الجـــــــــــــــــــــمهـوريـــــة الجـــــــــــــزائريـة الديمـــــــقراطيـة الشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــــعليـم العـــــــالي والبـــــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد– تـلمســـــــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

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

En : Systèmes et Télécommunication

Spécialité : Système de Télécommunications

Par : **Ziani Hichem**

Habchi Chaimaa

Sujet

Reconstruction des images d'objets en utilisant un radar MIMO micro-onde

Soutenu publiquement, le, devant le jury composé de :

Mr DERRAZ Fouad	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mr KAMECHE Samir	Professeur	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr CHOUITI Sidi Mohammed	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant
Mr MERIAH Sidi Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicaces

A l'issue de ce mémoire, je souhaite tout d'abord remercier ALLAH, qui nous a donné la force et le courage afin de réunir nos études et nos vies professionnelles.

Nous dédions ce mémoire

À nos chers parents, avec toute notre gratitude pour votre soutien indéfectible tout au long de ce parcours d'études et vos encouragements constants qui m'ont porté.

À nos familles paternelle et maternelle, nous vous dédions ce mémoire avec reconnaissance pour votre soutien inconditionnel et votre croyance en nos capacités qui ont été une source inestimable de motivation.

À tous ceux qui nous sont chers.

Habchi Chaimaa

Ziani Hichem

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la volonté, la patience et la force nécessaires pour avancer et surmonter tous les obstacles afin d'achever ce mémoire

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance à ***Monsieur CHOUITI Sidi Mohammed****, Maître de conférences classe A à l'Université Abou Bekr Belkaïd - Tlemcen, pour avoir accepté de diriger ce mémoire. Nous le remercions sincèrement pour sa disponibilité, sa bienveillance, son soutien constant, ses encouragements précieux ainsi que ses conseils avisés tout au long de ce travail.*

Nous exprimons nos sincères remerciements à ***Monsieur MERIAH Sidi Mohammed****, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd - Tlemcen et directeur du laboratoire LTT, pour son précieux encadrement en tant que co-directeur de cette thèse.*

Nos vifs remerciements s'adressent à ***Monsieur DERRAZ Fouad****, Professeur de l'université de Tlemcen de nous avoir honoré par l'acceptation de présider le jury de notre thèse.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ***Monsieur KAMECHE Samir*** *Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd - Tlemcen, pour avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examinateur et pour apporter sa précieuse expertise à l'évaluation de ce travail.*

Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude envers la ***Docteur ZIANI Djamila,*** *qui a grandement contribué à la réalisation de ce travail dans les meilleures conditions*

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants et au personnel du département des télécommunications de la Faculté de Technologie de Tlemcen, qui ont veillé à la qualité de notre formation.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réussite de ce modeste travail.

Un grand MERCI

Résumé

L'imagerie par radar micro-onde constitue une technologie suscitant un intérêt croissant pour les applications de vision à travers les obstacles. En s'appuyant sur la technologie radar MIMO (Multiple Input Multiple Output), ce système offre une reconstruction des images d'objets en se basant sur les propriétés diélectriques des objets. Grâce à ses multiples antennes, le radar MIMO améliore significativement la précision et la résolution spatiale des images reconstruites. Associé à des algorithmes de reconstruction BP(Back-Projection), il optimise le traitement des signaux pour localiser et identifier avec précision des cibles cachées. Dans ce contexte, l'utilisation de radars ULB (Ultra Large Bande) s'avère particulièrement efficace pour améliorer la résolution et la précision des images, car ces systèmes offrent une bande passante large, permettant une meilleure pénétration des matériaux et une plus grande sensibilité dans la détection des objets.

Mots clés : radar MIMO, Reconstruction d'image des objets, Algorithme Back-Projection.

Abstract

Microwave radar imaging is a technology that is attracting increasing interest for vision applications through obstacles. Based on MIMO (Multiple Input Multiple Output) radar technology, this system offers a reconstruction of object images based on the dielectric properties of the objects. Thanks to its multiple antennas, MIMO radar significantly improves the precision and spatial resolution of reconstructed images. Combined with BP (Back-Projection) reconstruction algorithms, it optimizes signal processing to accurately locate and identify hidden targets. In this context, the use of UWB (Ultra Wide Band) radars is particularly effective in improving image resolution and precision, as these systems offer a wide bandwidth, allowing better material penetration and greater sensitivity in object detection.

Keywords: MIMO radar, object reconstruction, Back-Projection algorithm; ULB radar and Microwave images

ملخص

يعد التصوير الرادار بالموجات الدقيقة تقنية تولد اهتمامًا متزايدًا بتطبيقات الرؤية من خلال العوائق. استنادًا إلى تقنية الرادار MIMO (مدخلات متعددة ومخرجات متعددة)، يوفر هذا النظام إعادة بناء صور الكائنات بناءً على خصائص العزل الكهربائي للأشياء. بفضل هوائياته المتعددة، يعمل رادار MIMO على تحسين الدقة والدقة المكانية للصور المعاد بناؤها بشكل كبير. يرتبط بخوارزميات إعادة البناء BP (الإسقاط الخلفي)، فهو يعمل على تحسين معالجة الإشارات لتحديد موقع الأهداف المخفية وتحديدها بدقة. وفي هذا السياق، يعد استخدام رادارات UWB (النطاق العريض للغاية) فعالاً بشكل خاص في تحسين دقة الصور ودقتها، لأن هذه الأنظمة توفر نطاقًا ترددياً واسعًا، مما يسمح باختراق أفضل للمواد وحساسية أكبر في اكتشاف الأشياء.

الكلمات المفتاحية: **الرادارMIMO إعادة بناء الأجسام، خوارزميةBP؛ الرادار ULB والصور الميكروية**

Table des Matières

Dédicaces i

Remerciements 2

Résumé iii

Abstract iv

ملخص v

Liste des figures ix

Introduction générale 1

CHAPITREI :RADAR Micro-onde 3

I.1 Introduction 4

I.2 Historique 4

I.3 Définition du RADAR 4

I.3 Principe du système radar 5

I.4 Résolution d'un système radar 6

I.4.1 Résolution azimutale 6

I.4.2 La résolution à distance 6

I.5 Concept général de l'ultra large bande (ULB) 7

I.5.1Caractéristiques des signaux ULB 8

I.5.2Les principaux traits d'ULB 9

I.5.3. Règlementation du FCC 9

I.5.4 Règlementation de l'ECC 10

I.5.5Avantages du radar ULB 11

I.6 Configurations de radar ULB selon les données 12

1.6.1 Le radar à onde continue (CW radar) 12

1.6.2 Le radar à onde continue modulée en fréquence (FMCW radar) 12

1.6.3 Le radar à ondes entretenues interrompues avec modulation de fréquence (FMiCW radar) 13
1.6.4 Technologie SFCW....13
1.6.5 Technologie à bruit 14
1.66Technologie impulsionnelle....14
I.7 Configurations de radar ULB selon la distribution spatiale 15
I.7.1 Radar mono statistique 15
I.7.2 Radar bi statistique 16
I.7.3. Imagerie SAR dans le contexte MIMO 16
I.7.4 Radar multistatistique....16
I.8 Types d'informations mesurées 17
I.9 Imagerie micro-ondes....18
I.10. Applications du radar micro-onde 20
I.10.4 Vision à travers le mur 21
I.10.4.1 État de l'art des systèmes radars de vision à travers les murs....21
I.11 Conclusion....25
CHAPITRE II : Antenne Vivaldi ULB....27
II.1Introduction....28
II.2 Généralités sur les antennes imprimées 28
II.2.1 Définition des antennes imprimées 29
II.2.2 Avantages et inconvénients....30
II.2.3 Caractéristiques des antennes....30
II.2.3.1 Impédance d'entrée 30
II.2.3.4 Le Gain....33
II.2.3.5 Directivité....33
II.2.3.7 Polarisation d'antenne....36

II.3 Outil de simulation 37
II.4 Conception de l'antenne Vivaldi ULB 37
II.4.1 Résultats de simulations 38
II.4.2 Resultats de mesure 41
II.5 Conclusion 42
CHAPITRE III : Résultats des simulations 43
III.1 introduction 44
III.2 Configurations des réseaux MIMO 44
III.2.1 Réseau MISO 4x1 45
III.2.2 Réseau MIMO 4x2 46
III.2.3 Réseau MIMO 4x3 47
III.3 Algorithme d'imagerie 48
III.4 Implémentation de l'algorithme d'imagerie 49
III.5 Résultats d'imagerie 50
III.6 Conclusion 52
Conclusion et perspectives 53
References ..... **Error! Bookmark not defined.**

Liste des figures

Chapitre I

I.1 : PRINCIPE DU RADAR[3].....5

I.2: ANALYSE DES SPECTRES DE DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE RADIODIFFUSION.....7

I.3 : EXEMPLES DE FORMES D'ONDES ULB. (A) SIGNAL IMPULSIONNELS (B)FMCW.....8

I.4: PROBLÉMATIQUE DE LA RÉSOLUTION EN DISTANCE : SIGNAUX RÉFLÉCHIS PAR LES CIBLES.....11

I.5: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU RADAR FMCW.....12

I.6 : RADAR FMICW RADAR UTILISANT UN COMMUTATEUR À DIODE PIN POUR METTRE HORS-CIRCUIT L'ALIMENTATION DU TRANSMETTEUR.....13

I.8: RADAR À BRUIT.....14

I.7: Evolution De La Fréquence En Fonction Du Temps.....14

I.9: SIGNAL ÉMIS PAR UN RADAR ULB......15

I.10 CONFIGURATION DU RADAR MONO STATIQUE.....15

I.11: CONFIGURATION DU RADAR BI STATIQUE.....16

I.12 CONFIGURATION DU RADAR MIMO.....17

I.13. CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE EN IMAGERIE MICRO-ONDE BIDIMENSIONNELLE (2D).....19

I.14 : SYSTÈME ACTIF D'IMAGERIE MICRO-ONDES.....20

I.15: DÉTECTION DE PERSONNES DERRIÈRE UN MUR.....21

I.16 FH-UWB RADAR (GAUCHE) ET SA CARTE RADIO FRÉQUENCE.....21

I.17 : RADARVISION2 (A) ; L'ÉCRAN DE VISUALISATION DU SYSTÈME RADARVISION (B) ; RÉSEAUX D'ANTENNES (C).....22

I.18 : SCOPE RADAR.....23

I.19 : SYSTÈMES D'IMAGERIE 3D À TRAVERS LES MURS, (A)XAVER 400 ,(B)XAVER 800.....24

Chapitre II

II.1: Forme de base de l'antenne imprimée.....29

II.2 : Bande passante et coefficient de réflexion.....33

II.3 : Le diagramme de rayonnement représenté en deux dimensions.....34

II.4 : Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope.....35

II.5 : Diagramme de rayonnement Omnidirectionnel.....35

II.6 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.....36

II.7 : Polarisation (a) linéaire, (b) circulaire, (c) elliptique.....37

II.8 ;Géométrie de l'antenne utilisée……..38
II.9 :Coefficient de réflexion de l'antenne utilisée en fonction des fréquences……39
II.10 :Impédance d'entrée de l'antenne utilisée en fonction des fréquences……39
II.11 :Diagramme de rayonnement de l'antenne à différentes fréquences……40
II.12 : Gain de l'antenne utilisé en fonction des fréquences……40
II.13 : Efficacité de l'antenne utilisé en fonction des fréquences……41
II.14 : Prototype de l'antenne utilisé……41
II.15 : Coefficient de réflexion de l'antenne réalisée……42

Chapitre III

III.1: Configuration 4x1……46
III.2 : Configuration 4x2……47
III.3 : Configuration 4x3……48
III.4 : Signaux Reçus d'une paire Tx/Rx avec et sans la cible……49
III.5 : Réseau avec la cible……50
III.6 : Image reconstruite par le réseau 4x1……50
III.7 : Image reconstruite par le réseau 4x2……51
III.8 : Image reconstruite par le réseau 4x3……51

Liste des tableaux

Chapitre I

I.1 : PIRE POUR LES SYSTÈMES RADAR ULB DE VISION À TRAVERS LES MURS.....10

I.2 : Restrictions sur le maximum de la moyenne de la densité spectrale de PIRE……..10

I.3 : Restrictions sur la valeur crête maximale de PIRE mesurée dans une certaine bande de fréquences……11

I.4 Comparaison des systèmes radars commerciaux de vision à travers les murs……..25

Chapitre II

II.1Dimensions de l'antenne Vivaldi ULB……..38

Introduction générale

La vision à travers des matériaux opaques ou des obstacles est un enjeu crucial dans de nombreux domaines tels que la sécurité, la médecine, l'industrie et l'exploration. Parmi les technologies capables de répondre à ce besoin, l'imagerie par radar micro-onde se distingue par sa capacité à pénétrer divers milieux comme les vêtements, les murs ou encore les tissus biologiques. Contrairement aux systèmes optiques traditionnels, qui sont limités par l'opacité des matériaux, le radar micro-onde permet de "voir" à travers ces barrières en exploitant des ondes électromagnétiques de faible fréquence. Cette technologie présente de nombreux avantages : elle est non ionisante, ce qui la rend inoffensive pour la santé humaine, et elle permet une détection précise d'objets cachés ou dissimulés.

L'intérêt pour les radars micro-ondes dans les systèmes de vision et d'imagerie n'a cessé de croître, en raison des contrastes que les fréquences micro-ondes révèlent entre les différentes propriétés matérielles. Ces contrastes permettent d'identifier et de caractériser avec précision des objets dans des milieux hétérogènes. Dans ce contexte, la conception de systèmes d'imagerie micro-ondes efficaces repose sur deux aspects fondamentaux : la qualité de la conception matérielle, notamment des antennes et les configurations et réseaux antennaires, et la mise en œuvre d'algorithmes de traitement de signal adaptés pour la reconstruction d'images précises. Les récents progrès technologiques dans ces deux domaines ont permis des avancées significatives, offrant ainsi des systèmes de plus en plus performants.

Dans ce mémoire, nous étudierons la détection des objets en utilisant des radars micro-ondes, et nous proposerons un réseau MIMO ULB pour améliorer la précision, la résolution et l'efficacité de ces systèmes. Notre travail est structuré en trois chapitres principaux qui abordent les différents aspects de cette problématique.

Le premier chapitre présente les principes fondamentaux du radar micro-onde et explore son fonctionnement dans le cadre de la vision à travers des matériaux opaques. Nous examinerons les différentes configurations radar, ainsi que leurs applications. Une attention particulière sera accordée à l'architecture MIMO (Multiple Input Multiple Output), qui représente une avancée

majeure pour améliorer la résolution spatiale tout en réduisant le nombre d'antennes nécessaires. Nous discuterons également des avantages et des défis liés à l'utilisation de la bande de fréquences micro-ondes Ultra Large Bande (ULB) pour pénétrer différents types de matériaux et obtenir des images précises. Finalement les algorithmes d'imagerie les courants seront ainsi présentés.

Dans le second chapitre, nous nous concentrerons sur l'un des éléments clés d'un système radar : l'antenne. Plus particulièrement, nous analyserons les antennes imprimées, qui sont devenues populaires en raison de leur faible encombrement, de leur coût réduit et de leur facilité de fabrication. Nous présenterons les caractéristiques essentielles des antennes ULB (Ultra Large Bande). Les critères de conception pour garantir une bonne performance, une bande passante adéquate et une compatibilité avec les systèmes radar micro-ondes seront également détaillés. Ce chapitre abordera aussi la conception de l'antenne élément Vivaldi qui sera par la suite utilisée pour former le réseau d'antenne du système Radar.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats obtenus lors de la simulation et de la modélisation des systèmes d'imagerie radar micro-ondes. Nous discuterons des différentes configurations testées à savoir un réseau 4x1, 4x2 et 4x3, avec 4 antennes émettrices et 1, ou 2, ou 3 réceptrices respectivement. Enfin, nous évaluerons l'impact de chaque combinaison des technologies MIMO (Multiple Input Multiple Output) et ULB sur la qualité des images obtenues.

CHAPITRE I : RADAR Micro-onde

I.1 Introduction

L'imagerie RADAR permet de générer des images aussi bien de jour que de nuit. Initialement et pendant de nombreuses années, ce système était exclusivement utilisé pour des applications militaires. Cependant, grâce aux avancées spectaculaires dans le traitement numérique du signal, il est désormais indispensable tant dans le domaine civil que militaire.

Le radar micro-onde qui tire son nom de sa bande de fonctionnement fonctionnant utilisant l'imagerie dans la gamme des fréquences des micro-ondes. Plus spécifiquement, le radar micro-onde ULB (Ultra Large Bande) offre de nombreux avantages par rapport à ses homologues bénéficiant de caractéristiques exceptionnelles de cette technologie à savoir la large bande passante, la faible puissance d'émission pour assurer la sécurité de transmission ainsi que la haute résolution grâce aux hautes fréquences et à la bonne pénétration dans les matériaux optiquement opaques grâce aux basses fréquences.

En outre, le système Radar à configurations multistatiques semble être les plus adéquats afin de garantir une meilleure résolution pour répondre aux exigences des applications nécessitant de discerner les différentes cibles existantes dans la scène à analyser.

Ce chapitre donne une vue globale sur les principes du radar, l'imagerie micro-onde, la technologie ULB. La configuration multistatique sera également expliquée.

I.2 Historique

Le radar, acronyme de "Radio Detection and Ranging", a été développé à partir des découvertes d'Heinrich Hertz sur les ondes électromagnétiques en 1888. Christian Hülsmeyer a inventé un précurseur du radar en 1904. Cependant, c'est dans les années 1920 et 1930 que des avancées significatives ont été réalisées, notamment par Robert Watson-Watt. Le radar a joué un rôle crucial pendant la Seconde Guerre mondiale, aidant les Alliés à détecter les avions ennemis. Après la guerre, ses applications se sont étendues à des domaines civils comme la météorologie et le contrôle du trafic aérien [1].

