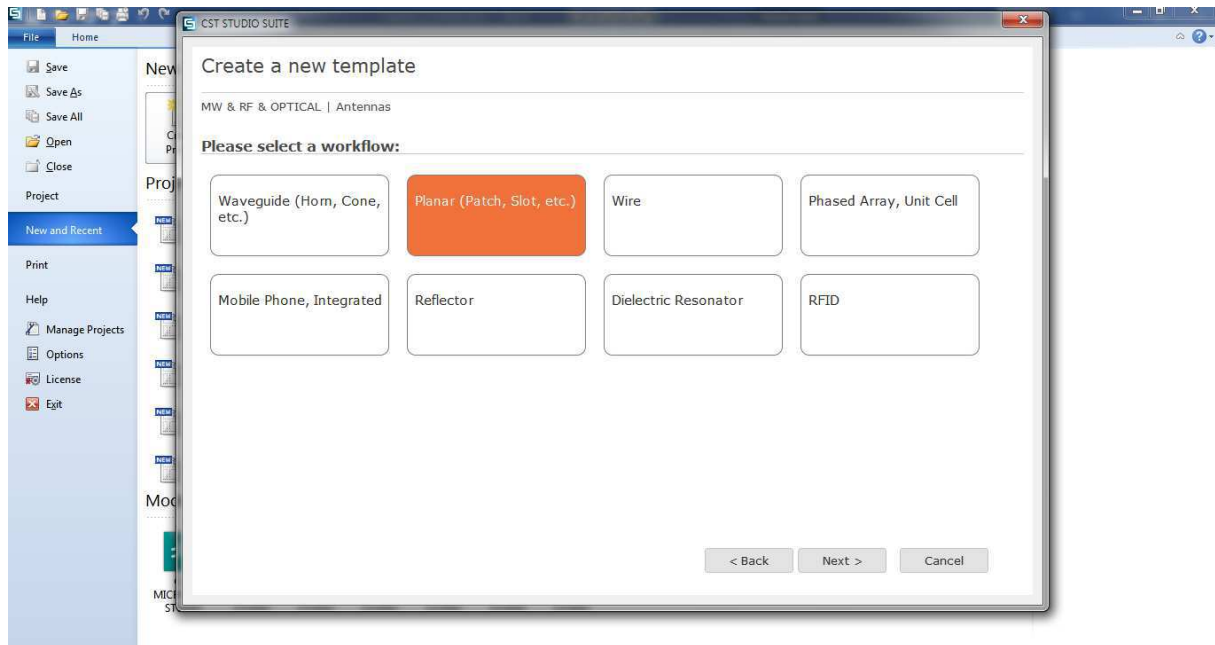
Figure III .3 Erreur ! Signet non défini. : Choix de l'application de travail.

Sur la figure III.3, on aperçoit l'interface du logiciel au moment de la création d'un nouveau projet. Il y a des modèles disponibles, à l'exemple de **MW & RF & optical** dans



notre cas ; c'est dire que le choix des unités et des conditions aux limites a été préalablement effectués.

La deuxième étape c'est le choix du type de l'antenne, dans notre cas, on choisit les antennes planaires comme il est montré sur la figure III.4, et ensuite on doit fixer la plage de fréquence dans laquelle on analyse le problème, Figure III.5.



**Figure III. 3 : Choix du type de l'antenne.**

La troisième étape concerne la création de différents éléments que constitue l'antenne proposée à savoir le patch, le substrat et la ligne d'alimentation.

En commençant par la création du substrat, la figure III.5 montre la méthode utilisée pour créer une couche en diélectrique, pour cela on doit tout d'abord ouvrir le menu « Modeling », ensuite appuyer sur le bouton « Brick ». Après ça, une boîte de dialogue apparaît comme illustré sur la figure III.6.

Il suffit maintenant de remplir les champs de cette boîte de dialogue, c'est-à-dire le nom du substrat, leurs dimensions et le matériau utilisé. On remarque ici qu'on n'a pas besoin d'entrer des valeurs numériques, mais simplement des paramètres, ce qui rend aisés l'optimisation et les ajustements géométriques de notre antenne.

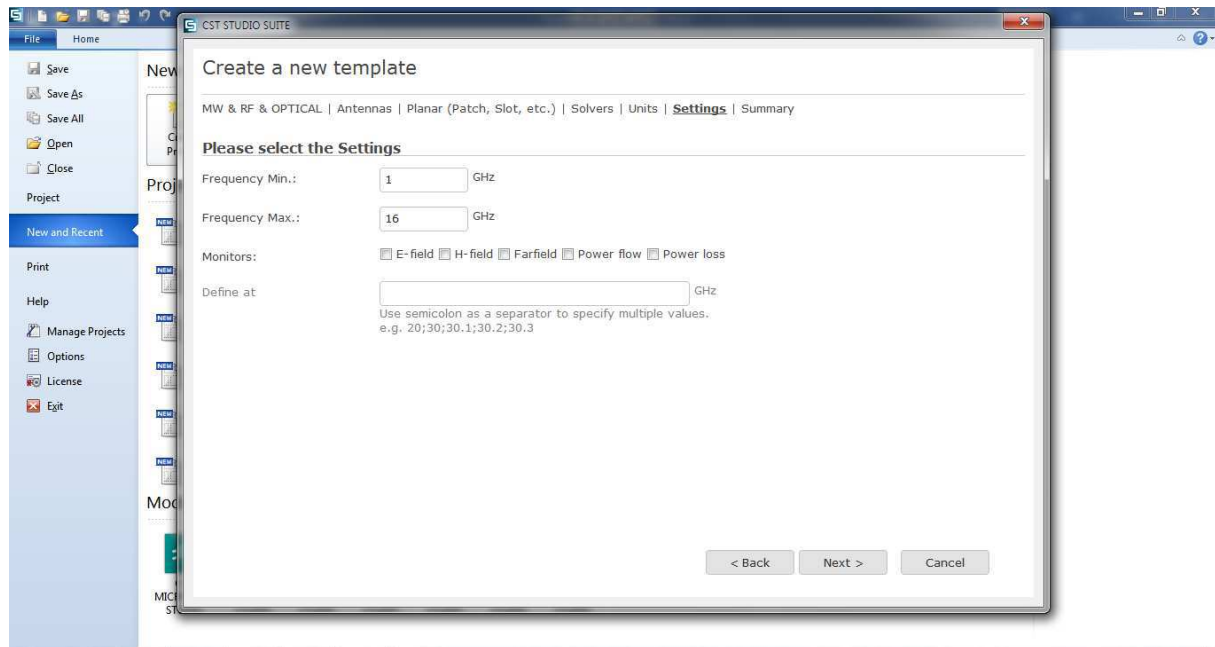


Figure III. 4 : Déterminer la plage de fréquence.

