

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systèmes des Télécommunications**

Conception et réalisation d'une antenne multi-bande pour des applications GPR.

Présenté par :

FADHEL Choayb

REDJeL Islam

Sous la direction de :

KHALFALLAOUI Abderrezak

Juillet 2021

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, de nous avoir donnés la santé, le courage, la volonté de réaliser ce travail.

*C'est avec un grand honneur que nous remercions notre cher enseignant et promoteur, Docteur **Mr KHALFALLAOUI ABDERREZAK**, Pour nous avoir accepté de nous encadrés et pour nous avoir dirigés tout au long de la réalisation de ce travail, pour ses précieux conseils, sa patience et ses encouragements .*

Un très grand merci à nos très chers parents, pour le soutien et le courage

Merci aux membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'aider à faire des choix importants, et veillés à est ce que je ne manque de rien depuis ma tendre enfance, ils ont tout mis à ma disposition pour pouvoir étudier dans les meilleurs conditions possible, que Dieu les bénissent et que leurs vie soit longue.

A mes chers frères, mes grands-parents que j'aime beaucoup.
Tous mes oncles & tantes et leurs enfants.

A mes amis:

SOHAIB, ILYAS, ALLA, ISLAM, ABD EL WARETH, AYMEN,
OUSSAMA, SABRI, DJAMAL, ISHAK, KARIM, MERWAN,
AHMED RAMZI.
NACIR, ISLEM, FAYCEL, AMINE, HAKIM, ATAF.

A toutes mes amies de département avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

Résumé

Une nouvelle antenne patch planaire pour l'application de pénétration de sol (GPR) est présentée dans ce travail. L'antenne proposée peut fonctionner autour des deux bandes 800 MHz et 2 GHz. La simulation de l'antenne proposée a été réalisée à l'aide du logiciel Computer Simulation Technology (CST). Elle est imprimée sur un substrat FR-4 qui a une permittivité de 4.3, une épaisseur de 1.5 mm et une surface $9 \times 9 \text{ cm}^2$. Les résultats montrent que l'antenne proposée fonctionne entre les deux bandes 0.6-0.9 GHz et 1.8-2.1 GHz. De plus, l'antenne proposée peut fournir de bons diagrammes de rayonnement, un gain raisonnable et une efficacité de rayonnement élevée aux fréquences centrales de ces deux bandes. Le test de pénétrabilité réalisé prouve que le modèle de l'antenne réalisée peut être un bon candidat pour une application GPR.

Abstract

A new planar patch antenna for the ground penetration application (GPR) is presented in this work. The proposed antenna can operate around both 800 MHz and 2 GHz bands. The simulation of the proposed antenna was carried out using Computer Simulation Technology (CST) software. It is printed on an FR-4 substrate which has a permittivity of 4.3, a thickness of 1.5 mm and a surface area of $9 \times 9 \text{cm}^2$. The results show that the proposed antenna operates between the two bands 0.6-0.9 GHz and 1.8-2.1 GHz. In addition, the proposed antenna can provide good radiation patterns, reasonable gain and high radiation efficiency at the center frequencies of these two bands. The penetrability test performed proves that the model of the antenna produced can be a good candidate for a GPR application.

المخلص

تم تقديم هوائي التصحيح المستوي الجديد لتطبيق اختراق الأرض (GPR) في هذا العمل. يمكن للهوائي المقترح أن يعمل حول النطاقين 800 ميغاهرتز و 2 جيجاهرتز. تم إجراء محاكاة الهوائي المقترح باستخدام برنامج تكنولوجيا محاكاة الكمبيوتر (CST) وهي مطبوعة على ركيزة FR-4 بسماحية 4.3 وسماكة 1.5 مم ومساحة سطح 9x9 سم². أظهرت النتائج أن الهوائي المقترح يعمل بين النطاقين 0.6-0.9 جيجاهرتز و 1.8-2.1 جيجاهرتز. بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن يوفر الهوائي المقترح مخططات إشعاع جيدة وكسبًا معقولًا وكفاءة إشعاع عالية عند الترددات المركزية لهذين النطاقين. يثبت اختبار النفاذية الذي تم إجراؤه أن نموذج الهوائي المنتج يمكن أن يكون مرشحًا جيدًا لتطبيق GPR.

Table des matières

Remerciement

Résumé	I
Abstract	II
المخلص	III
Introduction générale	IX

Chapitre 1 : état de l'art sur le GPR.

1.1	Introduction	1
1.2	Radar GPR (Ground Penetrating Radar)	1
1.3	Le principe de fonctionnement	2
1.4	Les différents types de radar GPR	3
1.4.1	Radar impulsionnel	3
1.4.2	Radar à modulation linéaire de fréquence	4
1.4.3	Radar à saut de fréquence.....	5
1.4.4	Autre méthodes	6
1.5	Les applications du radar GPR	6
1.6	Performance du radar GPR.....	8
1.6.1	Bilan de liaison.....	8
1.6.2	Dynamique du radar GPR	10
1.6.3	Rapport signal sur bruit	10
1.6.4	Résolution en profondeur	10
1.7	Les différents modes d'acquisitions	11
1.7.1	Mode réflexion	12
1.7.2	Mode transmission	13
1.8	Radars commercialisés	14
1.8.1	Radar GPR RAMAC	14
1.8.2	Radar pulse EKKO.....	16



1.9	Conclusion	17
-----	------------------	----

Bibliographie

chapitre 2: généralités sur les antennes.