I.3 Définition du RADAR

Le radar est un système de détection qui utilise des ondes radio pour identifier et localiser des objets à distance. Il fonctionne en émettant des ondes radio qui se réfléchissent sur des objets, puis en analysant les ondes réfléchies pour déterminer la distance, la vitesse, la direction et parfois la forme de l'objet détecté. Les radars sont utilisés dans des domaines variés comme

la navigation aérienne et maritime, la météorologie, la surveillance militaire et la sécurité routière.

I.3 Principe du système radar

Le radar repose sur l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques suivant les étapes suivantes (voir figure I.1) :

- Un émetteur envoie une onde radio (ou impulsion) à une fréquence précise. Ces ondes sont projetées dans l'espace par une antenne.
- Lorsque ces ondes rencontrent un objet, elles sont partiellement réfléchies vers l'antenne du radar.
- L'antenne du radar capte l'onde réfléchie (ou écho). Le temps écoulé entre l'émission et la réception de l'onde permet de calculer la **distance** de l'objet, car la vitesse de propagation des ondes radio est connue (vitesse de la lumière, environ 300 000 km/s).

Le radar analyse l'écho reçu pour déterminer diverses informations sur l'objet :

- **Distance (portée)** : Le temps de retour des ondes donne la distance.
- **Vitesse** : Utilisation de l'effet Doppler, qui mesure le décalage de fréquence des ondes réfléchies par un objet en mouvement. Si l'objet se rapproche ou s'éloigne, la fréquence change légèrement.
- **Direction** : La direction de l'onde reçue, mesurée par la position de l'antenne au moment de la réception, donne l'angle de l'objet par rapport au radar.
- **Taille et forme** : L'intensité et la dispersion de l'écho peuvent donner des informations sur la taille et la forme de l'objet.

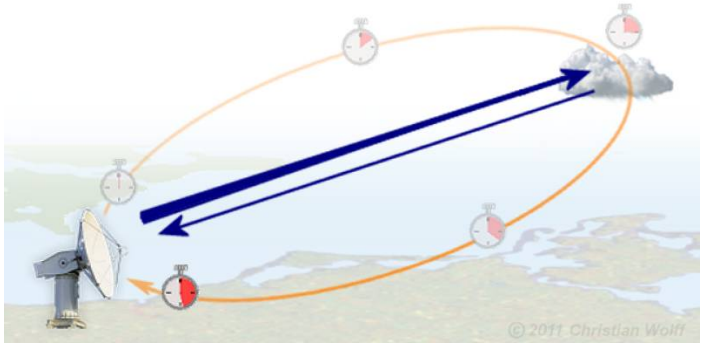


Figure I.1 : Principe du radar [3].

I.4 Résolution d'un système radar

Comme étant un système imageur, la résolution est surement le critère le plus pertinent afin de qualifier un tel système. Ce paramètre présente l'aptitude du système radar à identifier et discriminer les cibles dans la scène à analyser. Il y a deux types de résolution à savoir l'azimutale (angulaire) et la résolution à distance.

I.4.1 Résolution azimutale

Cette résolution, appelée aussi angulaire qui dépend principalement à l'ouverture du système ou autrement dit la taille de l'antenne (ou réseau antennaire) utilisé, consiste à fournir une vue de la scène de différents angles. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$\delta_A = \frac{d.\lambda_c}{l} \qquad \textbf{(I-1)}$$

Où d est la distance entre le radar et la cible, $\lambda_c$est la longueur d'onde à la fréquence de fonctionnement et l est l'ouverture du système radar.

Elle peut être améliorée par une grande surface équivalente de l'antenne utilisée ou l'utilisation d'une configuration SAR (Synthetic Aperture Radar). Cette dernière configuration consiste à déplacer l'antenne le long de la scène afin de la couvrir totalement et créer une ouverture synthétique équivalente.

Une autre configuration qui semble une solution plus prometteuse est configuration la multistatique, reposant sur des multiples émetteurs et récepteurs dans un système radar.

I.4.2 La résolution à distance

Lorsque deux cibles sont alignées à la même direction posera un défi à les discerner et non les considérer comme une, c'est là où s'intervient la capacité du système radar à une bonne résolution en distance qui est liée à la durée du signal émis et sa bande passante. Elle est définie à travers l'équation suivante :

$$\delta_d = \frac{c}{2.B_p} \text{Ou} \delta_d = \frac{c.\tau}{2} \qquad \textbf{(I-2)}$$

Où B_p est la bande passante et τ est la durée du signal. Une large bande passante mène alors à une bonne résolution réduisant la distance minimale entre deux cibles. La technologie ULB constitue la solution adéquate pour atteindre un meilleur résultat.

Afin de garantir des bonnes résolutions, un moindre cout et encombrement le système considéré dans le présent travail sera un système radar MIMO ultra large pour imagerie micro-

onde. Dans ce qui suit nous détaillons la technologie ULB ainsi que les configurations multistatiques et l'imagerie micro-onde et les différents algorithmes d'imagerie.

I.5 Concept général de l'ultra large bande (ULB)

L'ULB (Ultra-large Bande, ou UWB pour Ultra WideBand) est un acronyme générique qui désigne une méthode d'accès radio. Au fil des années, elle a été appelée de différentes manières dans la littérature. On peut mentionner les expressions suivantes : radio impulsionnels, radio sans porteuse, etc. [1]. La largeur de bande relative est déterminée en fonction de :

$$B_{f;3dB} = 2.\frac{F_H - F_L}{F_H + F_L} \quad \textbf{(I-3)}$$

Où F_H et F_L sont la fréquence de coupure supérieure et la fréquence de coupure inférieure de la largeur de bande de -3 dB respectivement. Les signaux ULB ont été précédemment considérés comme des signaux dont la largeur de bande relative (FractionalBandwidth : FB) dépasse 25 % [2]. Cette définition a été étendue en 2002 par la FCC (Federal Communication Commission) américaine à tous les signaux dont la largeur de bande relative à -10 dB dépasse 20 % dont la bande de fréquence dépasse 500 MHz [3]. Cela a aussi donné l'opportunité de regrouper sous le nom d'ULB des solutions qui ne sont plus forcément impulsives. Toutes les modulations avec une bande instantanée supérieure ou supérieure à 500 MHz sont enregistrées dans cette catégorie.

Les systèmes radio classiques, qui modulent généralement un signal à bande étroite sur une fréquence porteuse, sont comparés aux systèmes à large bande, tels que les approches à spectre étalé, comme le montre la Figure I.2.

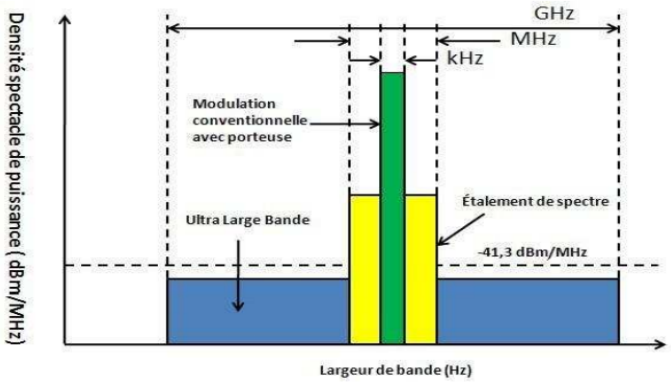


Figure I.2 : Analyse des spectres de différents systèmes de radiodiffusion

I.5.1Caractéristiques des signaux ULB

Plusieurs formes d'ondes sont actuellement disponibles pour obtenir un signal ULB. On peut distinguer deux méthodes

- **La méthode temporelle**

- Les signaux émis sont des impulsions temporelles très courtes durées (de l'ordre de la nanoseconde ou moins) comme illustré dans la Figure I.3.a. Avec cette méthode, la mesure est effectuée dans le temps.

- **La méthode harmonieuse**

Les signaux présentent une forme sinusoïdale avec une fréquence allant de la fréquence minimale à la fréquence maximale, qui peut être soit continue (WaveModulatedContinuous—FMCW) ou discrète (WaveModulatedContinuous—SFCW). La mesure est alors réalisée dans le domaine fréquentiel, et la transformée de Fourier inverse est utilisée pour revenir dans le domaine temporel (Figure I.3.b)

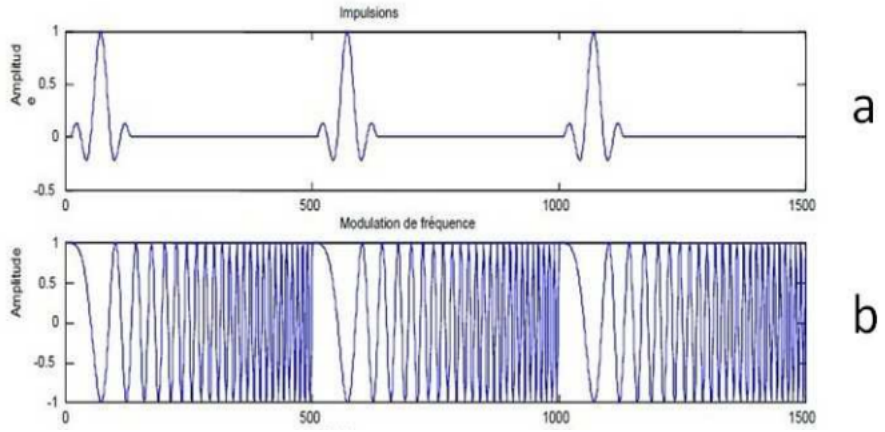


Figure I.3 : EXEMPLES DE FORMES D'ONDES ULB. (A) SIGNAL IMPULSIONNELS (B)FMCW

I.5.2Les principaux traits d'ULB

La bande ultra-large (ULB) présente certaines caractéristiques intéressantes [4] :

I.5.2.1 Communications sécurisées

Il est pratiquement impossible de détecter les signaux ULB car ils peuvent être transmis avec une densité spectrale de puissance bien inférieure à celle du bruit de fond des récepteurs classiques. Cette particularité, spécifique à l'ultra large bande, lui permet de coexister avec les systèmes de communication traditionnels.

I.5.2.2Capacité de la technologie ULB

Selon le théorème de Shannon, on peut déterminer la capacité d'un système en utilisant la formule suivante :

$$C=B.\log2\ (1+SNR) \qquad \textbf{(I-4)}$$

Le terme "B" fait référence à la bande passante du système et le "SNR" correspond au rapport signal/bruit. On peut conclure de cette formule que la capacité d'un système augmente de manière linéaire avec la bande passante, mais n'augmente que de manière logarithmique avec le rapport signal sur bruit. Ainsi, afin d'accroître la capacité d'un système, la méthode la plus efficace est d'accroître sa bande passante, ce qui est accompli grâce à la technique ULB.

I.5.2.3 La relative simplicité des systèmes ULB

L'utilisation de la technologie ULB dans les systèmes de communication sans fil permet d'utiliser les informations en bande de base pour moduler directement des impulsions de courte durée, plutôt que de former une onde sinusoïdale.

La technologie ULB présente quelques inconvénients : l'un des inconvénients de cette nouvelle méthode de communication est que les fréquences utilisées sont déjà utilisées par d'autres systèmes, ce qui peut entraîner des interférences.

I.5.3. Règlementation du FCC

Le Congrès américain a créé la FCC (Federal Communications Commission) en 1934, une agence indépendante du gouvernement des États-Unis. Son rôle est de contrôler les communications ainsi que les programmes de radio, de télévision et d'internet.

Pour garantir l'absence d'interférences nuisibles des dispositifs ULB, la FCC a établi des normes standards et des restrictions opérationnelles pour trois catégories de dispositifs ULB :

• Les systèmes de surveillance et d'imagerie, tels que les radars à pénétration de sol et de mur, ainsi que les appareils d'imagerie médicale ;

• Les dispositifs de surveillance des véhicules ;

• Les systèmes de communication et de mesure.

Ces systèmes ont une bande de fréquence différente l'un de l'autre, qui repose sur la largeur de bande d'émission ULB à -10 dB.

D'après le rapport de la FCC [38], il est recommandé que les fréquences opérationnelles des systèmes de vision à travers les murs soient inférieures à 960 MHz, ou comprise entre 1,99 GHz et 10,6 GHz (Tableau I.1). L'équivalent de puissance isotrope rayonnée (PIRE) est restreint en fonction des bandes de fréquence.

Bande de fréquences en MHz	Bande de fréquences en (dBm/MHz)	Moyenne-fréquence en (dBm/MHz)	Haute-fréquence en (dBm/MHz)
0.009 – 960	15.209		
1990 – 3100	-51.3	-41.3	-51.3
3100 - 10600	-51.3	-51.3	-41.3

Tableau I.1 : PIRE pour les systèmes radar ULB de vision à travers les murs

I.5.4 Règlementation de l'ECC

Le règlement général de l'ECC (Comité de communication électronique) [39] est applicable aux applications d'imagerie vissée, qui sont destinées à :

• repérer ou obtenir des photographies d'objets présents dans le sol ou dans un mur ;

• évaluer les propriétés physiques d'un sol ou d'un mur.

Les limites de la PIRE établies par l'ECC sont basées sur deux critères :

• le niveau maximal de la densité spectrale de puissance moyenne [dBm/MHz] ;

• la valeur crête maximale de puissance mesurée dans une plage de fréquences spécifique.

Les tableaux I.2 et I.3 résument ces restrictions :

Bande de fréquences (MHz)	Densité de PIRE moyenne maximale (dBm/MHz)
< 230	-65
230 – 1000	-60
1000 – 1600	-65
1600 – 3400	-51.3
3400 – 5000	-41.3
5000 – 6000	-51.3
> 6000	-65

Tableau I.2 : Restrictions sur le maximum de la moyenne de la densité spectrale de PIRE

Bande de fréquences (MHz) Puissance crête maximale	Bande de fréquences (MHz) Puissance crête maximale
30 – 230	-45.5dBm/120 KHz
230 – 1000	-37,5 dBm/120 kHz
1000 – 1600	-30 dBm/120 kHz

Tableau I.3 : Restrictions sur la valeur crête maximale de PIRE mesurée dans une certaine bande de fréquences

I.5.5Avantages du radar ULB

Le radar ULB présente diverses caractéristiques qui le différencient des autres radars à bande étroite

- Le radar ULB offre une résolution temporelle plus élevée que les systèmes traditionnels grâce à sa large bande de portée, ce qui permet une localisation et une résolution plus précises. En présence de deux cibles très proches, avec des impulsions.

Les signaux réfléchis sont ainsi superposés, ce qui ne permet de voir qu'un seul écho sur l'écran et ne permet pas de distinguer le nombre de cibles (voir figure I.4.a). Par contre, en utilisant des impulsions courtes, deux échos sont clairement visibles sur l'écran et les cibles peuvent être identifiées (voir figure I.4.b). La résolution est généralement d'environ la nanoseconde, c'est-à-dire une dizaine de centimètres. Plus le signal est court, plus la résolution sera élevée.

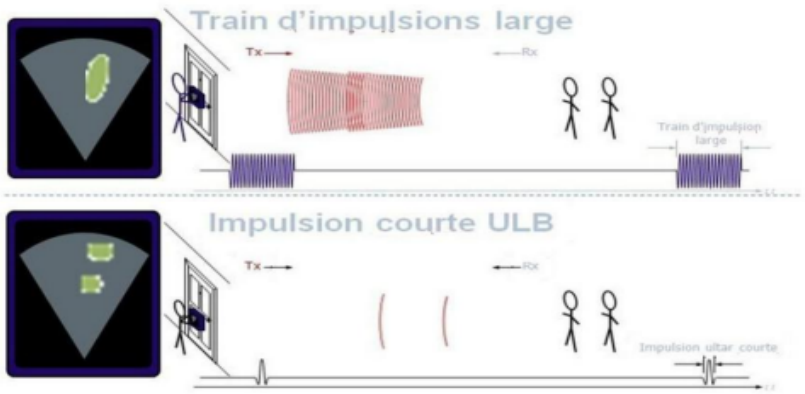


Figure I.4: Problématique de la résolution en distance : signaux réfléchis par les cibles

- Une longue durée d'impulsion qui offre une grande résistance face aux déclinaisons rapides causées par les multiples trajets dans un environnement dense.

- Cette courte période permet d'utiliser davantage de trajets.
- Une densité spectrale de puissance faible permet la coexistence de radars ULB et de services déjà existants tels que le téléphone mobile.

I.6 Configurations de radar ULB selon les données

D'après les données qu'ils doivent fournir, les radars ULB utilisent des propriétés et des structures différentes :

1.6.1 Le radar à onde continue (CW radar)

Le radar à ondes entretenues est le plus simple des radars. Il émet une onde électromagnétique continue et la fait interférer avec l'onde réfléchie, créant ainsi un système d'ondes stationnaires entre le radar et la cible. Il est également connu sous le nom de radar Doppler et est couramment utilisé pour évaluer les vitesses. Cependant, ses capacités sont limitées en termes de précision ou de portée.

1.6.2 Le radar à onde continue modulée en fréquence (FMCW radar)

Le radar CW présente un désavantage : il ne peut pas mesurer des distances. La modification de la fréquence d'émission permet de résoudre ce problème. Le radar FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) ou radar à onde continue modulée en fréquence est né de cette manière. Le dispositif d'émission est composé d'un oscillateur à commande de tension (VCO : Voltage Controlled Oscillator) qui est contrôlé par un système qui a pour fonction d'asservir la variation de la fréquence et de la rendre linéaire au fil du temps. La réception consiste à mélanger le signal reçu avec une partie du signal émis et à le prélever à l'aide d'une sonde.