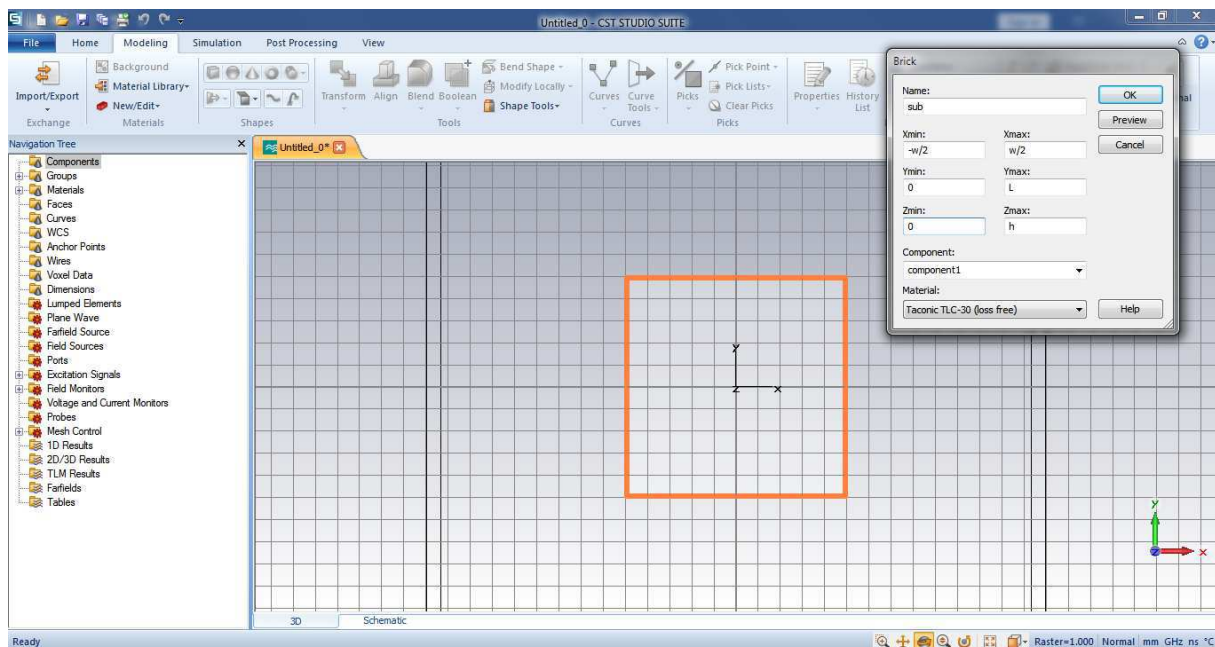
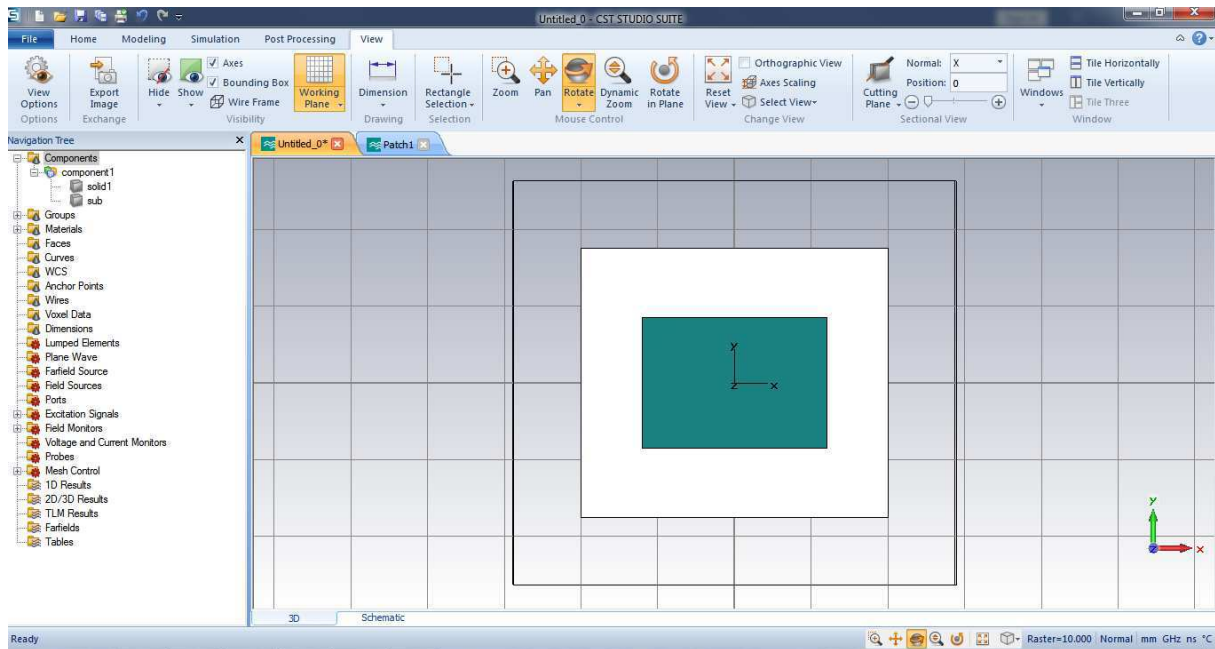


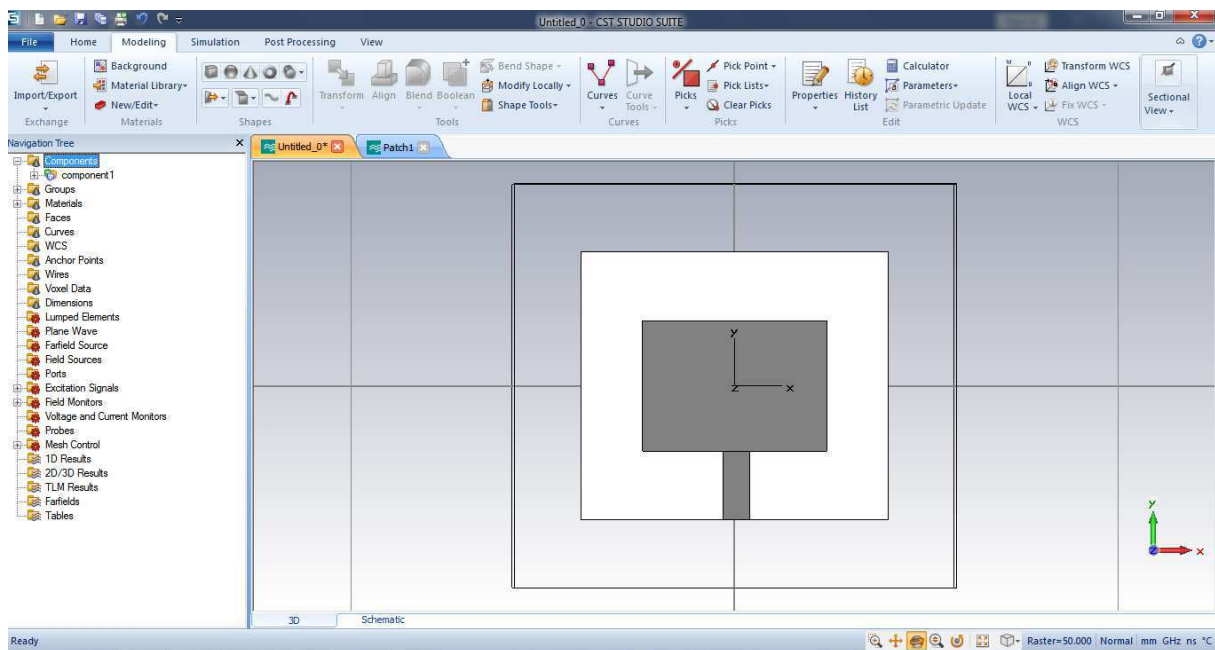
Figure III. 5 : Déterminer la plage de fréquence.

Pour la création du patch, il suffit de suivre les mêmes étapes précédentes, sauf concernant son matérielle on doit utiliser le « **copper** » puisque les éléments rayonnants sont en métal (le cuivre).



**Figure III. 6 : Création du patch**

Après avoir créé le substrat diélectrique et le patch, il nous reste de créer la ligne d'alimentation. Cette étape est illustrée sur la figure III. .



**Figure III. 7 : création de la ligne d'alimentation.**

Pour améliorer les performances de notre antenne, on a inséré des encoches. Enfin, la dernière étape, c'est l'excitation de la structure avec un port avant la phase de calculs et de

résolution du problème électromagnétique. On peut opter soit pour un port guide d'onde, soit pour un port discret. De coutume, le port guide d'onde sert à exciter les structures telles que le guide d'onde rectangulaire ou à simuler un connecteur (relie à un câble coaxial), et se localise aux frontières du domaine de calculs (Figure III.9).