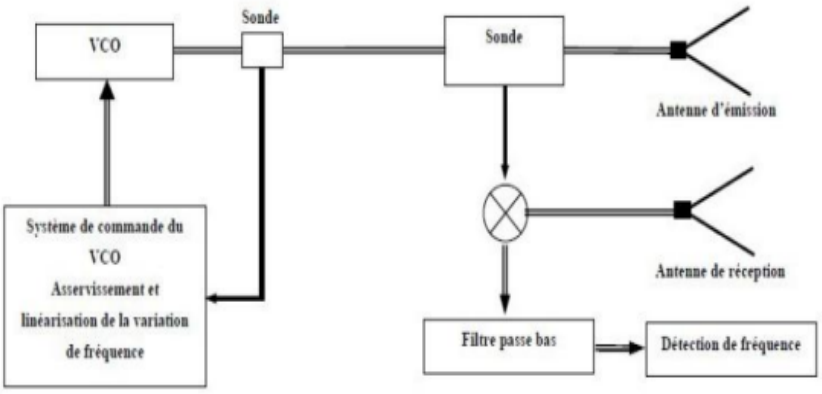


Figure I.5: Principe de fonctionnement du radar FMCW [12]

1.6.3 Le radar à ondes entretenues interrompues avec modulation de fréquence (FMiCW radar)

Un radar de type FMiCW (Frequency Modulated interrupted Continuous Wave) est un radar à onde continue spécifique. Pendant la modulation en fréquence, le signal du transmetteur est coupé à intervalles réguliers vers l'antenne afin de le transformer en un signal pulsé. Toutefois, le récepteur reçoit l'onde complète par dérivation et peut l'utiliser pour la conversion vers la fréquence de base lors de l'analyse des échos.

Le décalage en fréquence entre le signal transmis et l'écho est toujours utilisé pour mesurer la distance, comme dans un radar à onde continue ordinaire, et non par le temps aller-retour de l'impulsion, comme dans un radar pulsé avec modulation intra-impulsion. En réalité, la pulsation est employée afin de faciliter l'utilisation d'un récepteur plus sensible pendant les périodes de pause d'émission, ce qui permet d'accroître la portée utile [13].

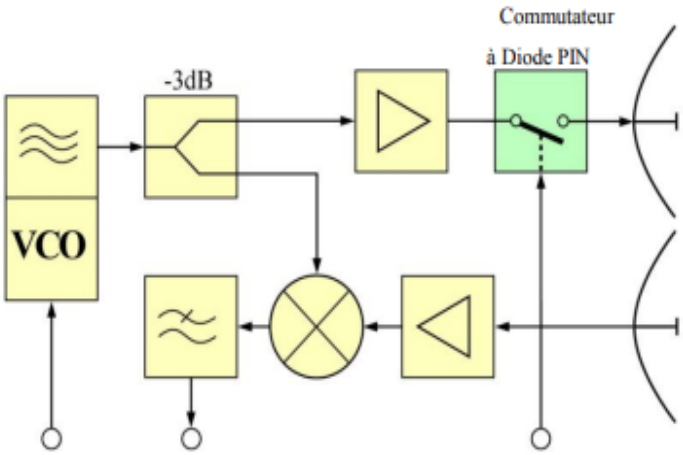


Figure I.6 : Radar FMiCW radar utilisant un commutateur à diode PIN pour mettre hors-circuit l'alimentation du transmetteur [13]

1.6.4 Technologie SFCW

La SFCW (Stepped Frequency Continuous Wave) ou « technologie à modulation à saut de fréquence » fonctionne en utilisant un synthétiseur DDS (Digital Direct Synthesis) qui commute d'une fréquence minimale *Fmin* à une fréquence maximale *Fmax* en *N* pas de fréquence ΔF. L'évolution de la fréquence au fil du temps est illustrée dans la figure I.7. Cette situation demeure stable et constante pendant un certain temps.

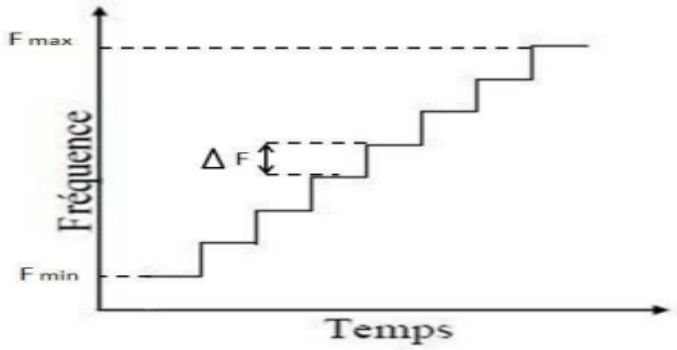


Figure I.7: Evolution de la fréquence en fonction du temps

1.6.5 Technologie à bruit

Le radar à bruit produit une série de bruits blancs (offrent ainsi un spectre très étendu). La partie d'émission est plutôt simple, mais la réception demande l'utilisation d'un corrélateur pour la réception.

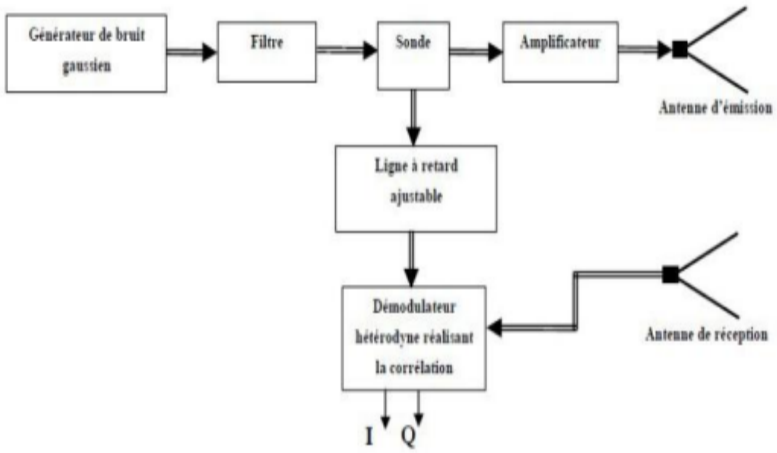


Figure I.8: Radar à bruit [12].

Ensuite, il est possible de traiter les deux données de sortie I & Q à l'aide d'un logiciel adéquat. La bande de base du signal en phase est I, tandis que celle en quadrature de phase est Q.

1.66Technologie impulsionnelle

La méthode la plus répandue pour produire un signal ULB consiste à transmettre des impulsions temporelles de très courtes durées, d'environ la nanoseconde environ. Le spectre d'une impulsion très courte est extrêmement vaste (Figure I.9), pouvant s'étendre de quelques MHz à quelques GHz.

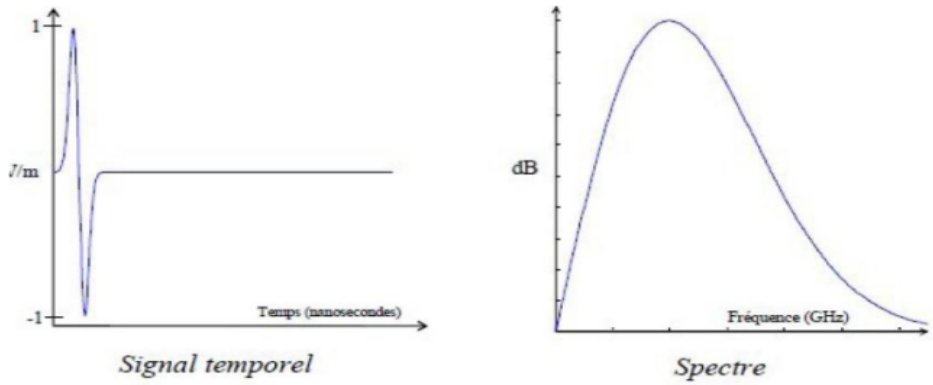


Figure I.9: Signal émis par un radar ULB.

Le désavantage de ce radar réside dans la complexité du récepteur qui demande l'utilisation d'un échantillonneur ultra-rapide.

I.7 Configurations de radar ULB selon la distribution spatiale

I.7.1 Radar mono statistique

Le radar mono statique regroupe les fonctions d'émission et de réception du radar dans une seule unité. Les frais liés à la synchronisation sont donc diminués. La même antenne est utilisée pour transmettre et recevoir les signaux [40]. On présente un schéma de radar mono statique sur la figure I.10.

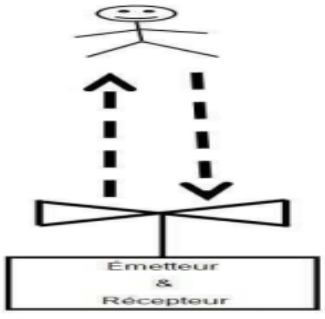


Figure I.10 Configuration du radar mono statique

I.7.2 Radar bi statistique

L'émetteur et le récepteur du radar bi statique ne sont pas utilisés de la même manière à l'émission et à la réception (Figure I.11). Lorsque la distance entre le radar et l'antenne d'émission est très élevée, le radar bi statique peut être utilisé. On peut le considérer comme un radar mono statique.

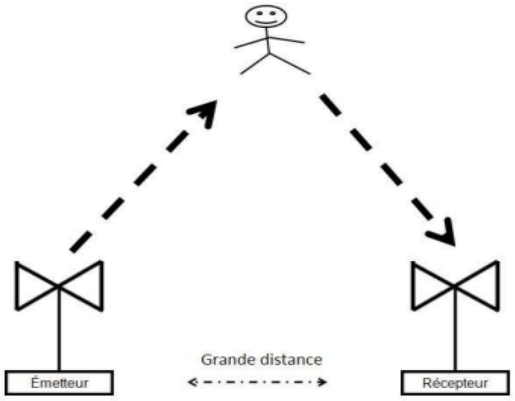


Figure I.11: Configuration du radar bi statique

I.7.3. Imagerie SAR dans le contexte MIMO

L'idée d'utiliser un radar à synthèse d'ouverture (SAR) est généralement utilisée pour cartographier la surface du sol. Le faisceau du radar est focalisé perpendiculairement au parcours du mouvement de la plate-forme sur le radar. La largeur du faisceau de l'antenne est suffisamment grande pour couvrir une cible ou une région. Le nombre total d'étapes d'éclairage et toutes les positions de l'antenne pendant l'exposition d'une cible particulière. La "portée synthétique" du système. Par conséquent, l'imagerie SAR est plus bénéfique pour la photographie aérienne. Il est nécessaire de disposer d'une quantité importante de traitement de données et de fournir des images haute résolution du sol. De plus, ces images peuvent être combinées avec d'autres images qui se complètent. Celles qui sont visibles, ou apparentes, le degré de maturité ou de développement des cultures, respectivement. Les mouvements des plantes ou les objets sous la couverture végétale [34].

I.7.4 Radar multi statistique

La structure du radar MIMO est également différente du radar distribué, les N émetteurs émettent tous en même temps, ce qui conduit à un effet de complication sur le traitement du signal associé au radar distribué, car les N émetteurs ne peuvent pas être distingués de celui d'où provient le signal. Pour ce faire, chaque émetteur émet un code particulier qui permet au

récepteur de différencier les signaux provenant de chacun des émetteurs (méthodologie de type CDMA) [35, 36].

La technologie MIMO offre une amélioration de la qualité du rapport signal à bruit et de la variété des informations mesurées [37]. La figure I.12 présente une configuration de radar MIMO.

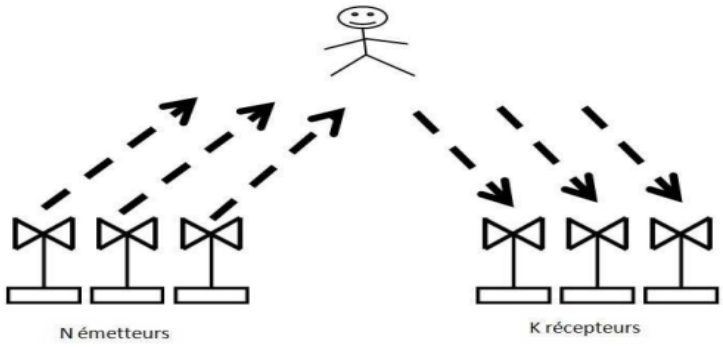


Figure I.12 configuration du RADAR MIMO

I.8 Types d'informations mesurées

L'information mesurée et son rendu sont des éléments essentiels d'un système radar. Bien entendu, à mesure que l'information mesurée est plus riche, le système radar utilisé devient plus complexe et plus volumineux. Dans ce qui suit, nous exposons les diverses informations qui peuvent être vues à l'aide d'un système radar

- **Le système à zéro dimension (0D),** il est très difficile d'obtenir des informations sur la scène de mesure, la seule information disponible est la présence ou l'absence des cibles. Il est impossible pour le système de comptabiliser ni de localiser les cibles. S'il s'agit de cibles mobiles ou fixes, il est encore plus incertain. Cependant, cette méthode est extrêmement simple et facile à mettre en place.
- **D'un système à une dimension (1D**) permet, en plus de l'indication de la présence de cibles, de mesurer la distance à laquelle la cible se trouve. Cependant, il reste encore difficile de recenser les cibles.

- **Système à deux dimensions (2D)** : grâce à ce système, il est possible de localiser et de comptabiliser les cibles. On peut envisager des traitements spécifiques, tels que le suivi de cibles.
- **Système en trois dimensions (3D)** : grâce à ce système, il est possible d'estimer la position verticale des cibles. Donc, nous pouvons obtenir des indications sur la taille des cibles, leurs habitudes (assises, debouts, etc.). Ce système est complexe en raison de la nécessité d'un réseau d'antennes 2D à la réception.

Dans un contexte intérieur, pour obtenir un contraste adéquat entre les objets, il est recommandé d'utiliser une méthode d'imagerie active, ce qui offre une sensibilité accrue [29].

L'imagerie micro-onde active fonctionne en illuminant une scène avec un faisceau d'énergie millimétrique et en générant une image à partir de l'énergie réfléchie reçue. Cette technique se distingue par sa grande sensibilité et sa portée étendue. Elle a la capacité de pénétrer divers matériaux. Par exemple, les systèmes d'imagerie active peuvent « voir » à travers des matériaux de construction pour révéler ce qui se trouve de l'autre côté, ce qui aide à identifier des zones à risque. Ces systèmes sont généralement composés d'un réseau d'antennes relié aux chaînes d'émission et de réception, et le balayage de ce réseau peut être effectué mécaniquement ou électroniquement.

I.9 Imagerie micro-ondes

L’imagerie micro-ondes a suscité un intérêt considérable au cours de la dernière décennie en vue d’applications dans différents domaines tels que l’exploration géophysique [1], la mesure de la teneur en eau du sol, le radar à pénétration de sol et l’imagerie d’objets enfouis [2-4], la détection à travers les murs, l’évaluation et le contrôle non destructifs, ainsi que l’imagerie biomédicale [5-7].

La sécurité et la sensibilité des micro-ondes aux facteurs physiques ou physiologiques d’intérêt clinique tels que la teneur en eau, le flux sanguin et la température constituent une grande partie du succès de l’imagerie biomédicale. Cela les différencie des techniques traditionnelles telles que l’imagerie par rayons X, qui utilisent des rayonnements ionisants qui sont nocifs pour le corps. Cependant, l’atténuation des micro-ondes dans les tissus riches en eau est nettement supérieure, ce qui limite les grandes zones d’imagerie rentable et rend très difficile l’imagerie des organes profonds dans le corps. La résolution est également mauvaise

en raison des longueurs d'onde beaucoup plus élevées, environ un centimètre, par rapport à celles utilisées en tomographie par rayons X, ordre du nanomètre.

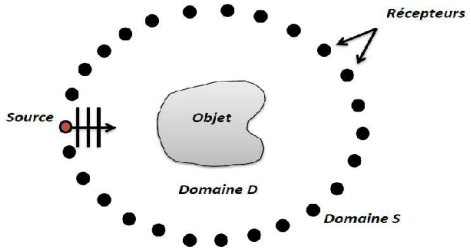


Figure I.13. Configuration géométrique en imagerie micro-onde bidimensionnelle (2D)

L'imagerie par micro-ondes a longtemps été reconnue pour son fort potentiel dans diverses applications. Récemment, cette technique a suscité un intérêt croissant, surpassant d'autres méthodes d'imagerie. De nombreuses études se sont basées sur l'utilisation des micro-ondes en tant qu'outil électromagnétique puissant, permettant de détecter les propriétés physiques et électriques d'objets pénétrables et impénétrables

Les fréquences utilisées en imagerie micro-ondes active s'étendent de moins de 1 GHz à 40 GHz. Il est reconnu que les basses fréquences atténuent les effets de non-linéarité et favorisent la stabilisation des algorithmes, tandis que les hautes fréquences améliorent la résolution des images. La plupart des applications fonctionnent dans une gamme de 2 GHz à 8 GHz, offrant un bon compromis entre la résolution spatiale (associée aux fréquences plus élevées) et la capacité de pénétration (liée aux fréquences plus basses).

Le rôle principal de l'imagerie par micro-ondes est de reconstruire une image de l'objet, ou plus précisément, de déduire les paramètres physiques d'un objet à partir des mesures des champs électromagnétiques dispersés ou réfléchis, qui se produisent lorsque l'objet est exposé à une incidence micro-ondes connue. Un système typique d'imagerie micro-ondes active est illustré à la Figure I.14. L'émetteur produit un signal micro-ondes qui éclaire l'objet, provoquant la diffusion ou la réflexion du champ. Ce champ diffracté ou réfléchi est ensuite capté par les récepteurs.