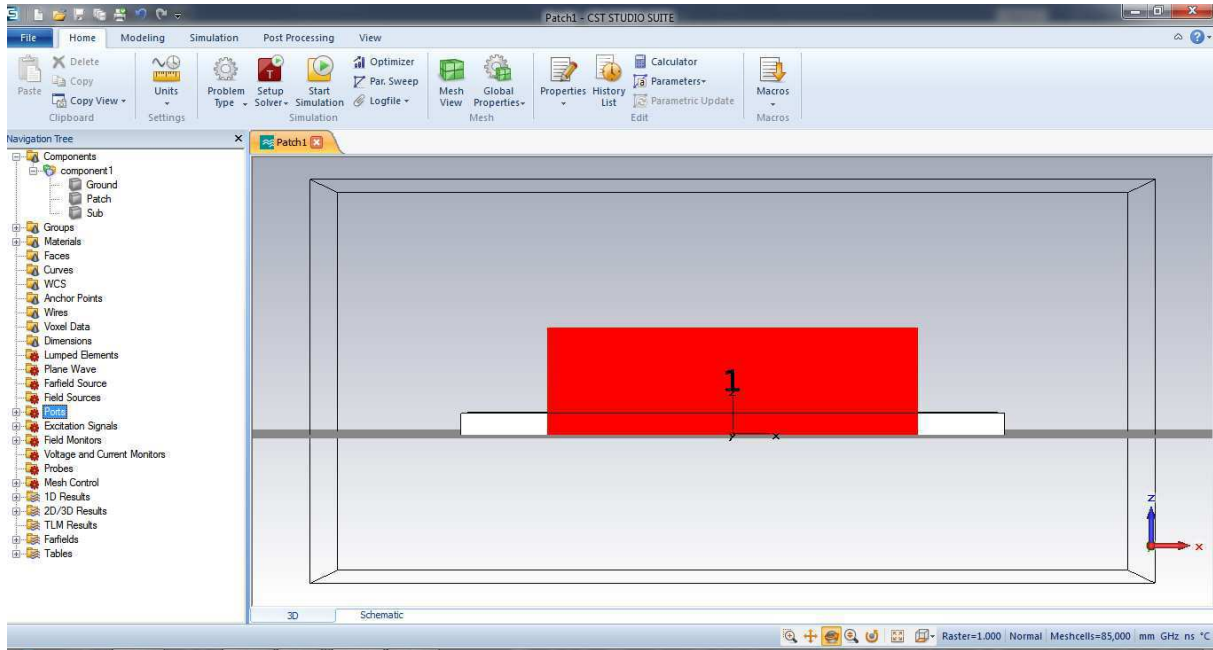


Figure III. 8 : Conception du l'alimentation.

Le résultat final de la conception de notre antenne ULB est présenté dans la figureIII.10.

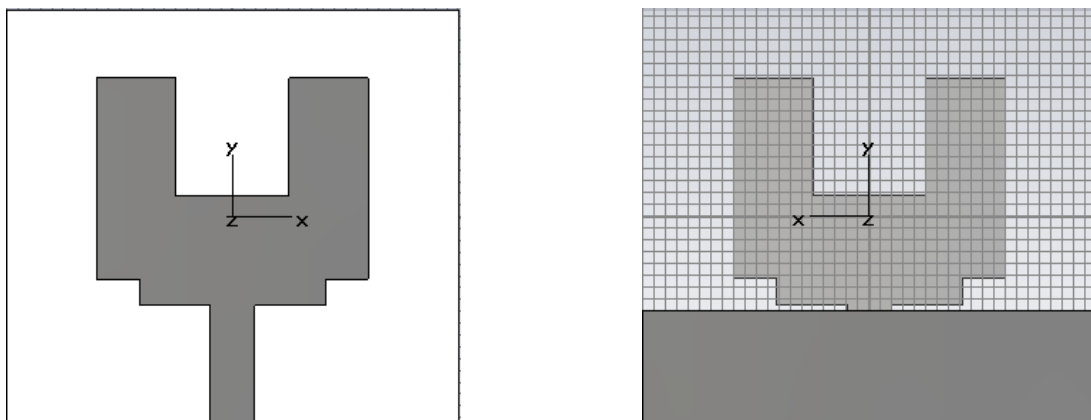


Figure III.9 : Géométrie finale de l'antenne proposée.

## III.5 Résultats et discussions

### Antenne seule

Après avoir terminé les différentes étapes de la conception de l'antenne proposée, on a lancé la simulation dans le but d'analyser ces performances.

Dans ce qui suit, les résultats de notre simulation seront détaillés en commençant par les résultats obtenus pour une seule antenne et par la suite les résultats pour un réseau de deux antennes. Les paramètres analysés sont le coefficient de réflexion  $S_{11}$ , les différents diagrammes de rayonnement, le gain et enfin le coefficient de corrélation ainsi que diversité dans le cas du réseau d'antenne.

#### III.5.1.1 Coefficients de réflexion

Le coefficient de réflexion de l'antenne proposée, présentée dans la figure III.11, montre une réponse en fréquence à -10 dB qui couvre une bande très large qui varie de 3 à 12 GHz et qui peut répondre à l'exigence des applications ultra large bande [3.1-10.6 GHz].

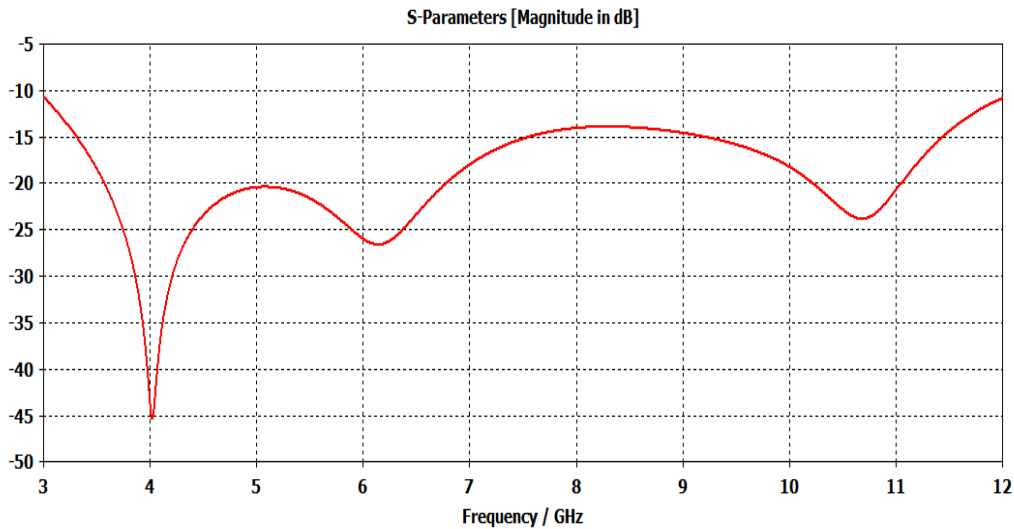


Figure III. 10 : Coefficients de réflexion de l'antennes proposée.

La variation du  $S_{11}$  simulé en fonction de la fréquence dans la bande [3, 12] GHz montre que cette structure possède trois fréquences de résonance  $f_{r1} = 4GHz$ ,  $f_{r2} = 6.1GHz$  et  $f_{r3} = 10.6 GHz$ .

### III.5.1.2 Gain de l'antenne

Nous allons maintenant nous intéresser au gain de l'antenne. On peut constater que le gain d'antenne croît avec la fréquence. Considérons la figure III.12 , le gain atteint une valeur maximale proche de 7,2 dB pour une fréquence de 11 GHz. Le gain dans la direction normale varie entre 2.4 et 7,2 dB sur toute la bande [3 à 11 GHz].