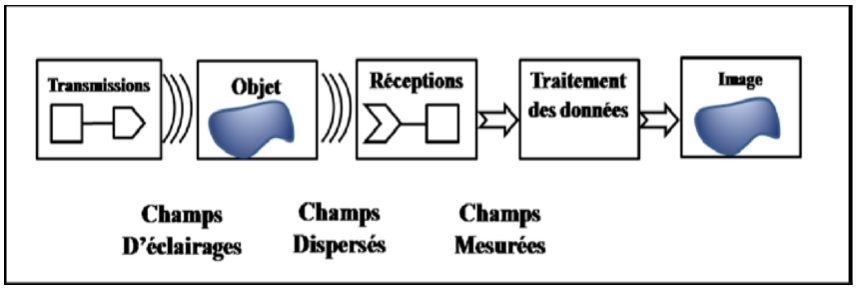


Figure I.14 : Système actif d'imagerie micro-ondes

Parmi les méthodes actives d'imagerie par micro-ondes recensées dans la littérature, on peut distinguer deux principales approches : la tomographie micro-ondes et la technique radar UWB, qui visent toutes deux à exploiter le contraste diélectrique de la cible à étudier. La reconstruction de l'image tomographique vise principalement à récupérer les propriétés diélectriques ou voir le profil d'objet à partir des signaux micro-ondes diffusés, en résolvant un problème non linéaire de diffusion inverse [10].

En revanche, les techniques radars à ultra large bande (UWB) ne visent pas à reconstruire le profil diélectrique complet. Leur objectif est plutôt de localiser et détecter les objets en analysant les signaux rétrodiffusés.

Il est essentiel d'utiliser des algorithmes de traitement du signal pour améliorer la résolution et éliminer les interférences importantes dans l'imagerie micro-onde radar. Dans le cadre de notre travail nous avons utilisé l'algorithme back-projection ou rétroprojection en français. Nous expliquerons le principe de cet algorithme dans le chapitre 3.

I.10. Applications du radar micro-onde

Nous présentons quelques applications liées à la détection sous-surface, telles que la localisation d'objets enterrés et l'imagerie de structures, mais cette liste n'est pas exhaustive. D'autres applications, notamment en contrôle non destructif dans le domaine industriel, peuvent également être considérées

Le radar à pénétration de sol (GPR) est utilisé pour la détection des mines antipersonnel, particulièrement efficace lorsqu'elles contiennent peu de métal. Il est essentiel dans le déminage humanitaire pour garantir un taux de détection proche de 100 %. Dans le génie civil, le GPR permet d'inspecter les routes pour détecter des anomalies dans les couches structurelles et optimiser la maintenance avant que les défauts ne s'aggravent.

I.10.1 Vision à travers le mur

Ce présent mémoire s'intéresse à cet axe, qui trouve de nombreuses applications aussi bien dans le domaine militaire (attaques, prises d'otages, etc.) que dans le domaine de la sécurité civile (recherche de personnes dans des ruines, dans un incendie, etc.). La réalité de la scène observée n'est pas requise pour ces utilisations, seules certaines informations pertinentes sont suffisantes : nombre de personnes, position, vitesse de déplacement, etc. (Figure I.15).

Figure I.15: Détection de personnes derrière un mur

I.10.1.2 État de l'art des systèmes radars de vision à travers les murs

Les radars de vision à travers les murs ont commencé à être développés il y a une quinzaine d'années. Des prototypes sont déjà produits par des entreprises ou des laboratoires, et certains systèmes sont même vendus et utilisés par la sécurité civile ou l'armée. Cependant, une importante activité de recherche reste en cours afin d'améliorer leurs performances. Nous présentons dans ce qui suit une liste non exhaustive des exemples commerciaux des radars à vision à travers les murs.

- **Thales FH-UWB**

Radar Une nouvelle génération de radars ULB a été développée par Thalès UK, qui permet de suivre une personne et de détecter sa respiration. Il emploie la méthode SFCW ULB [27] (voir Figure I.16)

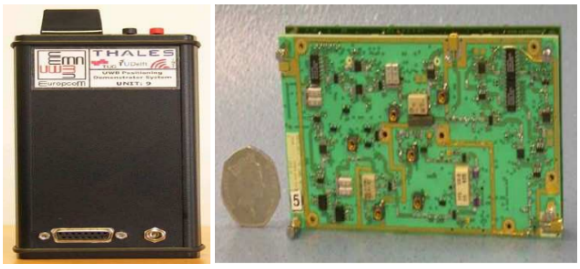


Figure I.16 FH-UWB radar (gauche) et sa carte radio fréquence

Son champ de détection s'étend de 50 m à 100 m en plein air et de 30 m derrière un mur. La taille d'une carte bancaire permet à ce système de traverser un mur de béton d'une épaisseur de 26 cm. Il utilise une bande passante de 1,25 GHz.

- **UHF TWS**

Radar SRI International [28] a mis au point un système de radar FMCW appelé UHF TWS radar. Il opère dans la plage de fréquences de 0,2-0,45 GHz et est équipé de trois antennes omnidirectionnelles ainsi qu'un ajustable en 2D. Il a une résolution spatiale d'environ un mètre.

- **Radar vision**

Ce produit [31] a été créé par la société Time Domain aux États-Unis. Le premier système réalisé pour la vision à travers les murs a été réussi. Radarvision2i est une version ouverte à l'exportation, Radarvision2 (Figure I.17) est une version destinée au commerce intérieur des États-Unis et Soldiervision est une version destinée à l'armée américaine. Ce système est muni de plusieurs antennes réceptrices et utilise le principe de la triangulation pour repérer les cibles. Radarvision2 a une puissance d'émission de 50 µW et une largeur de bande de 3,5 GHz (2,1-5,6 GHz), ce qui lui permet théoriquement de détecter des détails d'environ 5 cm. L'angle horizontal d'ouverture est de 120◦ et l'angle vertical d'ouverture est de 90◦. Il a une portée maximale de 10 mètres. La version Soldiervision présente des performances mécaniques plus élevées et émet une puissance de 1,5 mW. Selon Time Domain, tous ces systèmes peuvent franchir une paroi de 20 cm de béton armé.

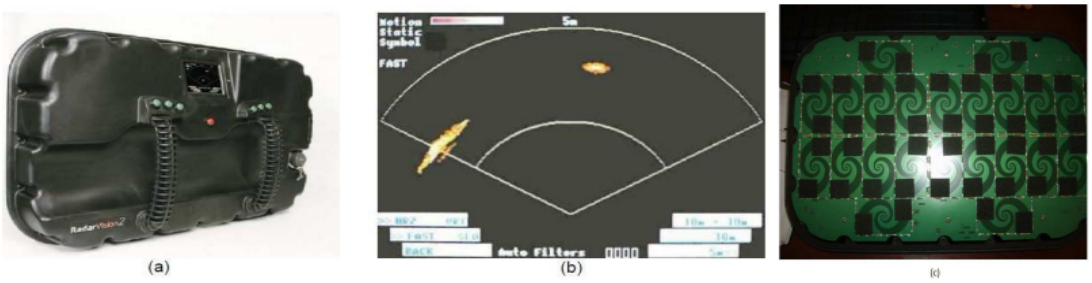


Figure I.17 : Radarvision2 (a) ; l'écran de visualisation du système Radar vision (b) ; réseaux d'antennes (c).

- **ImpSAR**

L'entreprise américaine Eureka Aerospace a créé le prototype d'un radar nommé ImpSAR [31]. Comme son nom l'indique, ce radar emploie le SAR avec la transmission d'impulsions ultra-courtes d'environ cent. de quelques secondes. Ce dispositif opère entre 250 MHz et 3,5 GHz, ce qui devrait lui permettre d'atteindre une résolution spatiale théorique dans les environs de 5 cm. Eureka Aerospace a également annoncé une portée de 100 mètres en plein air.

- **2D-CPR**

La société Hugues a également développé ce prototype [32], qui est le petit frère du MDR1A. Il se sert d'une porteuse modulée en fréquence avec une largeur de bande de 500 MHz, autour d'une fréquence centrale de 950 MHz. Le réseau est constitué de deux antennes, ce qui permet d'obtenir un gain de 9 dB et un angle d'ouverture de 90◦. La mesure est finalisée sur un écran en 2D.

- **Scope**

Le radar Scope [33] (Figure I.18) est capable de repérer rapidement une présence dans une pièce. Il s'agit d'un appareil portable qui nécessite une utilisation près du mur. Il peut également repérer des mouvements mineurs tels que la respiration.

Le Scope radar est un radar conçu par le DARPA pour l'armée américaine. Son champ de détection s'étend jusqu'à 15 mètres à travers un mur en béton.

Figure I.18 : Scope radar

- **Xaver 800 et 400**

Ce dispositif, sorti en 2007, est le premier dispositif capable de représenter en 3D une scène derrière un mur. Il a été créé par l'entreprise israélienne Camero. Le Xaver 800 et le Xaver 400 sont deux versions disponibles [34] [35] (FigureI.19). Il a la capacité de créer une scène en 3D derrière un mur jusqu'à une distance de 8 mètres, puis le rendu redevient en 2D.

(a) ***(b)***

Figure I.19 : systèmes d'imagerie 3D à travers les murs, (a)Xaver 400, (b)Xaver 800

C'est l'un des rares dispositifs qu'il n'est pas indispensable de fixer contre le mur. Elle couvre un spectre de 3 GHz à 10 GHz. La résolution de l'espace à 8 mètres est d'environ 20 cm. Ces systèmes disposent d'une connexion sans fil qui permet de renvoyer les images obtenues à une distance supérieure à 100 mètres. Les antennes du Xaver 800 sont plus grandes mais plus précises (en raison de l'écart entre les antennes) que celles du Xaver 400.

Le tableau suivant présente une classification et une comparaison synthétiques des systèmes radars commerciaux. Il manque certaines valeurs en raison de la faible quantité d'informations que nous disposons sur ces systèmes.

Nom du radar	Auteur, Société	Année	B.fréquence (GHz)	Résol.	Portée (m) (TTW)
FH-UWB radar	UK Thales	1997	1,25	/	30
UHF TWS radar	D.Falconer, SRI Inter.	1997	0.2-0.45	1.5m	/
EMARS	Raytheon	1997	/	/	/
MDR1A	L.Frazier, Hugues	1998	0.915	/	10
Radar vision	L.Fullerton, Time domain	2001	1-3	< 1m	10
ImpSAR	J.Tatoian, Eureka aero	2005	0.25-3.5	5cm	/
2DCPR	L.Frazier, Hugues	2006	0,95 et 0,7 - 1,2	15cm	/
Scope radar	DARPA	2006	/	/	15
Xaver 800 et 400	D.Gazelle, Camero	2007	3-10	<20cm	/
ASTIR	NIJ	2007	/	/	30
ReTWis	RETIA	2008	/	/	20
PRISM 200	Cambridge Consult	2009 [14]	1.7-2.2	30cm	/
TiaLinx Eagle 5	TiaLinx	2010	X - V bande	/	9
SuperVision-1601	Tianying	/	/	/	16
Prism 200	Cambridge Consultants	2013	24	30m	10cm
Cambridge Consultants	Vayyar Imaging	2017	6.3	///////	4
Lexus TTW Radar	Toyota (Lexus)	2020	24	30m	10cm
Xaver 1000	Camero-Tech	2022	3-10	42m	résolution très élevée (parties du corps)

Tableau I.4 Comparaison des systèmes radars commerciaux de vision à travers les murs.

I.11 Conclusion

Un radar utilise des ondes électromagnétiques pour identifier des objets spécifiques, même lorsqu'ils sont enfouis sous la surface ou cachés derrière des obstacles. Cette capacité unique fait du radar un outil essentiel dans divers domaines, allant de la sécurité à la recherche scientifique. Dans ce chapitre, nous avons offert une présentation détaillée de ce système complexe, en mettant en lumière son historique et son évolution au fil du temps. Nous avons également exploré la technologie ULB (Ultra Large Bande), qui représente une avancée significative dans le domaine, ainsi que ses nombreux avantages lorsqu'elle est intégrée à un système radar.

En outre, nous avons défini l'imagerie micro-onde, en exposant ses multiples applications dans des contextes variés tels que la détection des cibles, l'analyse des structures et la surveillance environnementale. Nous avons également passé en revue quelques algorithmes d'imagerie couramment utilisés, soulignant leur importance dans le traitement et l'interprétation des données collectées. Cela nous a permis de dresser un état de l'art sur l'application spécifique de ce mémoire, qui porte sur la « vision à travers le mur ».

Il est crucial de noter que l'antenne constitue l'élément clé dans les processus d'émission et de réception au sein de tels systèmes. Par conséquent, la conception de l'antenne utilisée revêt une importance primordiale, car elle détermine la qualité et l'efficacité des signaux radar. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter en détail l'antenne élément utilisée dans notre système radar, en analysant ses caractéristiques techniques, ses performances ainsi que son rôle fondamental dans l'amélioration des capacités d'identification et de détection du système. Cette exploration approfondie de l'antenne nous permettra de mieux comprendre son impact sur l'ensemble de la technologie radar et ses applications pratiques.

CHAPITRE II : Antenne Vivaldi ULB

II.1Introduction

Ce chapitre se concentre sur le rôle des antennes Vivaldi dans les systèmes de détection des objets derrière les murs. Les antennes Vivaldi sont largement utilisées dans les applications ULB en raison de leurs performances à large bande passante, de leur structure simple et de leur facilité d'intégration avec d'autres composants en plus de leur directivité. Nous commencerons par explorer les principes fondamentaux de la conception des antennes Vivaldi, notamment sa géométrie de fente exponentiellement conique et les facteurs qui influencent sa bande passante, ses diagrammes de rayonnement et son efficacité lorsqu'elles fonctionnent en présence de cible. Au préalable, nous aborderons les principes fondamentaux et caractéristiques des antennes et leur fonctionnement dans les communications sans fil.

Aujourd'hui, grâce aux logiciels de conception électromagnétique, l'analyse et la synthèse d'antennes complexes sur la bande de fréquence souhaitée sont devenues plus facile. Cette conception préalable est importante pour prendre en compte les paramètres électriques et diélectriques des antennes pour répondre aux exigences d'un cahier des charges précis avant de passer à la phase de réalisation.

Dans notre cas, le logiciel de simulation électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO (MWS), a été choisi pour la conception d'une antenne de base ainsi qu'étudier et analyser son fonctionnement.

II.2Généralités sur les antennes imprimées

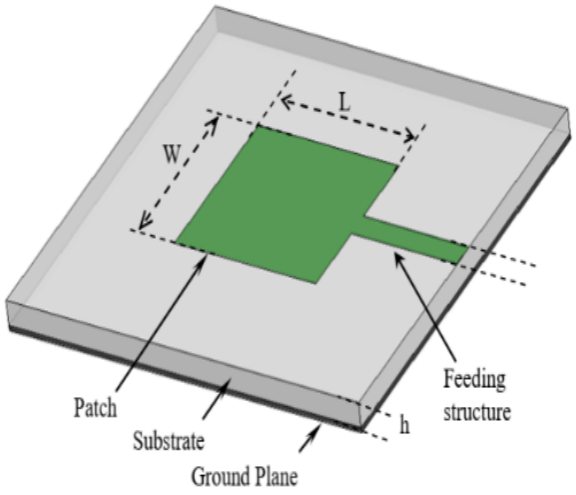
L'antenne est un dispositif conçu pour émettre ou recevoir les signaux électromagnétiques. Autrement dit, l'antenne a pour rôle de transférer l'énergie électromagnétique pour faire transiter les signaux de la source vers le récepteur [9].

Elle convertit le signal électrique en une onde radio en émission et réciproquement, elle convertit les signaux électromagnétiques en un signal électrique en réception. En fait, les antennes sont des composants essentiels de tout équipement sans fil.

En fonction de leur forme, nous trouvons différentes structures des antennes tels que les dipôles, les antennes filaires, les antennes cornets les antennes imprimées etc. Ces dernières captent une attention sans rival grâce à leurs nombreux avantages qui leur fait omniprésentes dans de nombreuses applications et spécifiquement dans les systèmes radar.

II.2.1 Définition des antennes imprimées

L'idée de concevoir des antennes imprimées a été proposée par Deschamps dès 1953. Cependant, leur mise en œuvre effective a été rendue possible seulement lorsque des matériaux diélectriques à faible perte sont apparus sur le marché, notamment grâce à l'utilisation de matériaux ayant une permittivité (ε_r) inférieure à 3. Ces antennes consistent en un conducteur (métallique ou non) dit « patch/élément rayonnant » d'une épaisseur très fine, gravé sur un substrat diélectrique. Le plan de masse est gravé sur la deuxième face du substrat comme indiqué dans la figure (II.1) qui illustre la forme de base d'une antenne micro-ruban [10].



III.1 : Forme de base de l'antenne imprimée [10]

Le substrat qui supporte l'élément rayonnant et le plan de masse peut être rigide ou flexible et est caractérisé par son épaisseur h qui est généralement compris entre $0.003\ \lambda_0 \leq h \leq 0.05\ \lambda_0$, sa permittivité diélectrique ε_r qui est comprise typiquement entre 2.2 et 12 [11], et de sa tangente de pertetan δ qui doit être minimale.

Selon les matériaux constituant l'antenne, les techniques de fabrications de celle-ci se diffèrent afin de d'aboutir une meilleure précision, parmi ces méthodes nous pouvons citer la photolithogravure, impression jet d'encre, impression 3D etc. Par ailleurs, l'antenne peut prendre différentes formes telles que carré, rectangulaire, circulaire, elliptique, triangulaire etc. [12].