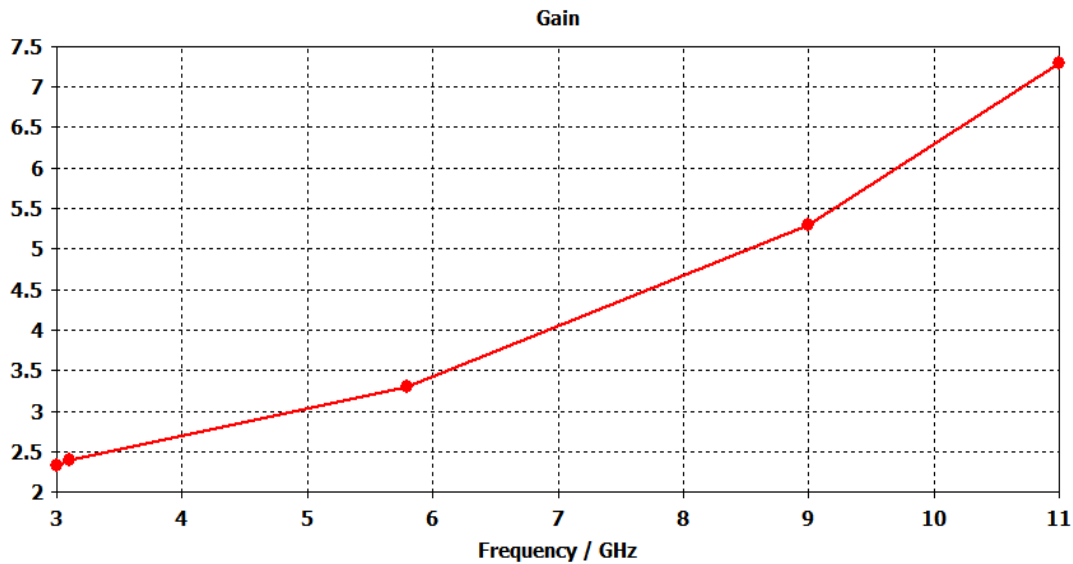


Figure III. 11 : Gain de l'antenne en dB.

### III.5.1.3 Diagramme de rayonnement

Nous étudions dans cette section les caractéristiques de rayonnement de l'antenne ULB proposée. Les diagrammes sont tracés dans les deux principaux plans de l'antenne: le plan E et le plan H.

Les diagrammes de rayonnements polaires en 2D et 3D de l'antenne proposée pour les trois fréquences 3.1, 5.8, 11 GHz sont présentés par les figures III.13, III.14 et III.15 respectivement.

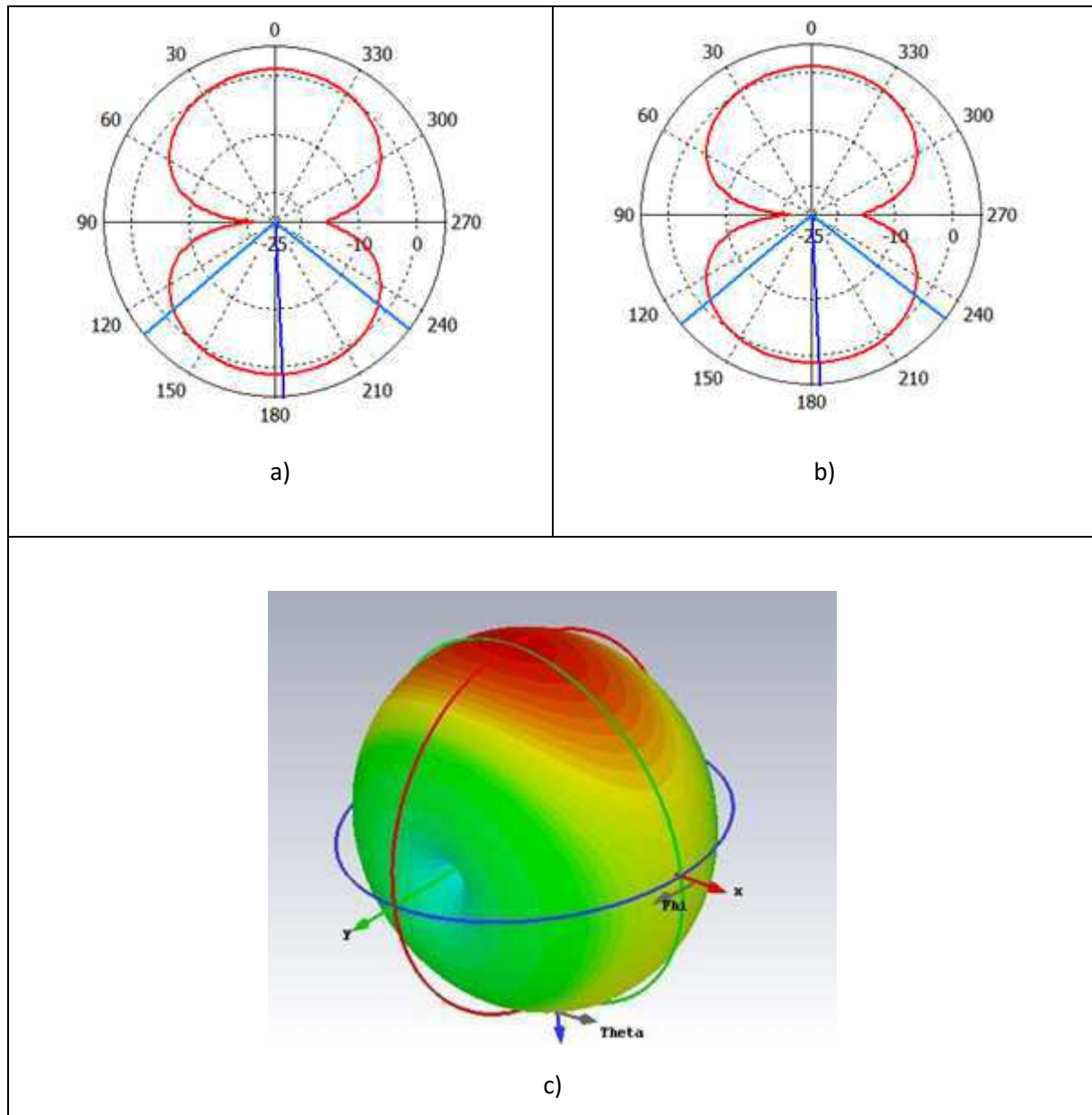


Figure III. 12 : Diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée à la fréquence 3.1 GHz  
a) Plan E, b) Plan H, c) 3D