II.2.2 Avantages et inconvénients

Au fil du temps, la recherche dans ce domaine n'a cessé de croître pour tirer parti des avantages et des inconvénients offerts par ces antennes : [13]

Les avantages

- Faible profil et simplicité
- Conformité et flexibilité en utilisant des substrats souples et flexibles.
- Facile à fabriquer (gravure et photolithographie).
- Facile à alimenter (câble coaxial, ligne micro-ruban).
- Facile à intégrer à un circuit PCB (Printed Circuit Board) et associer des composants actifs.
- Mise en réseau efficace vu leur faible poids pour augmenter le gain évitant tout encombrement.

Les inconvénients

- Faible bande passante. Cependant, ce problème est remédié en utilisant une variété de techniques d'élargissement de bande passante selon l'application visée. La bande passante est proportionnelle au substrat épaisseur et inversement proportionnelle à la permittivité du substrat [13].
- L'efficacité de l'antenne imprimée peut être inférieure à celle des autres antennes. Elle est limitée à cause des pertes du conducteur, du diélectrique, et les pertes dues d'ondes superficielles.

II.2.3 Caractéristiques des antennes

Quelques soit leurs fréquences ou leurs structures, les antennes sont caractérisées par des propriétés communes qui sont décrites par différents paramètres. Ces paramètres sont classés principalement en deux groupes. Le premier concerne ses caractéristiques électriques et résume le coefficient de réflexion, l'impédance d'entrée, le rapport d'onde stationnaire. Le deuxième groupe concerne les caractéristiques de rayonnement de l'antenne et englobe le gain, la directivité, l'efficacité etc.

II.2.3.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'antenne est un paramètre important car elle détermine l'adaptation d'impédance entre l'antenne et le système auquel elle est connectée, tel qu'un émetteur ou un récepteur. Une adaptation d'impédance optimale permet de maximiser le transfert d'énergie entre l'antenne et le système, ce qui se traduit par une meilleure efficacité de

transmission ou de réception des signaux. Le transfert de puissance maximale ne peut être atteint que si l'impédance de l'antenne est adaptée à celle du générateur [52]. L'impédance d'entrée est définie par les équations suivantes : [14]

$$Z_A = R_A + jX_A \quad \textbf{(II-1)}$$

Où :

$\mathbf{Z_A}$= impédance d'entrée de l'antenne

$\mathbf{R_A}$= résistance d'entrée de l'antenne

$\mathbf{X_A}$= réactance d'entrée de l'antenne

La partie résistive ($\mathbf{R_A}$: réelle) dite active de l'équation se compose de deux composantes : une partie liée au rayonnement ($\mathbf{R_r}$) et une partie liée aux pertes ohmiques ($\mathbf{R_L}$) tel que :

$$R_A = R_r + R_L \quad \textbf{(II-2)}$$

Où :

$\mathbf{R_r}$= résistance de rayonnement de l'antenne

$\mathbf{R_L}$= résistance de pertes de l'antenne

La partie réactive ($\boldsymbol{X_A}$: imaginaire) de l'impédance est liée au la puissance stockée dans l'antenne. Elle est en fonction de la capacité et l'inductance à l'entrée de l'antenne. Cette partie s'annule à la fréquence de résonnance pour assurer une bonne adaptation.

II.2.3.2Coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire (ROS)

On dit qu'une antenne est parfaitement adaptée lorsque son impédance d'entrée (Ze) est égale à l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation (Zc). De ce fait, toute la puissance fournie ne subit pas de grandes réflexions. Le coefficient de réflexion est défini alors comme étant le rapport entre la puissance réfléchie et la puissance émise. Il peut être définit également en fonction des impédances d'entrées et caractéristique comme le montre l'équation suivante [15].

$$\Gamma = S_{11} = \frac{z_e - z_c}{z_e + z_c} = \frac{\text{ondereflechie}}{\text{ondeincridente}} \quad \textbf{(II-3)}$$

Où $\boldsymbol{Ze}$ est l'impédance d'entrée de l'antenne et Zc est l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Le coefficient de réflexion est couramment exprimé en **dB** et cela peut être calculé par l'équation [II-4] :

$$S_{11} = 10\log_{10} S_{11} \quad \textbf{(II-4)}$$

L'adaptation est idéale lorsque ce coefficient $S_{11} = 0$ et donc $Z_e = Z_c$. En échelle logarithmique une bonne adaptation est obtenue pour des valeurs inférieure à -10 dB [16].

L'adaptation de l'antenne est aussi caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) en anglais, exprimé comme suit :

$$\mathbf{ROS} = \frac{\mathbf{1}+|\boldsymbol{\Gamma}|}{\mathbf{1}-|\boldsymbol{\Gamma}|} \quad \textbf{(II -5)}$$

Ce rapport prend des valeurs entre 1 et l'infini. En pratique, une bonne adaptation est réalisée lorsque le taux d'onde stationnaire est compris entre 1 et 2.

II.2.3.3La bande passante

La largeur de bande d'une antenne est définie comme la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'antenne présente de bonnes performances [14]. Elle est mesurée à partir de la courbe du coefficient de réflexion. Il est courant d'utiliser un critère de coefficient de réflexion inférieur à -10 dB comme le montre la figure II.2[17].

Elle peut être exprimée en valeur absolue comme étant la différence entre la fréquence maximale et la fréquence minimale (équat [II-6]) ou en valeur relative suivant l'équation (II-7)

$$\mathrm{BP} = \mathrm{f_{max}} - \mathrm{f_{min}} \quad \textbf{(II -6)}$$

$$BPR = 2\,\frac{fmax-fmin}{fmax+fmin}.100 \quad \textbf{(II-7)}$$

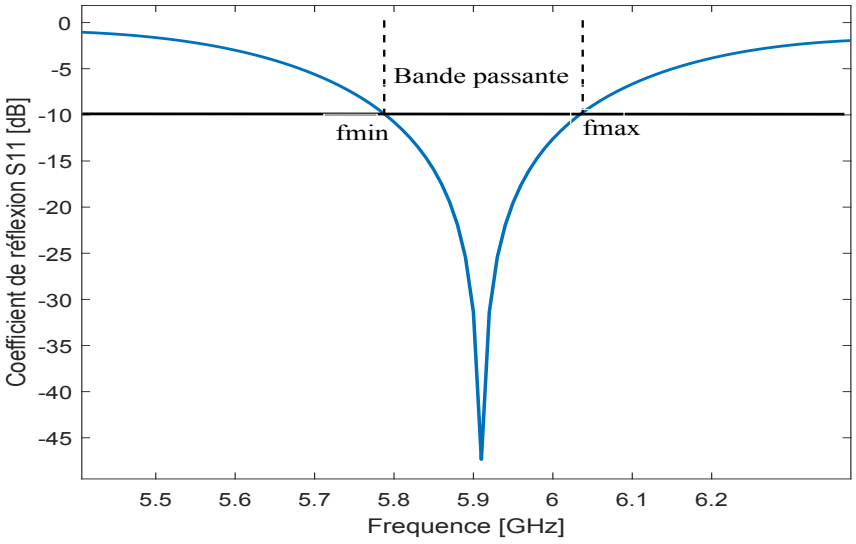


Figure II.2 : Bande passante et coefficient de réflexion

II.2.3.4 Le Gain

Le gain est l'un des paramètres les plus significatifs des antennes. Il est défini comme le rapport de l'intensité U(θ,φ), dans une direction donnée, à l'intensité de rayonnement d'une source isotropique. L'intensité de rayonnement de la source isotropique est égale à la puissance d'entrée par l'antenne divisée par 4π, comme exprimé par l'équation suivante :

$$G = 4\pi \frac{\text{l'intensité derayonnement}}{\text{puissanced'entrée totale}} => G = 4\pi \frac{U(\theta,\varphi)}{P_{in}} \quad \textbf{(II-8)}$$

II.2.3.5 Directivité

C'est une mesure de la concentration de rayonnement d'une antenne dans certaines directions dans l'espace [14]. La directivité d'une antenne est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée P (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [17] :

$$D(\theta,\varphi) = \frac{P(\theta,\varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta,\varphi)}{P_R} \quad \textbf{(II -9)}$$

II.2.3.6 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique qui montre la distribution de l'énergie dans l'espace lorsqu'elle est rayonnée ou reçue par une antenne. Il décrit également les propriétés de rayonnement d'une antenne qui varient en fonction des coordonnées spatiales. Cette représentation est traduite par la fonction caractéristique de l'antenne et elle peut être représentée graphiquement en **2D** ou **3D**. Le diagramme de rayonnement est un outil important pour comprendre les performances d'une antenne dans différentes directions spatiales et peut être utilisé pour optimiser la conception de l'antenne [16].

Généralement, les diagrammes de champs sont représentés dans deux plans principaux perpendiculaires l'un à l'autre, à savoir le plan E et le plan H. Le plan E représente verticalement le champ électrique et la direction de rayonnement maximale, tandis que le plan H représente horizontalement le champ magnétique et la direction de rayonnement maximale [16]**.**

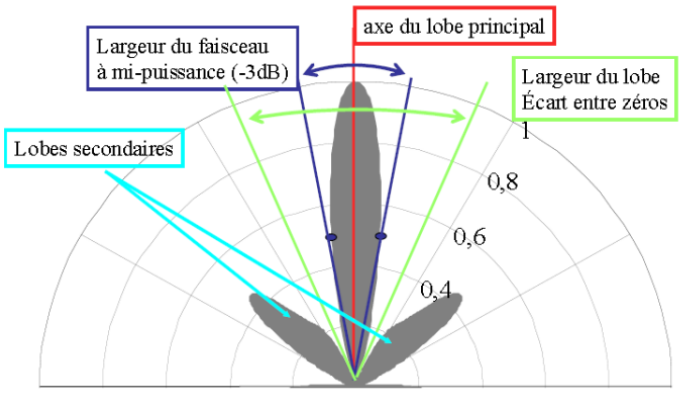


Figure II.3 : Le diagramme de rayonnement représenté en deux dimensions. [18]

Trois types de diagrammes peuvent être identifiés

- Isotropique : C'est le rayonnement d'une antenne isotrope idéale qui ne subit aucune perte et qui rayonne avec la même intensité dans toutes les directions. Bien qu'elle ne puisse être réalisée physiquement, elle est souvent utilisée comme point de référence pour décrire les propriétés directionnelles des antennes réelles.

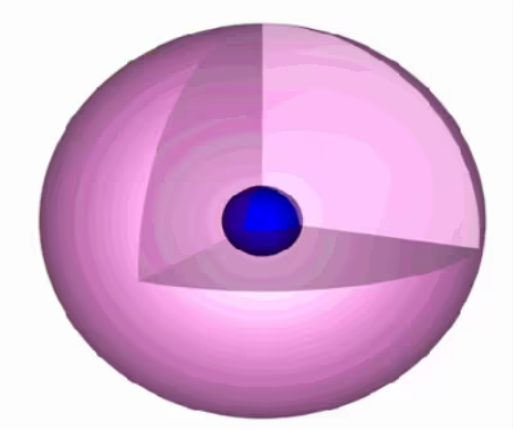


Figure II.4 : Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope [19]

- Omnidirectionnels : Ce rayonnement est quasi uniforme dans un plan donné, et présente une directivité dans d'autres plans orthogonaux. Par conséquent, on peut considérer un diagramme omnidirectionnel comme un cas particulier d'un diagramme directionnel.

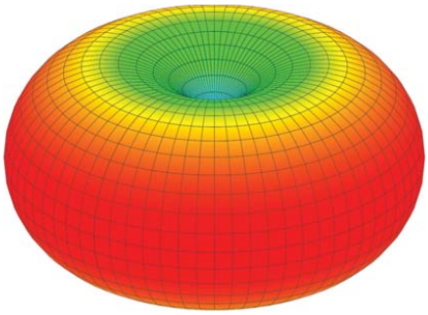


Figure II.5 : Diagramme de rayonnement Omnidirectionnel

- Directif : Une antenne directive est une antenne qui a la capacité de rayonner ou de recevoir les ondes électromagnétiques de manière plus efficace dans certaines directions que dans d'autres (figure II.6).

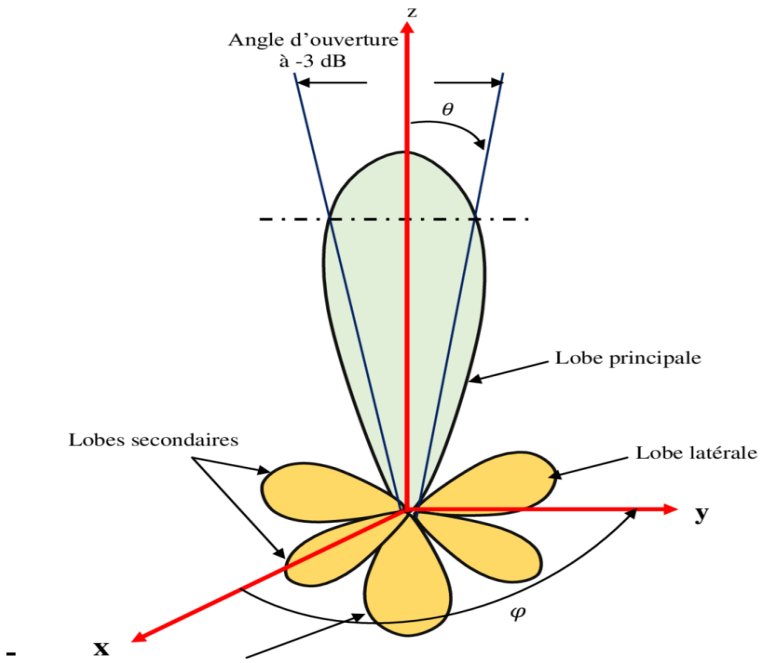
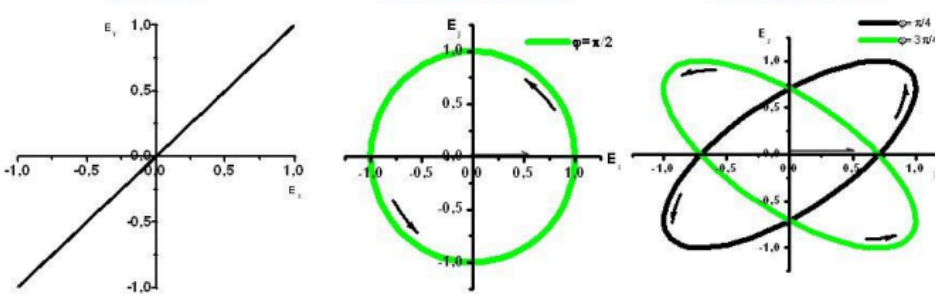


Figure II.6 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive

II.2.3.7 Polarisation d'antenne

La polarisation correspond à la direction du champ électrique d'une onde électromagnétique émise ou reçue. Pour une onde non-polarisée, le champ tourne autour de son axe de façon aléatoire et imprévisible en fonction du temps. Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique. Il y a trois types de polarisation (figure II.7)

1. **La polarisation linéaire (rectiligne) :** Dans une antenne à polarisation linéaire, le champ électrique oscille dans une direction spécifique, soit verticale soit horizontale.
2. **La polarisation circulaire :** le champ électrique tourne autour de son axe en formant un cercle
3. **La polarisation elliptique** : le champ électrique tourne autour de son axe et change d'amplitude pour former une ellipse.



(a) (b) (c)

Figure II.7 : Polarisation (a) linéaire, (b) circulaire, (c) elliptique

II.3 Outil de simulation

Le simulateur électromagnétique permet de reproduire les conditions réelles de l'expérience pour anticiper les résultats et les performances attendus. Ces simulations visent à trouver la structure optimale avec le moindre cout. En 1992, CST STUDIO, une entreprise allemande, a été créée. Après de multiples recherches, la première version de CST Microwave studio a été lancée en 1998. Cet outil vise à faciliter la conception magnétique et permet une analyse précise et rapide des dispositifs à haute fréquence tels que les filtres et les antennes. CST Microwave studio est un simulateur 3D spécialisé basé sur la technique des intégrales finies de résolution des équations de Maxwell. Il offre la capacité de traiter toutes sortes de structures homogènes, indépendamment de la technologie utilisée. Dans notre étude, nous avons utilisé cet outil pour simuler une antenne patch alimentée par une ligne micro ruban.

II.4 Conception de l'antenne Vivaldi ULB

Nous considérons une antenne Vivaldi antipodale de base de dimensions 24x33 mm, imprimée sur un substrat FR4 avec une permittivité diélectrique de ϵr = 4,3 et une épaisseur de H = 1,5mm. La métallisation des deux côtés a une épaisseur T = 0,035mm. L'antenne est alimentée par une ligne micro ruban de 50 Ohms. Cette antenne est basée sur la conception obtenue à partir de du travail mené dans [46]. L'antenne Vivaldi proposée est présentée dans la Figure II.8. Les dimensions de l'antenne sont résumées dans le tableau II.1.