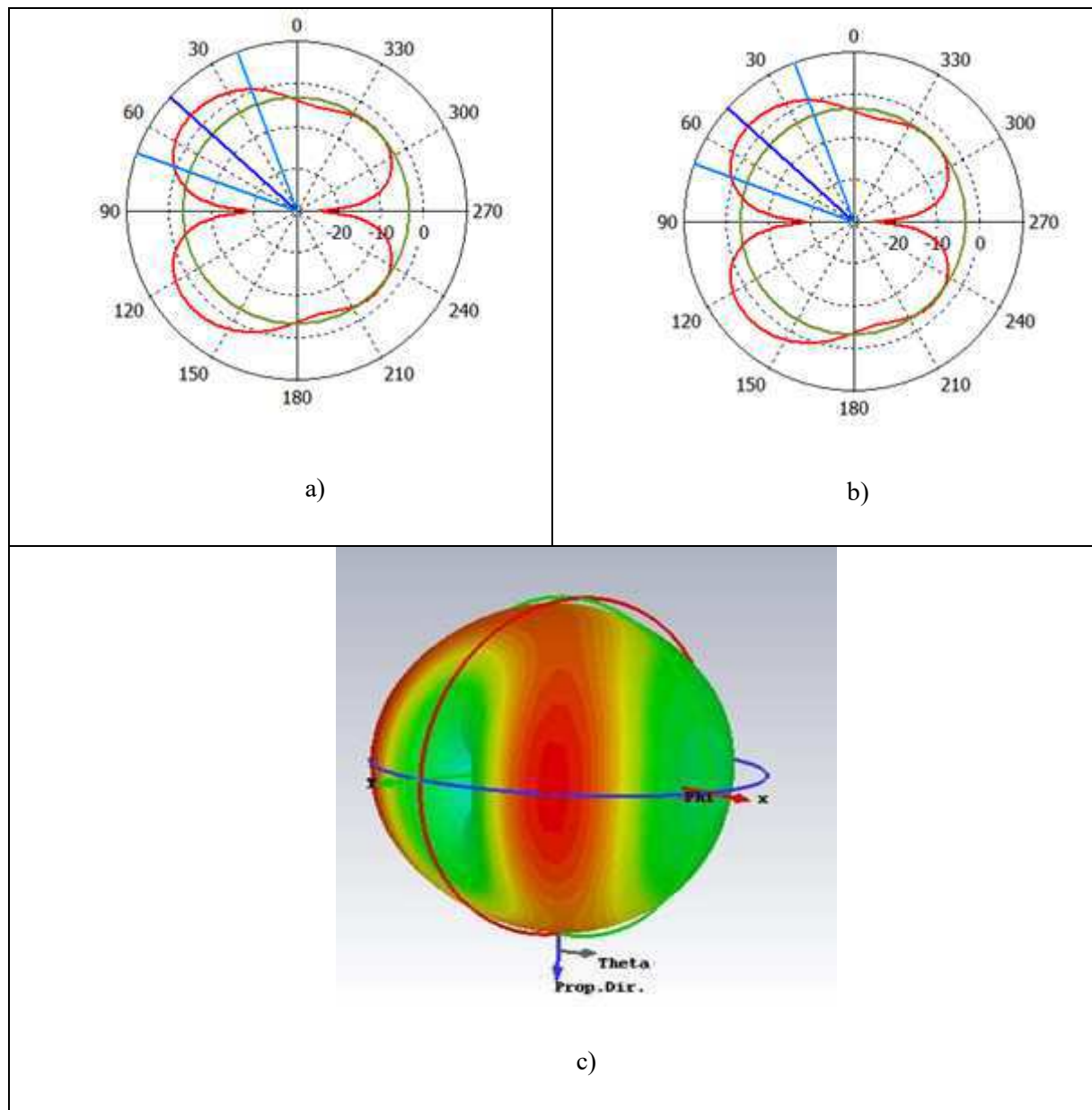


Figure III. 13 : Diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée à la fréquence 5.8 GHz  
a) Plan E, b) Plan H, c) 3D



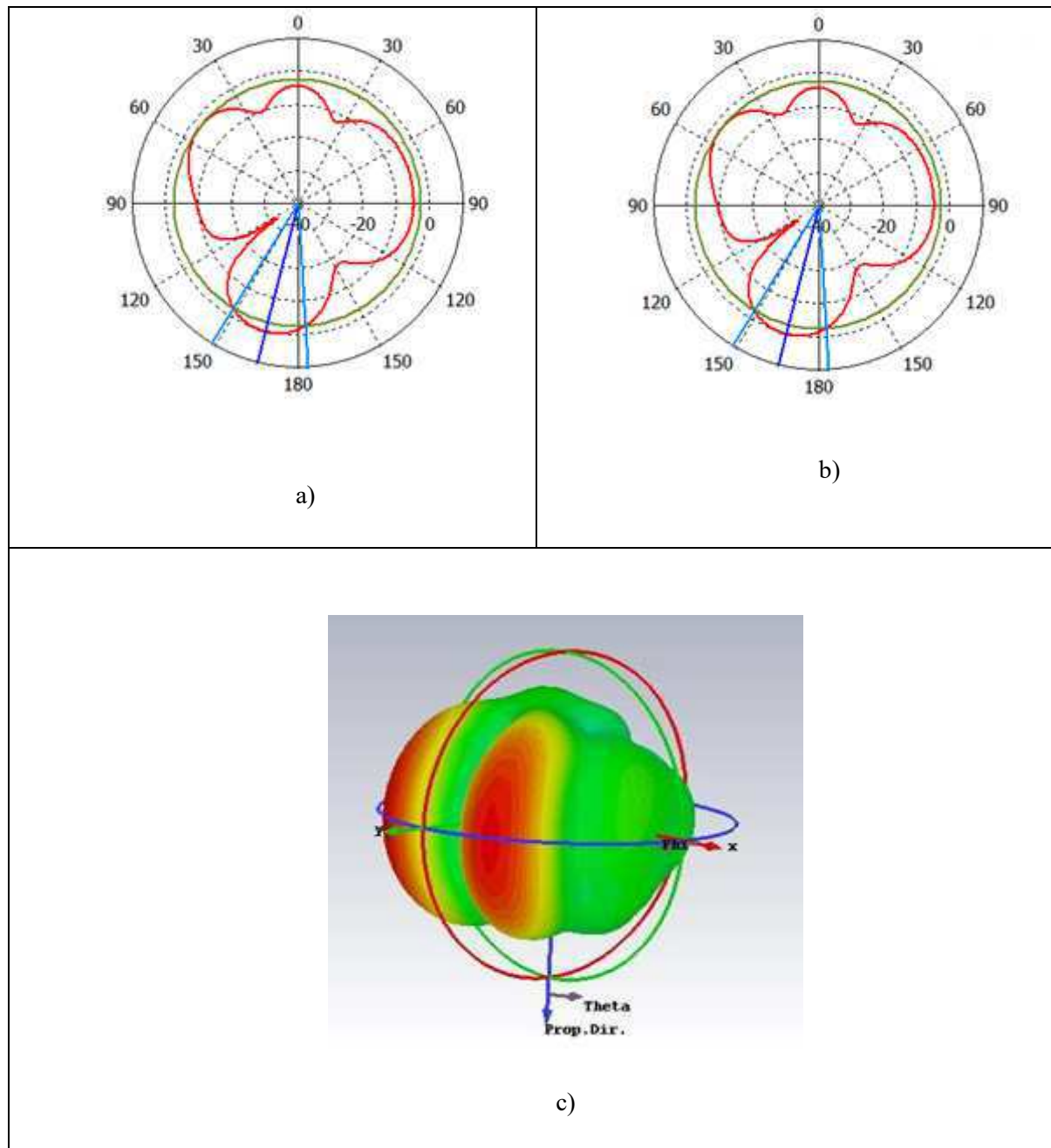


Figure III. 14 : Diagramme de rayonnement de l'antenne ULB proposée à la fréquence 11 GHz  
a) Plan E, b) Plan H, c) 3D

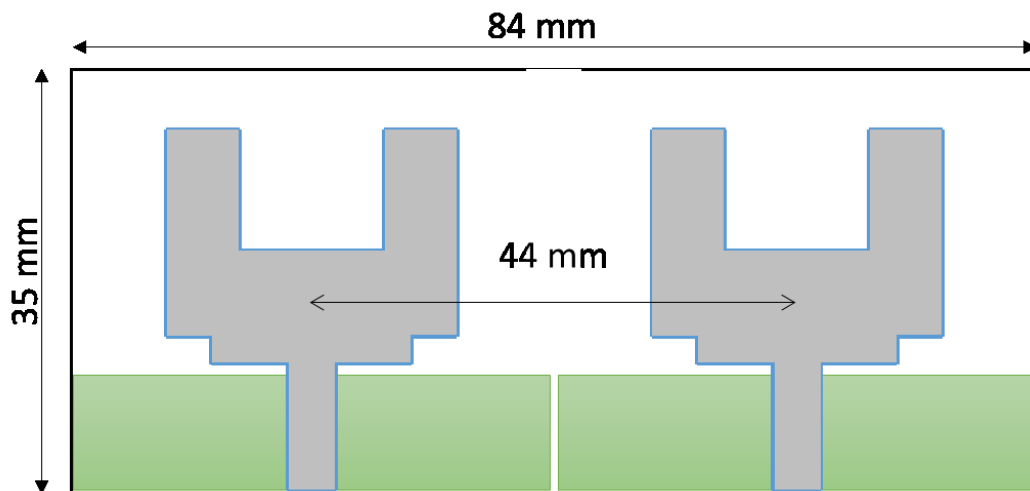
D'après les figures III.13, III.14 et III.15, nous constatons que les diagrammes de rayonnement sont stables pour les trois fréquences 3.1, 5.8 et 11 GHz. Nous remarquons aussi que notre antenne présente un rayonnement omnidirectionnel pour la fréquence 3.1 GHz, et un rayonnement bidirectionnel pour les fréquences 5.8 et 11 GHz.

#### III.5.1.4 Réseau d'antennes MIMO-ULB

Après finalisation de la simulation sur l'antenne seule et la visualisation des résultats, les performances de l'antenne proposée sont satisfaisantes. Comme on l'a déjà mentionné, pour augmenter les performances des systèmes de transmission c'est plus judicieux d'utiliser un réseau d'antennes (MIMO) au lieu d'une antenne seule. Dans ce contexte, nous proposons d'analyser les performances d'un réseau d'antennes, à deux éléments, basé sur l'antenne ULB proposée précédemment.

La structure du réseau d'antenne MIMO est illustrée sur la figure III.16.

Le réseau MIMO proposé est construit en alignant deux antennes avec un espacement périodique de  $0.88\lambda$  calculé à une fréquence de 6 GHz.



**Figure III. Erreur ! Argument de commutateur inconnu. : Géométrie du réseaux MIMO-ULB proposé.**

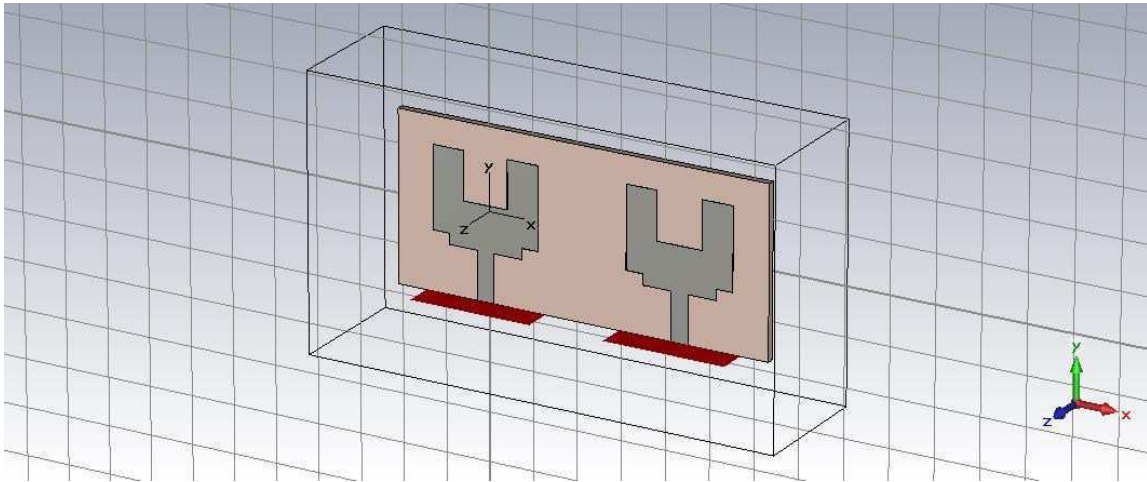


Figure III. Erreur ! Argument de commutateur inconnu. : Géométrie du réseau MIMO-ULB en 3D.

### III.5.1.5 Coefficients de réflexion

La figure III.18 présente les performances de couplage mutuel des paramètres S pour l'antenne MIMO proposée. On observe que les caractéristiques d'adaptation et d'isolation d'impédance à large bande (ULB) sont atteintes entre 3 et 11GHz. Une isolation élevée inférieure à -10 dB est obtenue sans l'utilisation de structures supplémentaires de découplage.

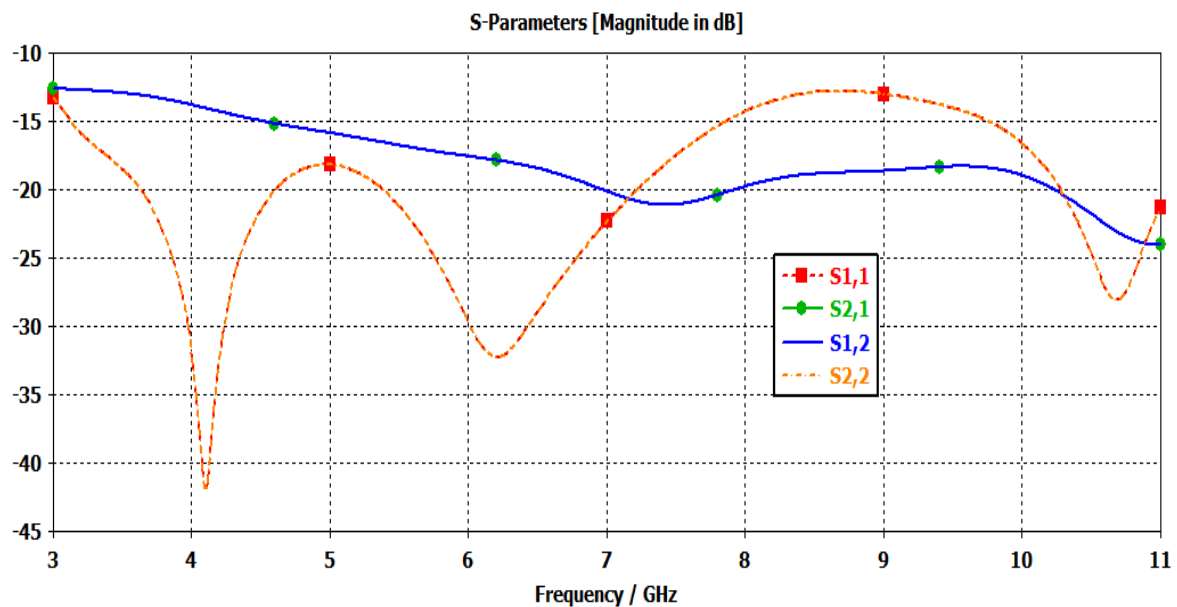
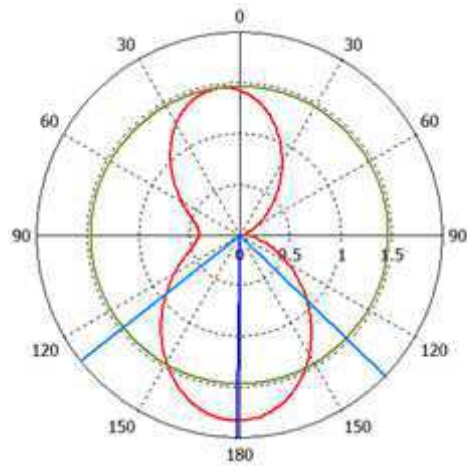


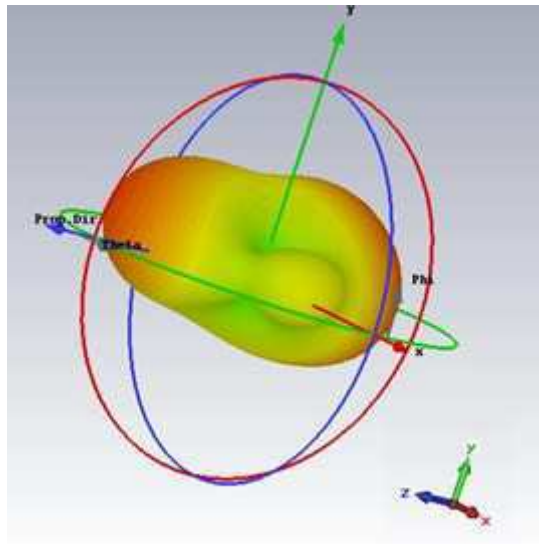
Figure III. 17 : Coefficients de réflexion de l'antennes MIMO-ULB proposée

### III.5.1.6 Diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnements polaires en 2D et 3D de l'antenne MIMO-ULB proposée pour les trois fréquences 3.1, 5.8, 11 GHz sont présentés par les figures III.19, III.21 et III.22 respectivement.