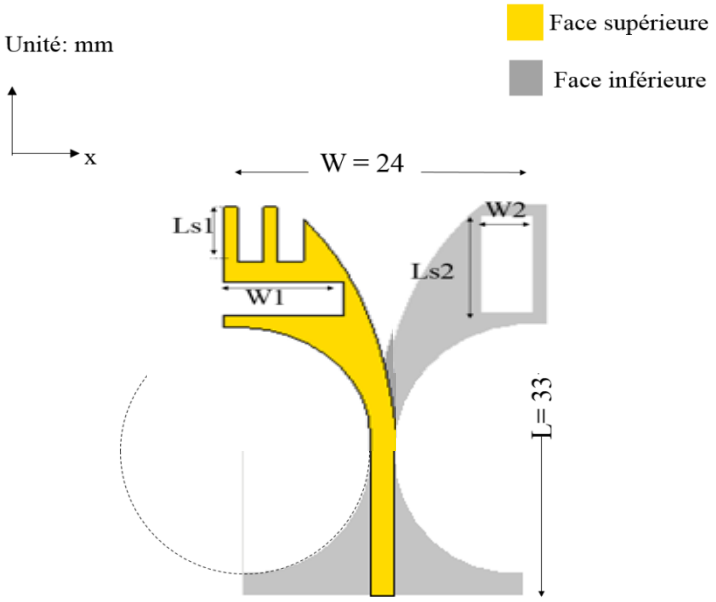


Figure II.8 Géométrie de l'antenne utilisée [46]

Paramètres	Valeurs (mm)
Wsub	24
Wf	2
T	0.035
Lsub	33
Lf	12
Ld2	32
Ld1	23
H	1.5

Tableau II.1Dimensions de l'antenne Vivaldi ULB

II.4.1 Résultats de simulations

Dans cette section, nous présenterons les résultats de simulations de l'antenne en termes de coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement, gain etc.

II.4.1.1 Coefficient de réflexion

Dans la figure II.9 est présenté le coefficient de réflexion de l'antenne, où nous observons une adaptation allant de 4,72 GHz jusqu'au 15 GHz ce qui justifie sa nature ultra large bande.

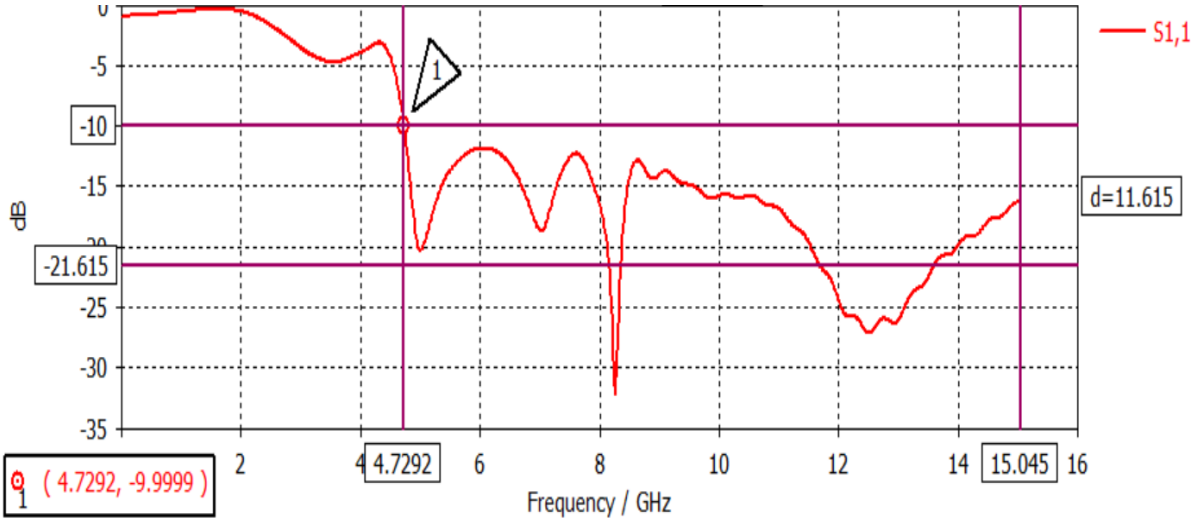


Figure II.9Coefficient de réflexion de l'antenne utilisée en fonction des fréquences

II.4.1.2Impédance de l'antenne

La variation de l'impédance de l'antenne en fonction de la fréquence en matière de la partie réelle et imaginaire est donnée sur la figure II.10. Nous constatons une adaptation d'impédance satisfaisante, sa partie réelle varie autour du « 50 Ohm » dans toute la bande de fréquence désirée, ainsi une partie imaginaire autour de « 0 » dans toute cette bande [46].

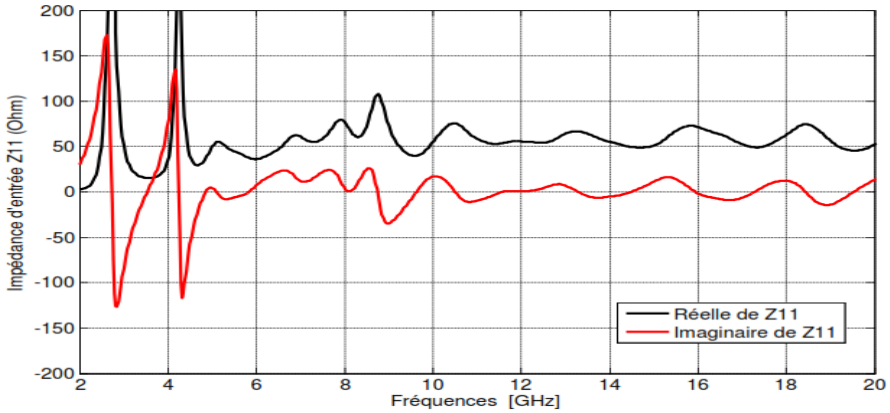


Figure II.10 Impédance d'entrée de l'antenne utilisée en fonction des fréquences

II.4.1.3Diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement des plans E et H de l'antenne proposée sont illustrés à la figure II.11 pour différentes fréquences, notamment à 5, 11 et 16 GHz. Comme on peut l'observer, l'antenne présente un diagramme de rayonnement directionnel à toutes ces fréquences. Il est important de noter que l'antenne est plus directive dans le plan E que dans le plan H [46].

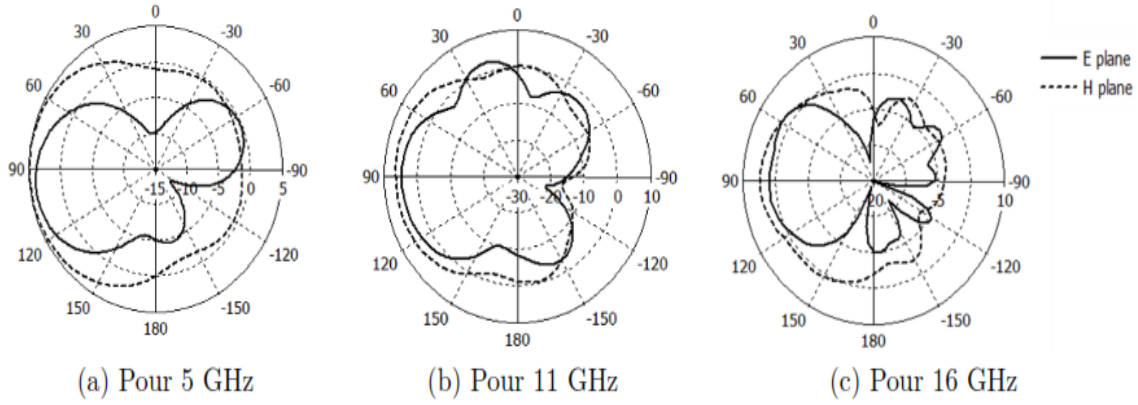


Figure II.11Diagramme de rayonnement de l'antenne à différentes fréquences [45]

II.4.1.4Gain de l'antenne

Le gain de l'antenne en fonction des fréquences est illustré à la figure II.12. Dans la bande de fréquences opérationnelle, l'antenne atteint de bonnes valeurs de gain, avec un gain maximal de 5 dB à 10 GHz.

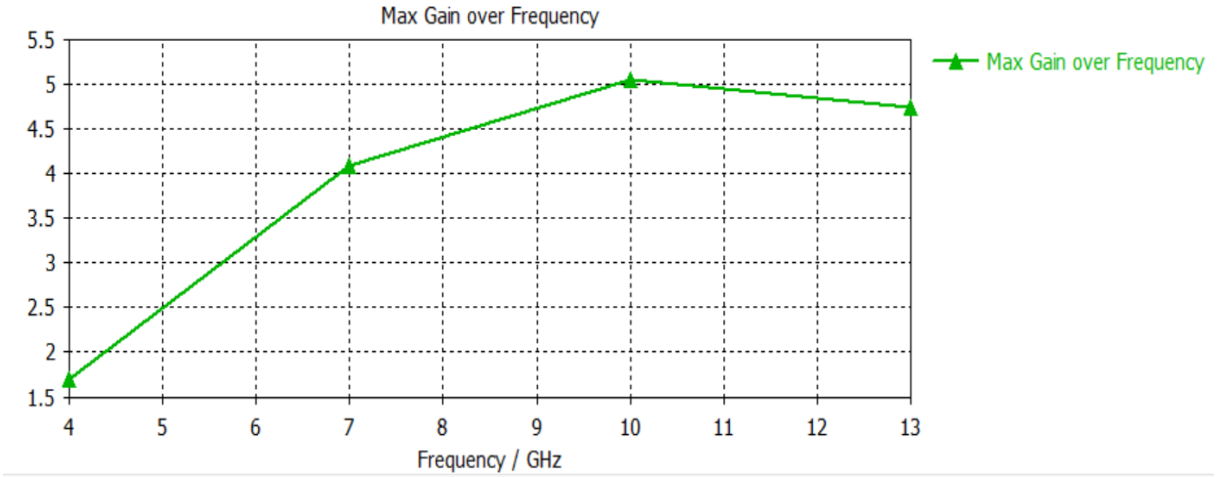


Figure II.12Gain de l'antenne utilisé en fonction des fréquences

II.4.1.5 Efficacité de l'antenne

L'efficacité de rayonnement est un paramètre primordial car il mesure la puissance rayonnée par rapport à la puissance injectée dans l'antenne. La figure II.13 montre l'efficacité de rayonnement de l'antenne en fonction de la fréquence. L'antenne présente de bonnes valeurs d'efficacité montrant sa capacité à rayonne presque la totalité de l'énergie lui est fournie.

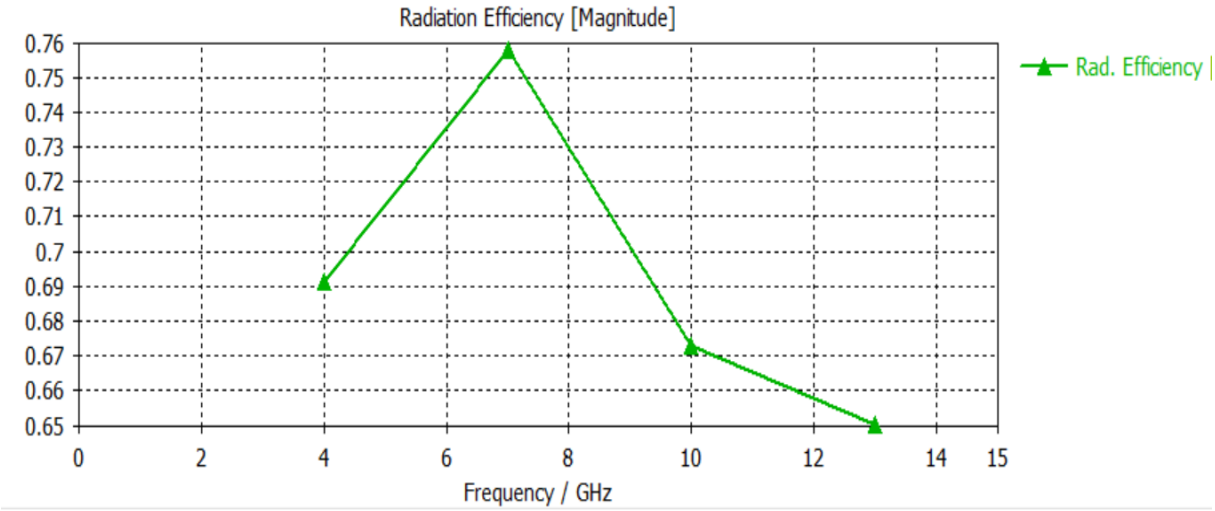


Figure II.13Efficacité de l'antenne utilisé en fonction des fréquences

II.4.2 Résultats de mesure

Dans le but de vérifier la validité de notre conception, l'antenne proposée a été réalisée au sein du laboratoire de télécommunications de Tlemcen (LTT) et est présenté dans la figure II.14, alimentée par un connecteur SMA 50 Ω. La Figure II.15 montre clairement l'accord entre les résultats simulés et ceux obtenus par la mesure (en termes de coefficient de réflexion) avec une légère dégradation dans les hautes fréquences, qui sont probablement causées par des pertes dues à la soudure du connecteur SMA [46].

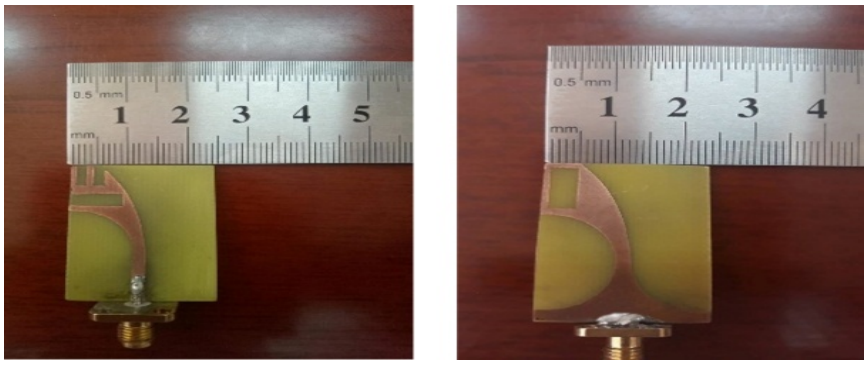


Figure II.14Prototype de l'antenne utilisé [46]

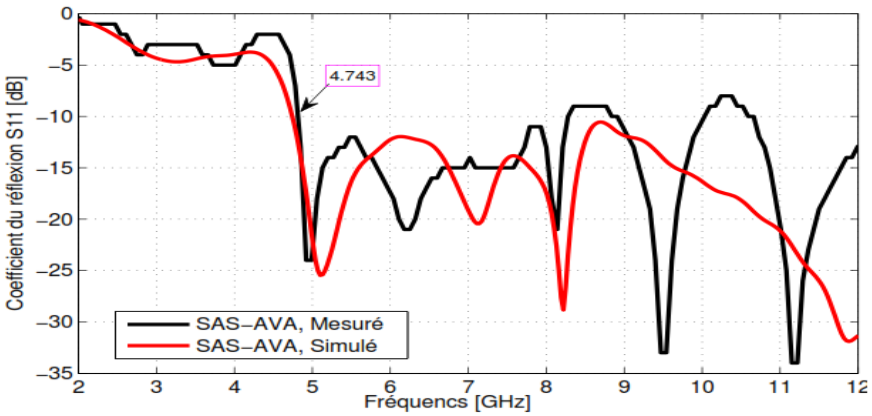


Figure II.15 Coefficient de réflexion de l'antenne réalisée [46]

II.5 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'exploration approfondie de l'antenne Vivaldi à ultra large bande, en mettant en lumière ses caractéristiques techniques fondamentales. Parmi celles-ci, le coefficient de réflexion, l'impédance d'entrée, le gain et l'efficacité sont des paramètres cruciaux qui déterminent les performances globales de l'antenne. Les résultats obtenus, tant par simulations numériques que par expérimentations pratiques, démontrent que l'antenne Vivaldi offre des performances remarquables, avec un accord satisfaisant entre les données théoriques et les résultats mesurés. Cette robustesse et cette fiabilité font de cette antenne un choix privilégié pour diverses applications.

Dans le prochain chapitre, nous allons procéder à la conception d'un système d'imagerie radar à micro-ondes basé sur l'antenne Vivaldi que nous venons de présenter. Ce système sera essentiel pour des applications telles que la détection et l'imagerie de cibles. Par la suite, un algorithme d'imagerie sera développé et appliqué aux signaux reçus, permettant ainsi d'extraire des images des cibles à détecter. Cette approche intégrée entre l'antenne et l'algorithme ouvrira de nouvelles perspectives dans le domaine de l'imagerie radar, mettant en avant les capacités avancées de cette technologie.

CHAPITRE III : Résultats des simulations

III.1 introduction

L'imagerie radar constitue une technologie puissante permettant la détection d'objets et de personnes dans des environnements cachés. Ce mémoire a exploré l'impact de la configuration MIMO, en particulier le système MIMO 4x1, 4x2 et 4x3, et des algorithmes de traitement des signaux sur la qualité des images obtenues. Les simulations réalisées montrent que la combinaison de ces deux éléments améliore significativement la capacité du radar à générer des images claires et précises.

Dance chapitre, nous allons présenter les configurations des réseaux d'antennes proposés ainsi l'algorithme d'imagerie utilisé. Ensuite les résultats d'imagerie seront présentés.

III.2 Configurations des réseaux MIMO

Dans le cadre de la vision à travers les murs, l'utilisation des réseaux MIMO est une technique efficace pour améliorer la résolution spatiale et la capacité de détection d'objets cachés derrière des obstacles. Un système MIMO exploite plusieurs antennes à la fois en émission et en réception, permettant d'augmenter la diversité spatiale et d'obtenir des informations plus détaillées sur les cibles à partir de différents angles.

Un système radar MIMO se compose de **N** antennes émettrices et de **M** antennes réceptrices. Contrairement à un radar classique où une seule antenne est utilisée pour l'émission et la réception, un réseau MIMO permet de créer une matrice virtuelle d'antennes en combinant les signaux de chaque antenne émettrice avec ceux des réceptrices. Cela permet d'augmenter le nombre d'éléments de mesure sans augmenter physiquement le nombre d'antennes, tout en améliorant la capacité de résolution angulaire.