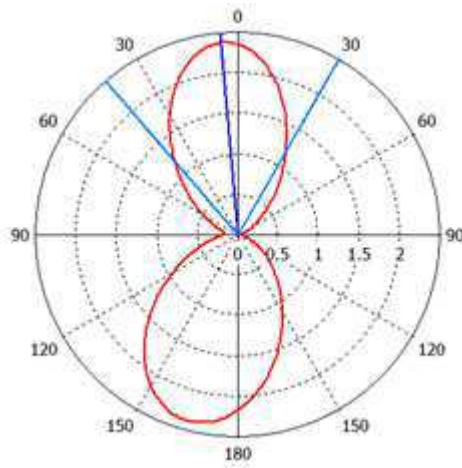


a)

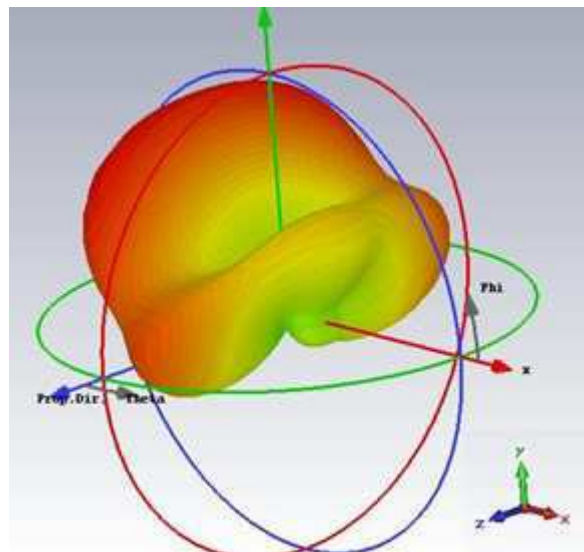


b)

Figure III. 18 : Diagramme du réseau MIMO-ULB proposé à la fréquence 3.1 GHz  
a)2D b) 3D.

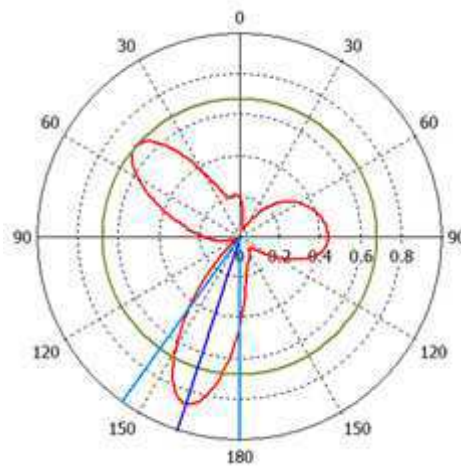


a)

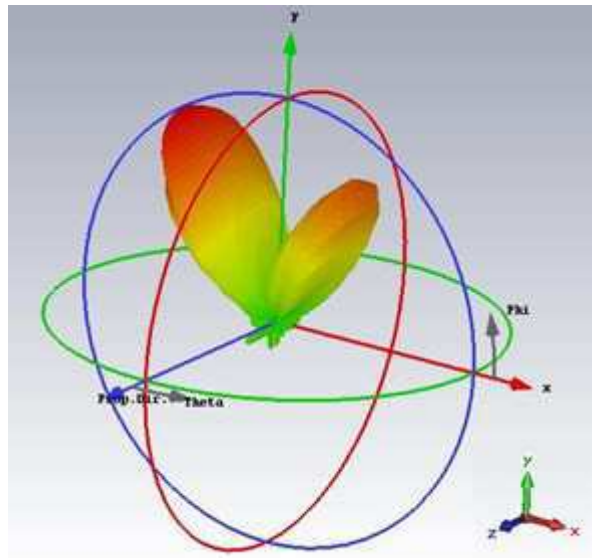


b)

Figure III. 19 : Diagramme du réseau MIMO-ULB proposé à la fréquence 5.8GHz  
a)2D b) 3D.



a)



b)

**Figure III. 20 : Diagramme du réseaux MIMO-ULB proposée à la fréquence 11GHz  
a)2D b) 3D.**

On peut clairement voir sur les diagrammes de rayonnement que pour les trois fréquences simulées l'antenne MIMO-ULB rayonne toujours dans deux directions différence. Ceci illustre les caractéristiques de diversité de l'antenne MIMO.

### III.5.1.7 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est un paramètre très critique dans l'analyse des systèmes d'antennes MIMO car il fournit la mesure de la diversité d'antennes. Ce coefficient doit être minimal pour une capacité de canal élevée et une performance de diversité.

En général, un coefficient de corrélation inférieur à 0.5 est considéré comme bon. Le calcul du coefficient de corrélation est déjà établi dans la section I.2.5.2 par l'équation I.8.

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|}{(1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)(1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2))}$$

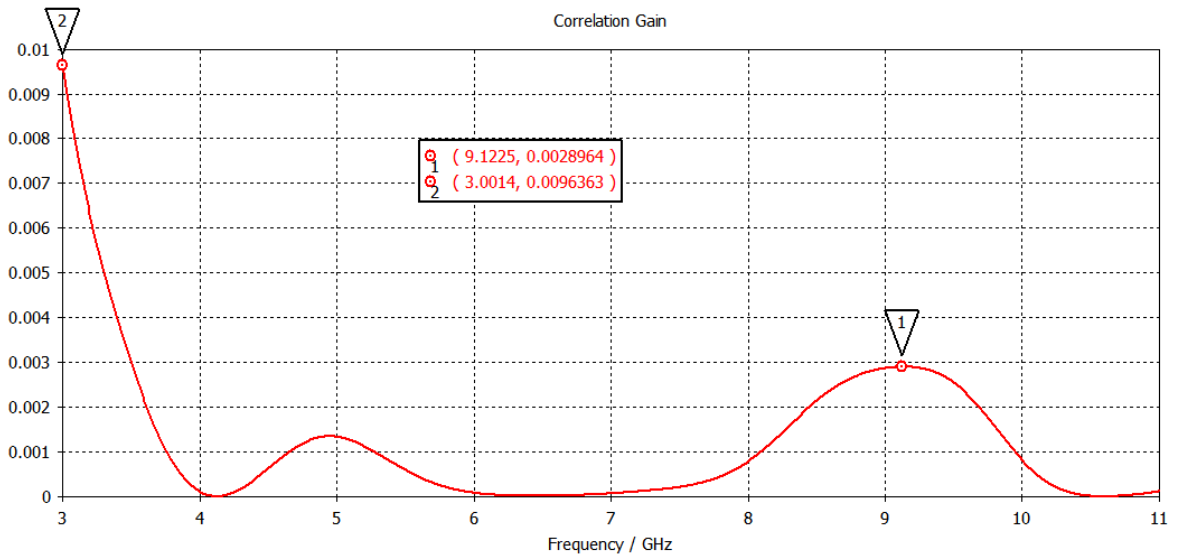


Figure III. 21 : Coefficient de corrélation  $\rho_{21}$ .

La figure III.22 montre que sur toute la bande couverte par l'antenne MIMO [3-11] GHz, le coefficient de corrélation reste inférieur à 0.01. Cela montre que les signaux sur les deux antennes du réseau sont pratiquement décorrélés.

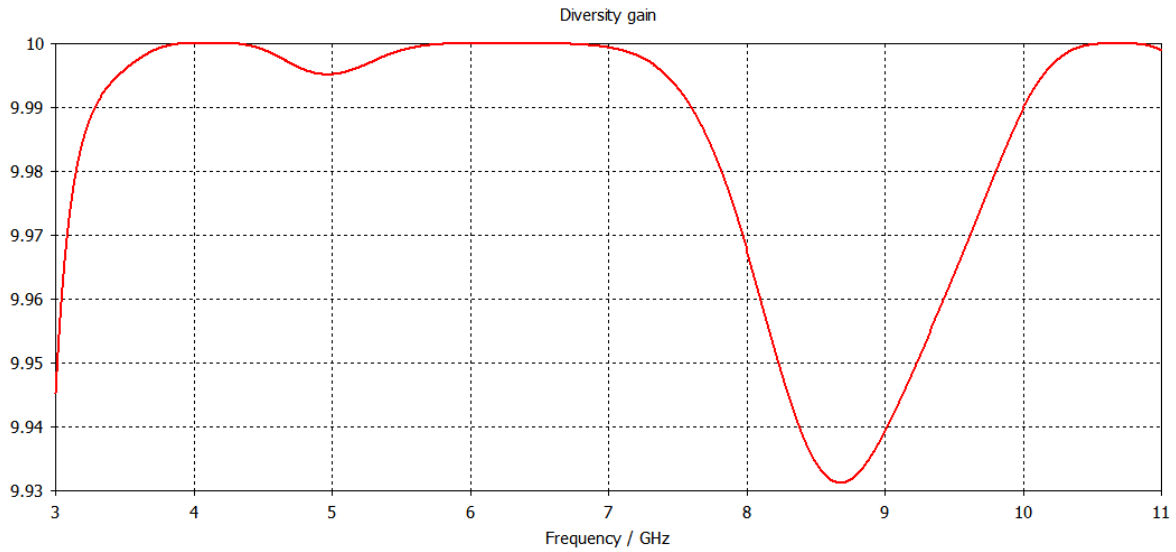
### III.5.1.8 Gain de diversité

Tel qu'il a été défini dans le premier chapitre, le gain de diversité indique l'amélioration du rapport signal sur bruit par combinaison des signaux sur les deux antennes du réseau. Ce paramètre est étroitement lié au coefficient de corrélation par l'équation :

$$GD = 10 \cdot \sqrt{1 - |\rho|} \quad (\text{III. 1})$$

Où  $\rho$  représente la corrélation.

La figure III.23 illustre le tracé du gain de diversité  $GD$ . Nous remarquons que  $GD$



**Figure III. 22 : Gain de diversité.**

Le gain de diversité du système d'antenne MIMO est illustré sur la figure III.23. Le gain de diversité (DG) est supérieur à 9,9 dB sur toutes la bande de fréquence couverte. C'est une valeur acceptable pour les systèmes sans fil.

Le tracé confirme la relation de  $GD$  avec le coefficient de corrélation donné par l'équation (III.1), puisque sur les bandes où  $\rho$  tend vers 0,  $GD$  tend vers 10.

## III.6 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à la conception et l'étude des performances de l'antenne MIMO-ULB proposée. Dans ce contexte, nous avons commencé par concevoir une antenne ULB simple et analysé ces performances pour la bande ULB.

Par la suite nous avons entamé la conception de l'antenne MIMO-ULB à partir de l'antenne ULB conçue dans la première partie. Les performances de l'antenne MIMO-ULB ont été analysées et les résultats obtenus sont satisfaisants pour des applications en communications sans fil.



# Conclusion Générale

Ces dernières années, les travaux de recherche académique et industrielle sur les systèmes MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) ont connu un essor considérable. Cette technologie de radiocommunication est perçue comme étant l'avenir des communications sans fil à très haut débit pour les applications grand-public public.

Cette technique est déjà employée dans certains standards comme WLAN et mise en œuvre dans le standard de communication LTE. Ceci est dû à la capacité des systèmes de diversité et MIMO à augmenter significativement le débit transmis sans pour autant augmenter la puissance émise ou la largeur de bande spectrale utilisée.

Dans ce contexte le travail abordé dans ce manuscrit portait sur la conception, l'optimisation et l'évaluation d'un système multi-antennaires pour des techniques de diversité MIMO ayant diverse application pour les objets communicants.

Le travail de ce mémoire nous a permis d'une part, d'appliquer les connaissances acquises sur le logiciel CST et d'autre part, ils nous ont aussi permis d'approfondir nos connaissances sur les antennes micro-rubans et les systèmes multi antennaires.

Ainsi, nous avons divisé notre travail sur trois parties. La première partie été la présentation des systèmes MIMO et les techniques associées.

Dans la deuxième partie nous avons exposé les généralités sur les antennes imprimées et la technologie Ultra Large Bande.

Dans la troisième et dernière partie du travail, nous avons abordé la conception et l'optimisation d'une antenne imprimée ULB avec des performances très satisfaisantes. Par la suite nous avons traité la conception d'une antenne MIMO-ULB proposée à partir de l'antenne imprimée réalisée précédemment.

Les résultats obtenus sont prometteurs, mais les dimensions de l'antenne MIMO-ULB, restent encore grandes pour des applications sur des objets connectés de petites dimensions.

La perspective de ce travail sera de réduire au maximum les dimensions de l'antenne MIMO-ULB par la réduction de la séparation entre les éléments de l'antenne. Des méthodes d'isolation doivent être mises en place pour réduire le couplage entre les antennes.

### **Références :**

- [1] <http://radio.pagesperso-orange.fr/Ant.htm> mai 2018.
- [2] SUPPORT DE COURS, Alexandre Boyer, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE.
- [3] <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php#introduction> mai 2018.
- [4] Lila MOUFFOK, THÈSE DE DOCTORAT « Conception de systèmes multi-antennes multi-bandes pour terminaux mobiles LTE », Télécom ParisTech, 2013.
- [5] Olivier BERDER, THÈSE DE DOCTORAT, « Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes », l'Université de Bretagne Occidentale
- [6] Ilham OUACHANI, THÈSE DE DOCTORAT, « ANALYSE DE PERFORMANCE DE SYSTÈMES DE COMMUNICATIONS SANS-FILS EXPLOITANT MICRO- ET MACRO-DIVERSITÉ » UNIVERSITÉ DE PARIS-SUD, U. F. R. SCIENTIFIQUE D'ORSAY ,2005.
- [7] Aliou DIALLO, THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS UFR SCIENCES, 2007.
- [8] « Multiantenna Systems for MIMO Communications ». Franco De Flaviis University of California, Irvine Lluís Jofre Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Romeu Universitat Politècnica de Catalunya, Alfred Grau University of California, Irvine.
- [9] S. Blanch, J. Romeu, et I. Corbella, « Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description », Electronics Letters, vol. 39, no. 9, p. 705 - 707, 2003.
- [10] M. Schwartz, W. R. Bennett, et S. Stein, Communication Systems Techniques. John Wiley & Sons Inc, 1995.

- [11] T. Taga, « Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radioenvironments », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, no. 2, p. 117-131, 1990.
- [12] A. Diallo, « Sytemes multi-antennes pour diversite et mimo », thèse, Université de Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [13] H. Bolcskei, D. Gesbert, et A. J. Paulraj, « On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems », *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 2, p. 225-234, 2002.
- [14] P. F. R. Piechocki, « Performance of space-time coding with HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a WLAN standards on real channels », p. 848 -852 vol.2, 2001.
- [15] <https://www.memoireonline.com/11/12/6502/Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip.html>
- [16] Touati Mohamed Houssein Eddine, Mémoire de Fin d'Etudes-Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [17] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne\\_patch#/media/File:Antenne\\_patch.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_patch#/media/File:Antenne_patch.jpg)
- [18] Mme Anna NIANG-UNIVERSITE, THESE DE DOCTORAT « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non Foster » PARIS-SACLAY.
- [19] VAUDON Patrick – Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques ICOM –Université de Limoges
- [20] Soltane Samia, Mémoire de Fin d'Etudes « ETUDE ET CARACTERISATION D'ANTENNES IMPRIMEES POUR SYSTEME ULTRA-LARGE BANDE » Université Mohamed Khider Biskra, 2015.
- [21] Abdelmounaim « Mémoire de Fin d'Etudes-Conception d'antennes ultra large bande (ULB) pour imagerie micro-onde » université de Tlemcen, 2013.

[22] THESE du Docteur (Nicolas FORTINO )- Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour systèmes Ultra Large Bande impulsionnels- UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS UFR SCIENCES.

[23] [https://www.techniques-ingenieur.fr/ressources-documentaires/demande-d-informations/extract/confirmation.html?ctype=Treaty&pageId=42280210&lead\\_id=572036&key=05c0e628d9e108000dfb053bb688a7a2](https://www.techniques-ingenieur.fr/ressources-documentaires/demande-d-informations/extract/confirmation.html?ctype=Treaty&pageId=42280210&lead_id=572036&key=05c0e628d9e108000dfb053bb688a7a2) avril 2018.