- **Transmission** : Les antennes émettrices diffusent des signaux électromagnétiques en séquences ordonnées, souvent avec des codes spécifiques pour différencier chaque source.
- **Réception** : Les antennes réceptrices captent les signaux réfléchis par les objets situés derrière le mur. Grâce à la diversité spatiale, le système peut identifier les signaux provenant de différentes directions, offrant ainsi une vue plus précise des objets cachés.

La configuration des antennes dans un réseau MIMO peut varier selon les exigences de l'application. Voici quelques types courants de configurations utilisées dans l'imagerie radar à travers les murs :

1. **MIMO en ligne** : Les antennes sont alignées en une seule ligne, permettant une reconstruction des cibles en deux dimensions (2D). Ce type de configuration est simple mais limite la capacité à capturer des informations en profondeur.
2. **MIMO en matrice** : Les antennes sont organisées en une grille ou matrice 2D, permettant de capturer des informations dans les trois dimensions (3D). Cela améliore la précision de l'image et la localisation spatiale des objets, qui justifie notre choix de ce type de configuration dans notre mémoire.

Nous allons étudier 3 différentes configurations dont nous gardons le nombre des antennes émettrices à quatre émetteurs et nous allons changer le nombre des récepteurs de 1, 2 et 3 respectivement. La distance entre les antennes étant une demi-longueur d'onde à la fréquence centrale de fonctionnement dans les deux sens horizontalement et verticalement.

III.2.1 Réseau MISO 4x1

Dans un système **MISO 4x1**, on utilise quatre antennes pour l'émission de signaux et une seule antenne pour la réception. Les antennes émettrices sont distribuées aux quatre coins d'un carré tandis que l'antenne réceptrice est positionnée dans le centre de ce même carré. L'architecture adopter pour cette configuration est présente dans la figure III.1. Cette architecture offre plusieurs avantages en termes de couverture spatiale et de diversité des signaux, tout en limitant le coût et la complexité du matériel. Les quatre antennes émettrices envoient des signaux micro-ondes simultanément Une seule antenne réceptrice capture les signaux réfléchis par les objets. Avantages du MISO 4x1

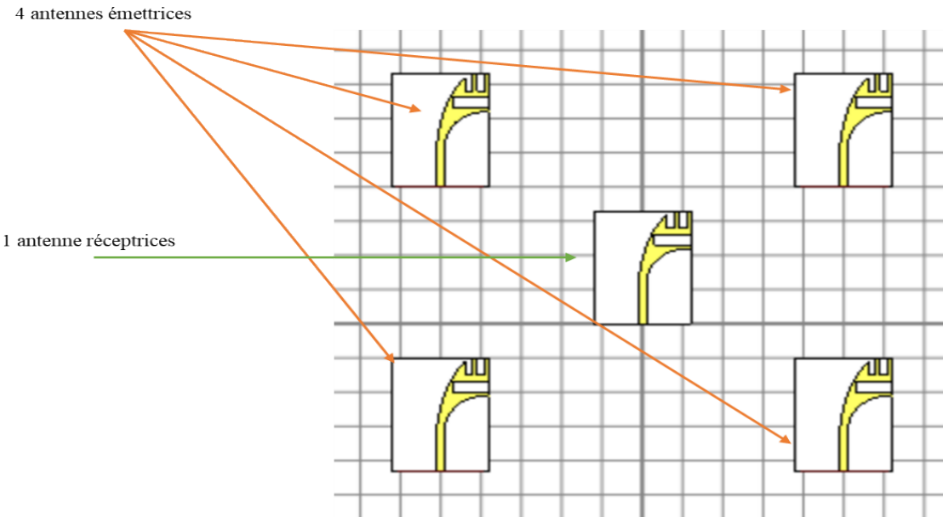


Figure III.1. Configuration 4x1

III.2.2 Réseau MIMO 4x2

Avec deux récepteurs, le radar capture des signaux provenant de deux points de vue différents à partir de quatre émetteurs, ce qui permet d'obtenir plus d'informations spatiales sur les objets. Cette diversité accrue améliore la capacité à localiser les cibles dans l'espace tridimensionnel, en réduisant les zones d'incertitude.

La configuration MIMO 4x2 offre un équilibre entre une résolution améliorée, une plus grande diversité des points de vue, et une complexité matérielle raisonnable. En doublant le nombre d'antennes réceptrices par rapport au MIMO 4x1, cette configuration permet d'améliorer la précision des images radar, tout en réduisant les artefacts causés par les réflexions multiples et les interférences. Les simulations basées sur cette configuration démontrent des améliorations notables dans la qualité des images reconstruites, ce qui en fait une solution attrayante pour des applications de haute précision dans des environnements complexes. Les émetteurs sont également positionnés en extrémité du carré et les deux récepteurs sont à l'intérieur comme montré dans la Figure III.2.

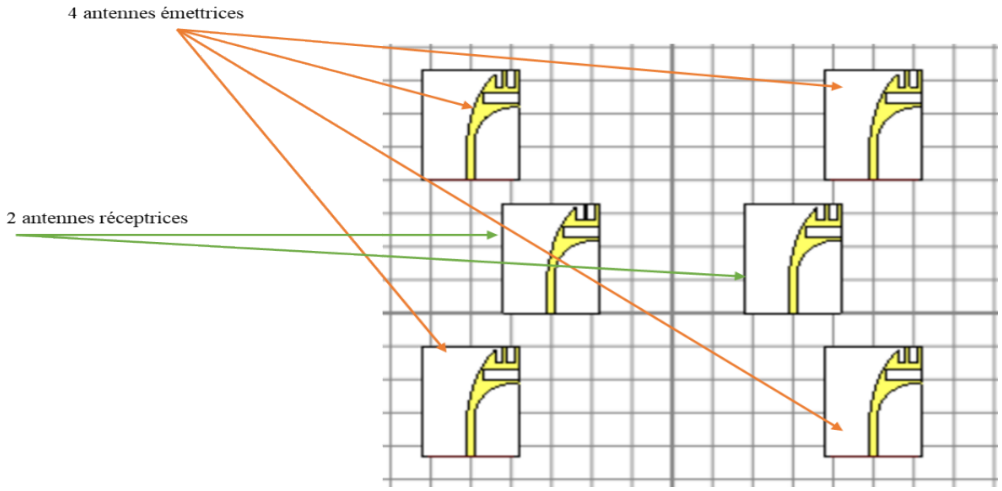


Figure III.2. Configuration 4x2

III.2.3 Réseau MIMO 4x3

La configuration **MIMO 4x3** poursuit l'amélioration de la qualité des images radar et de la précision des cibles détectées en ajoutant une troisième antenne réceptrice au réseau. Comme avec les configurations MIMO précédentes, l'ajout d'antennes réceptrices supplémentaires améliore la capacité à capturer des données spatiales plus complètes et à traiter efficacement les signaux réfléchis, surtout dans des environnements complexes comme l'imagerie à travers les murs. Trois antennes réceptrices captent les signaux réfléchis, augmentant ainsi le nombre de combinaisons possibles entre les antennes émettrices et réceptrices. Dans une configuration MIMO 4x3, le nombre de paires émetteur-récepteur passe à **12 paires**, comparé à 8 dans le MIMO 4x2 et à 4 dans le MIMO 4x1.

Cette augmentation de combinaisons permet de créer une matrice virtuelle d'antennes plus large, améliorant la capacité à analyser les signaux provenant de directions différentes.

L'ajout d'une troisième antenne réceptrice améliore la robustesse du système face aux défis posés par l'atténuation et les interférences, offrant une meilleure capacité à discriminer et localiser les objets derrière les obstacles. Bien que cela implique une complexité accrue en termes de traitement, les gains en termes de performances en valent la peine pour les applications exigeantes. Cependant, les avantages en termes de qualité d'image et de précision dans la localisation des objets justifient cette complexité accrue, surtout dans des situations où la résolution spatiale et la détection précise sont critiques.

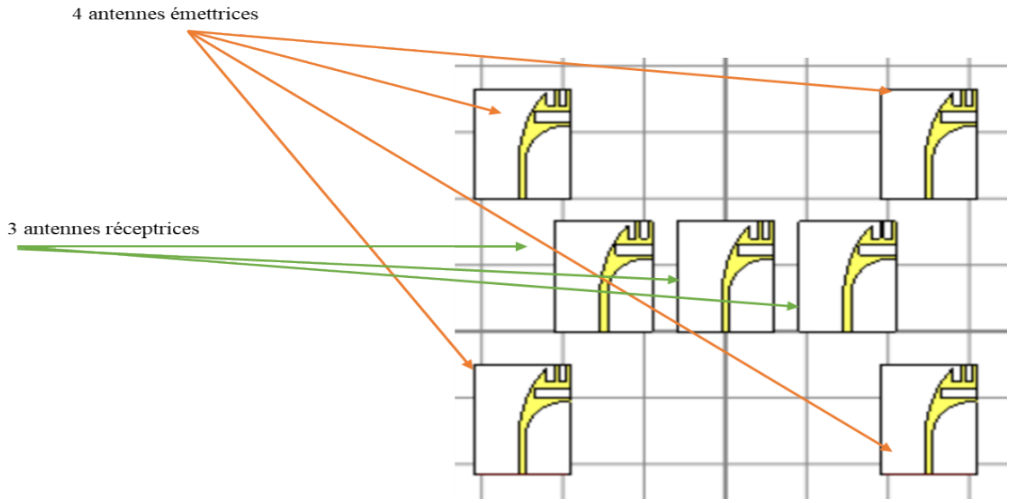


Figure III.3. Configuration 4x3

III.3 Algorithme d'imagerie

Après avoir conçu les réseaux antennaires du système radar micro-onde, nous allons procéder à l'étape d'imagerie utilisant l'algorithme de Back-Projection (BP). Cet algorithme décrit un processus consistant à focaliser les échos provenant des éventuelles cibles (réflecteurs) à leur position spatiale en fonction des temps d'arrivée et voire même à retrouver la forme physique de la cible. La zone à tester est divisée en une grille de pixels et pour chaque couple émetteur/récepteur, le temps de propagation aller-retour associé à chaque pixel est calculé. Le délai d'aller-retour est le temps nécessaire pour que le signal se propage de l'émetteur au pixel et soit renvoyé au récepteur. Les valeurs des signaux reçus à chaque antenne réceptrices –à ces valeurs de délai- sont additionnées pour obtenir la valeur d'intensité de chaque pixel, formant ainsi une image lorsque la procédure est répétée pour tous les pixels. Par conséquent, la réflectivité peut être écrite sous la forme intégrale suivante sur les ouvertures d'antenne d'émission et de réception :

$$F(c) = \int_{Pr} \int_{Pc} S(T, R, t - \tau - \tau')\, dPr\, dPc \qquad \textbf{(III-1)}$$

Où S est le signal reçu dans chaque antenne réceptrice (Rx) provenant des antennes émettrice (Tx). τ et τ' sont les temps mis pour parcourir les distances aller (Tx-objet) et retour (Rx-objet) respectivement [46].

III.4 Implémentation de l'algorithme d'imagerie

Après la conception des réseaux d'antennes et leurs simulations, nous allons exploiter les signaux reçus en les exportant et leur appliquant un prétraitement avant l'algorithme d'imagerie. Les Images sont reconstruites avec le logiciel MATLAB.

En premier lieu nous exportant les signaux en termes de coefficients de transmissions qui constituent le signal reçu par les antennes Rx émis par les antennes Tx (S_{ij}), où **i** étant l'indice de l'antenne réceptrice et **j** l'indice de l'antenne émettrice. Deux types de signaux seront exportés pour le même scenario à savoir sans la présence de la cible et avec la présence de la cible.

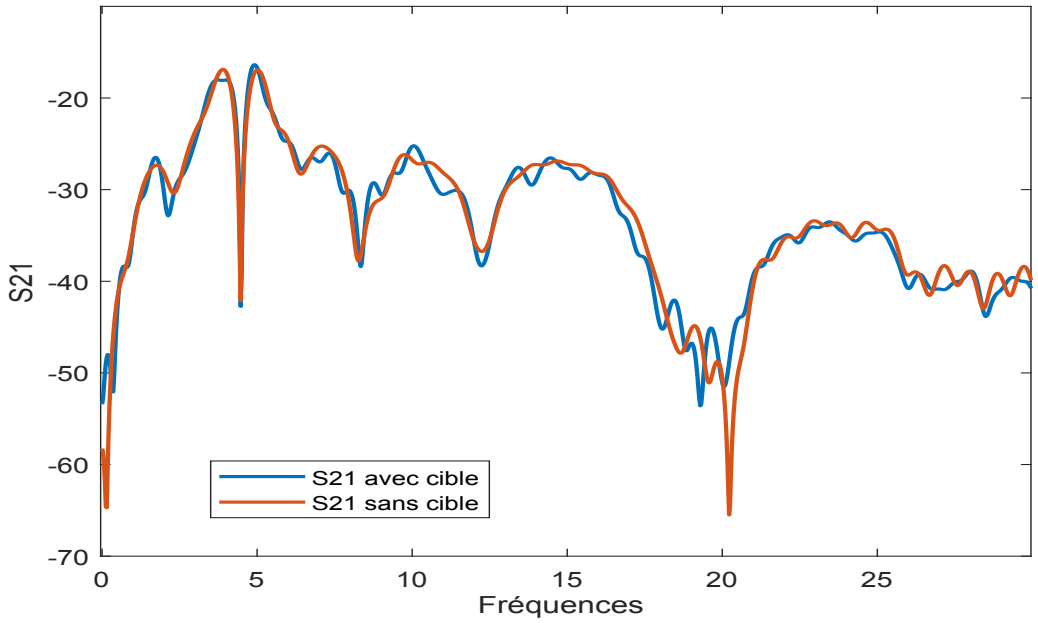


Figure III.4. Signaux Reçus d'une paire Tx/Rx avec et sans la cible.

Nous présentons dans la figure III.4 des signaux reçus (coefficient de transmission) d'une paire Tx/Rx dont nous constatant la différence entre les deux signaux assurant la présence d'un objet qui réfléchit le signal différemment.

Ensuite, Nous passons à former les matrices tridimensionnelles regroupant les signaux de toutes les paires Tx/Rx.

L'étape suivante concerne la calibration afin d'éviter toutes évaluation indésirable composantes de l'environnement ou provenant des antennes adjacentes et garder seulement la trace de la cible. La calibration consiste à soustraire les Signaux sans cible des Signaux avec cibles

Enfin, l'algorithme d'imagerie BP sera appliqué sur les signaux calibrés.

III.5 Résultats d'imagerie

La cible à détecter est placé devant le réseau d'antenne comme montré dans la figure III.5. Cette cible est de forme de parallélépipède de dimensions de (110 x 20 x 10) mm^3 selon les axes x, y, z respectivement. Elle a une permittivité relative de 50 simulant la permittivité générale du corps humain.

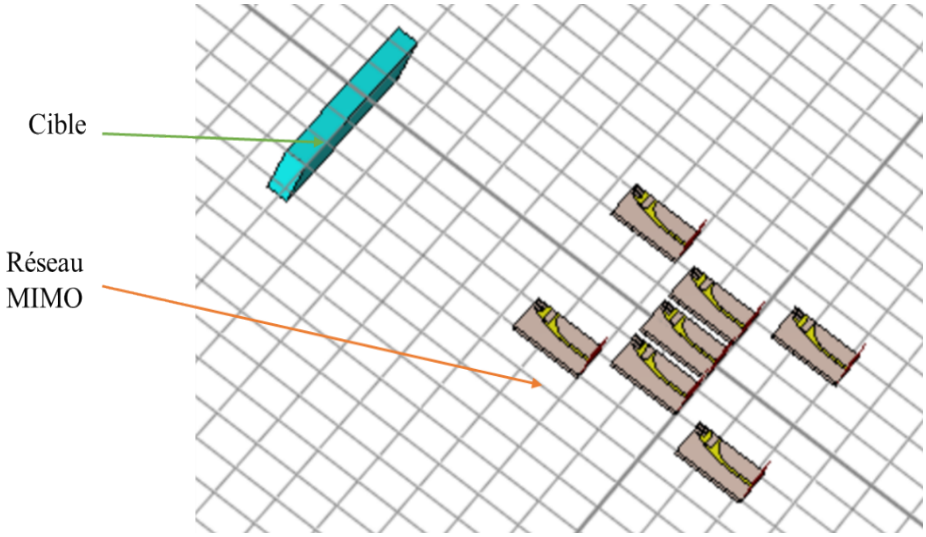


Figure III.5. Réseau avec cible

Les figures III.6, III.7 et III.8 présentent respectivement les résultats d'imagerie des trois réseaux 4x1, 4x2, 4x3.

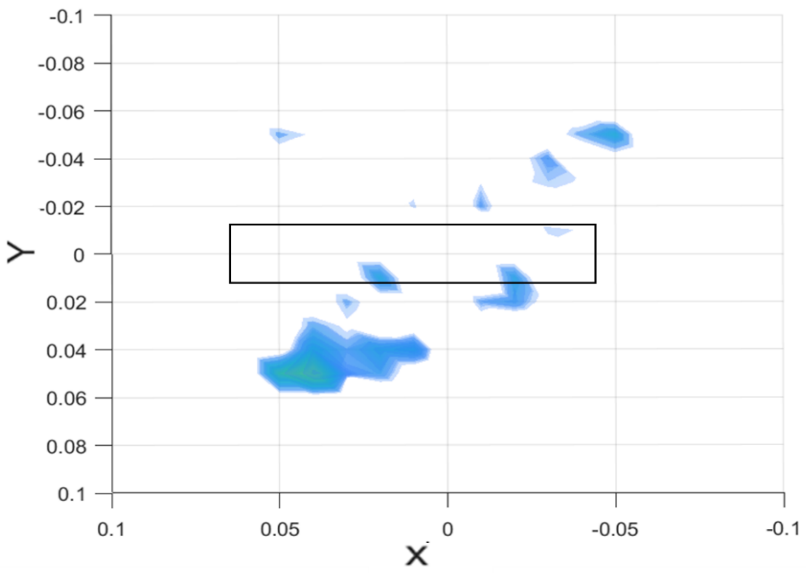


Figure III.6. Image reconstruite par le réseau 4x1

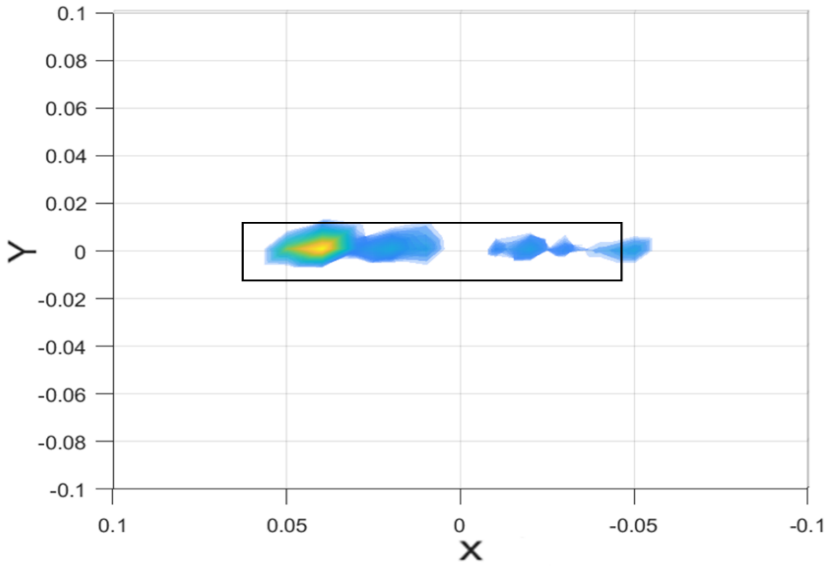


Figure III.7. Image reconstruite par le réseau 4x2

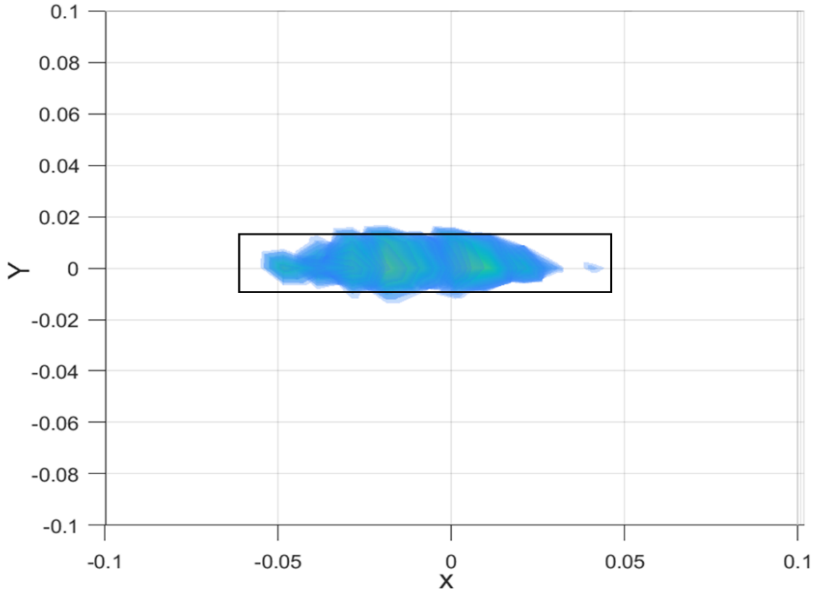


Figure III.8. Image reconstruite par le réseau 4x3

D'après les figures obtenues pour les trois réseaux proposés, nous constatons une que les trois réseaux détectent la cible. Cependant, pour le premier réseau la résolution angulaire et la capacité à localiser précisément les objets dans l'espace sont plus limitées dans un système MISO. Une seule antenne de réception peut rendre le système plus sensible aux interférences et aux réflexions multiples, ce qui pourrait affecter la qualité de l'image dans des environnements complexes. Pour le deuxième réseau, nous observant une amélioration dans l'image obtenue grâce à l'ajout d'une antenne réceptrice qui signifie d'ajout de quatre signaux de plus provenant des quatre émetteurs. Le réseau MIMO 4x3 révèle d'une précision accrue

dans l'image reconstruite grâce à son ouverture virtuelle qui résulte en 12 signaux distincts assurant ainsi une diversité spatiale.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différentes configurations des réseaux MISO et MIMO appliquées aux systèmes radar micro-onde. Les résultats de simulation montrent que les architectures MIMO, combinées à des algorithmes de traitement BP, offrent des améliorations significatives en termes de performance et de résolution. La configuration MIMO 4x3 montre une résolution améliorée comparée avec les autres configurations vue la diversité spatiale alloué avec le nombre d'antennes utilisé.

Conclusion et perspectives

L'imagerie par radar micro-onde représente une avancée technologique prometteuse dans le domaine de la vision à travers des matériaux opaques. Grâce à sa capacité à pénétrer divers milieux et à offrir des contrastes distincts entre les propriétés des matériaux, cette technologie s'impose comme une solution de choix dans des applications telles que la sécurité, la médecine, l'industrie et la détection non destructive. Au fil de cette thèse, nous avons exploré les éléments fondamentaux et les défis associés à la conception de systèmes d'imagerie micro-ondes, notamment à travers l'étude des architectures radar, des antennes imprimées et des techniques de traitement de signal.

Ce travail des radars micro-ondes, des architectures MIMO et ULB, et des antennes imprimées nous a permis de mettre en lumière les enjeux liés à l'amélioration de la résolution des images. Les résultats obtenus à travers les simulations montrent que des performances accrues peuvent être atteintes grâce à l'optimisation de ces paramètres, tout en maintenant une faible complexité et un encombrement réduit.

Toutefois, des défis subsistent, notamment en termes de temps de simulations et de traitement des données. Nos recherches ouvrent la voie à des innovations futures qui pourraient repousser les limites de l'imagerie par radar micro-onde.

Au cours de ce mémoire, nous avons donné dans le premier chapitre une vue générale sur les systèmes Radar, leur avantages, applications et différentes configurations. Combiné avec la technologie ULB, le radar améliore sa résolution à distance grâce à la diversité fréquentielle obtenue en utilisant un large spectre de fréquence, cette technologie est aussi abordée dans ce chapitre. La configuration MIMO offre par ailleurs une meilleure résolution azimutale grace à l'ouverture virtuelle que créent l'ensemble de ces antennes. Finalement, nous avons présenté les différents algorithmes d'imagerie.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté l'antenne Vivaldi ainsi que ses essentiels paramètres mais au préalable, nous donné une vue globale sur la définition théorique de l'antenne imprimée ainsi qu'une description des caractéristiques pour une meilleure compréhension.

Dans le chapitre trois, nous avons conçu différentes configurations du système antennaire à savoir 4x1, 4x2, 4x3 respectivement, ainsi nous avons exploré les résultats d'imagerie issus pour chaque configuration. La configuration MIMO 4x3 offre un compromis entre une complexité matérielle modérée et une résolution spatiale accrue. En utilisant trois antennes réceptrices, elle permet d'augmenter considérablement la quantité de données collectées, ce qui se traduit par une amélioration de la résolution des images radar et une gestion plus efficace des réflexions multiples. Ce système est particulièrement adapté aux environnements complexes et aux applications où une haute précision est requise, telles que la surveillance de haute sécurité, les opérations militaires ou les interventions d'urgence.

Ces avancées ouvrent des perspectives prometteuses dans des applications. Elles posent également les bases pour des recherches futures visant à affiner ces systèmes dans des environnements plus complexes, améliorant ainsi la précision et la résolution.

Certains défis subsistent, notamment la résolution angulaire qui pourrait être encore améliorée avec des configurations MIMO plus complexes, ou avec un réseau d'antennes plus dense. De plus, l'atténuation des signaux à travers des matériaux très épais reste un obstacle majeur, nécessitant l'optimisation des fréquences utilisées et élargir la bande vers les basses fréquences pour garantir une pénétration suffisante tout en préservant la qualité des images.

References

[1] D. Sheen, D. McMakin, and T. Hall, “Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 49, no. 9, pp 1581 –1592, sep 2001

[2] D. M. Sheen, D. L. McMakin, H. D. Collins, T. E. Hall, and R. H. Severtsen, “Concealed explosive detection on personnel using a wideband holographic millimeter-wave imaging system,” I. Kadar and V. Libby, Eds., vol. 2755, no. 1. SPIE, pp 503–513, 1996.

[3] I. G. Cumming and F. H. Wong, “Digital processing of synthetic aperture radar data”, Artech house, 2005.

[4] L. Chommeloux, “Application de l’imagerie micro-onde active à la détection d’objets enfouis dans un milieu homogène ou stratifié”, Thèse de doctorat, Université ParisSud 11, 1987.

[5] W. T. Joines, R. L. Jirtle, M. D. Rafal et D. J. Schaefer, “Microwave power absorption differences between normal and malignant tissue”, International Journal of Radiation Oncology Biology-Physics, vol 6, no.6, pp 681–687, 1980.

[6] J. Lewiner, “L’Imagerie du Corps Humain. Physique et Médecine”, Editions de physique, 1984.

[7] J. M. Elissalt, “Imagerie micoonde : reconstruction quantitative bidimensionnelle. Applications au domaine biomedical”, Thèse de doctorat, Université Paris- Sud 11, 1995.

[8] E. C. Fear, P. M. Meaney et M. A. Stuchly, “Microwaves for breast cancer detection”, IEEE Potentials, vol. 22, no. pp 12–18, 2003.

[9] P. M. Meaney, Q. Fang, M. W. Fanning, S. A Pendergrass, T. Raynolds, C. J. Fox et K. D. Paulsen, “Microwave breast imaging with an under-determined reconstruction parameter mesh”, In IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Nano to Macro, vol 2, pp 1369–1372, 2004.

[10] A. Abubakar, T.M. Habashy, P.M. van den Berg, D. Gisolf. “The Diagonalized Contrast Source Approach: an inversion method beyond the Born approximation”, Inverse Problems, Vol. 21, no. 2, pp 685-702, 2005

[11] P. Garreau, G. Cottard, P. Berthaud, E. Beaumont, et J.-C. Bolomey, ”Potentials of Microwave Tomographic Imaging for Online Detection of Landmines”, EUREL Int. Conf. on the Detection of Abandoned Land Mines, p. 164 -166, Édimbourg, Octobre 1996

[12] L. van Kempen, H. Sahli, "Ground Penetrating Radar Data Processing: A Selective Survey of the State of the Art Literature", Rapport technique IRIS-tr-0060, Département VUB-ETRO, 1999

[13] X. Derobert, C. Fauchard, P. Côte, E. Guillanton, “Performances de radars d'auscultation des chaussées sur des sites tests”, Bulletin des LCPC, vol. 230, pp 15-22, Février 2001

[14] E. Rmeili, T. Scullion, “Detecting Stripping in Asphalt Concrete Layers using Ground Penetrating Radar”, Transportation Research Record 1568, pp. 165-174, 1997

[15] A. Franchois, P. Lewyllie, L. Taerwe, “Evaluation non destructive du béton armé par imagerie microonde SAR”, GDR ondes /GT3 “Imagerie et inversion”, Paris, Octobre 2002

[16] R. Tarnus, X. Derobert, “Multifrequency Microwave Diffraction Tomography: Application to Ground Imagery by Transmission”, Oral Presentation in 8th Europ. Sec. of the Environmental and Engineering Society (EEGS-ES) , Aveiro, Septembre 2002

[17] J. Ferlay, I. Soerjomataram, et al. Cancer Incidence and Mortality Worldwide: IARC CancerBase No. 11. International Agency for Research on Cancer. 2013.

[18] M. ZITOUNI. et al. “Plan National Cancer", Edition & Publication ANDS, 2014.

[19] M. Adams, A. Anderson, “Synthetic Aperture Tomography Imaging for Microwave Diagnostics”, IEE Proc. Microwaves, optics and Antennas, vol. 129, pp 83-88, 1982d

[20] J.-C. Bolomey, A. Izadnegahdar, L. Jofre, C. Pichot, G. Peronnet, M. Solaimani, “Microwave Diffraction Tomography for Biomedical Application”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 30, pp1998-2000, 1982

[21] W. Chew, Y.-M. Yang, “Reconstruction of Two-Dimensional Permittivity Distribution using the Distorted Born Iterative Method”, IEEE Trans. on Medical Imaging, vol. 5, no. 2, pp 218- 225, Juin 1990

[22] N. Joachimowicz, C. Pichot, J.-P. Hugonin, “Inverse Scattering : an Iterative Numerical Method for Electromagnetic Imaging”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 39, no. 12, pp 1742-1752, Décembre 1991

[23] C. Dourthe, Tomographie microonde d’objets enterrés. Application à l’auscultation radar, Thèse de doctorat, École Centrale des Ponts et Chaussées, Septembre 1997

[24] I. Aliferis, Imagerie microonde d'objets enterrés: modélisations numériques bidimensionnelles et étude de l'extension tridimensionnelle, Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis et Université Technique Nationale d'Athènes, Décembre 2002

[25] E. Le Brusq, Imagerie microonde : influence de la polarimétrie du champ diffracté, Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Octobre 2003

[26] C. Dourthe, Tomographie microonde d'objets enterrés. Application à l'auscultation radar, Thèse de doctorat, École Centrale des Ponts et Chaussées, Septembre 1997

[27] M. Fink, "Time Reversed Acoustics", Physics Today, vol. 3, pp 34-40, 1997

[28] G. Micolau, Étude théorique et numérique de la méthode de la Décomposition de l'Opérateur de Retournement Temporel en diffraction électromagnétique, Thèse de Doctorat, Université d'AixMarseille, Juin 2001

[29] Z. Shen and N. C. Luhmann, "Millimeter-Wave Imaging", John Wiley & Sons, Ltd, pp. 651–707,2009.

[30] N. A. Salmon, J. Beale, S. Hayward, P. Hall, R. Macpherson, R. Metcalfe, and A. Harvey, "Compact and light-weight digital beam-forming passive millimetre-wave imagers", K. A. Krapels and N. A. Salmon, Eds., vol. 7117, no. 1. SPIE, pp 711709, 2008.

[31] S. Ahmed, A. Schiessl, and L.-P. Schmidt, "A novel fully electronic active real-time imager based on a planar multistatic sparse array", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, no. 12, pp 3567 –3576, dec. 2011.

[32] S. C Hagness, E. C. Fear et A. Massa, "Guest editorial, special cluster on microwave medical imaging", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp 1592–1597, 2012.

[33] P. M. Meaney, Q. Fang, M. W. Fanning, S. A Pendergrass, T. Raynolds, C. J. Fox et K. D. Paulsen, "Microwave breast imaging with an under-determined reconstruction parameter mesh", In IEEE International Symposium on Biomedical Imaging, Nano to Macro, vol. 2, pp 1369–1372, 2004

[34] M. Rosker and H. Wallace, "Imaging through the atmosphere at terahertz frequencies", in IEEE MTT-S International Microwave Symposium, pp 773 –776, 2007, june 2007.

[35] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data", Artech house, 2005.

[36] F. Gumbmann and L. Schmidt, "Millimeter-wave imaging with optimized sparse periodic array for short-range applications", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 10, pp 3629 –3638, oct. 2011.

[37] X. Zhuge and A. Yarovoy, "A sparse aperture mimo-sar-based uwb imaging system for concealed weapon detection", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 1, pp 509 –518, jan. 2011

[38] Federal Communications Commission(FCC). First report and order, revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems. Rapport n°ET Docket, pp 98 -153, 2002. Références bibliographiques 67

[39] ECC. Ecc decision of december 1st 2006 on the conditions for use of the radio spectrum by ground and wall probing radar (gpr/wpr) imaging systems. 2006.

[40] Zetik R. and Thoma R.S, "Monostatic imaging of small objects in uwb sensor Networks", Ultra-Wideband, ICUWB 2008, IEEE International Confe- rence, vol 2, pp 191-194, 2008.

[41] R. Appleby, "Passive millimetre–wave imaging and how it differs from terahertz imaging", Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 362, no. 1815, pp 379–393, 2004.

[42] R. A. Thompson and Et, Interferometry and synthesis in radio astronomy. Wiley Interscience, May 2001.

[43] J. Richter, D. Notel, F. Kloppel, J. Huck, H. Essen, and L.-P. Schmidt, "A multi-channel radiometer with focal plane array antenna for w-band passive millimeter wave imaging", in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2006., june 2006, pp. 1592–1595.

[44] K. Mizuno, H. Matono, Y. Wagatsuma, H. Warashina, H. Sato, S. Miyanaga, and Y. Yamanaka, "New applications of millimeter-wave incoherent imaging", in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005, pp 4, june 2005 .

[45] D. Liu, U. Pfeiffer, and J. Grzyb, "Advanced Millimeter-Wave Technologies", Antennas, Packaging and Circuits. J. Wiley & Sons, 2009.

[46] Djamila ZIANI, « Réseaux d'antennes MIMO ultra large bande pour syst_me radar micro-onde », thèse de doctorat en télécommunications, Université Tlemcen, 2019.