2.1	Introduction	20
2.2	Généralité sur les antennes	20
2.3	Caractéristiques des antennes	20
2.3.1	Diagramme de rayonnement	20
2.3.2	Le coefficient de réflexion (S₁₁) (adaptation)	21
2.3.3	Gain	22
2.3.4	Directivité	22
2.3.5	Le rendement	22
2.3.6	L'impédance d'entrée	23
2.3.7	La bande passante (BP)	23
2.3.8	Angle d'ouverture	24
2.4	Type des antennes	25
2.5	Antenne imprimée (patch)	26
2.6	Avantages et inconvénients des antennes imprimées	27
2.7	Les applications des antennes Patch	28
2.8	Les antennes utiliser dans le GPR	28
2.8.1	Antenne papillon	28
2.8.2	Antenne Vivaldi	29
2.8.3	Antenne Corne.....	29
2.8.4	Antennes à spirale logarithmique	30
2.8.5	Antenne planaire	31
2.9	Conclusion	31

Bibliographie

chapitre 3: Simulation et mesures d'une antenne GPR.

3.1	Introduction	35
3.2	Logiciel de simulation CST Studio Suite	35
3.3	Description générale de l'interface CST :	36
3.4	Description de l'antenne de base	36
3.5	Les étapes de conception	37
3.6	Etude paramétrique.....	39
3.6.1	Effet de largeur de la ligne de patch(Hs) :	39
3.6.2	Effet de longueur de la ligne de patch(Ls)	40
3.7	Dimensionnement de l'antenne optimisée.....	41
3.8	Réalisation et mesure expérimentale	41
3.8.1	Description du matériel et réalisation.....	41
3.9	Mesures expérimentales	44
3.9.1	Mesure de coefficient de réflexion S11.....	44
3.9.2	Mesure du diagramme de rayonnement	45
3.9.3	Test de la pénétration de l'antenne GPR	48
3.10	Conclusion	51

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1: Schéma de principe d'un Radar GPR basique.....	2
Figure 1.2: Exemple d'un tracé géoradar (à gauche) et le radargramme associé (à droite).....	3
Figure 1.3: Signal émis par un radar impulsif.....	4
Figure 1.4: Principe de la modulation de fréquence FMCW.....	5
Figure 1.5: Evolution de la fréquence en fonction du temps pour un Radar GPR à saut de fréquence.....	6
Figure 1.6: Technique de sondage par géoradar.....	7
Figure 1.7: Schéma de principe de mesure d'un radar.....	9
Figure 1.8: Variation de la résolution spatiale en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la permittivité.....	11
Figure 1.9: Mode réflexion à offset constant. Le profil radar s'obtient en déplaçant les antennes le long d'une ligne horizontale.....	12
Figure 1.10: Mode CMP. La distance entre les antennes augmente le long du profil du radar.....	13
Figure 1.11: Mode transmission. Pour chaque position de l'antenne émettrice, une série de mesures est effectuée en déplaçant l'antenne réceptrice.....	14
Figure 1.12: Radar RAMAC monté sur le chariot RAMAC GPR SCART.....	15
Figure 1.13: Unités de contrôle CU2 (à droite) et X3M (à gauche).....	15
Figure 1.14: RAMAC Monitor XV11.....	16
Figure 1.15: Radar GPR pulse EKKO 1000.....	17

Chapitre 2

Figure 2.1: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.....	21
Figure 2.2: Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.....	24
Figure 2.3: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.....	24
Figure 2.4: Types des antennes.....	26
Figure 2.5: Présentation d'une antenne patch microruban.....	26
Figure 2.6: Formes des éléments rayonnants.....	27
Figure 2.7: Conception d'antenne papillon.....	28
Figure 2.8: Une antenne Vivaldi.....	29

Figure 2.9: Une antenne cornet.	30
Figure 2.10: Une antenne spirale.	31
Figure 2.11: Une antenne plane.	31
Chapitre 3	
Figure 3.1: l'interface du CST studio.	36
Figure 3.2: les paramètres de l'antenne de base.	37
Figure 3.3: S11 pour différentes largeur de ligne.	39
Figure 3.4: S11 pour différentes longueur de ligne.	40
Figure 3.5: Dimensionnement d'antenne.	41
Figure 3.6: la machine ProtoMap S103.	42
Figure 3.7: l'antenne réalisée.	43
Figure 3.8: Simulation après la modification de connecteur SMA.	43
Figure 3.9: ZNB 20-VECTOR NETWORK ANALYSER.	44
Figure 3.10: Comparaison entre le S11 simulé et mesuré.	45
Figure 3.11: Banc de mesure de diagramme de rayonnement.	46
Figure 3.12: Les diagrammes de rayonnement simulées.	48
Figure 3.13: Banc de test de pénétration.	49

Liste des tableaux

Tableau 1: Les étapes de conception.	38
Tableau 2: les différents paramètres d'antenne.	41
Tableau 3: Diagramme de rayonnement en plan E.	46
Tableau 4: Diagramme de rayonnement en plan H.	47
Tableau 5: les valeurs de puissance pour différentes distances.	50

Liste des acronymes

GPR : Ground Penetrating Radar.

UHF : Ultra Haute Fréquence.

RADAR : RAdio Détection And Ranging.

GSSI : Geophysical Survey Systems Inc.

FMCW :Frequency Modulation Continuous Wave.

CMP : Common Mid Point.

WARR : Wide Angle Reflection and Refraction.

SNR : Signal to Noise Ratio.

BP : Bande Passante.

UWB : Ultra WideBand.

FIT : Finite Integration Technic.

Introduction générale

Le Ground Penetrating Radar, appelé GPR (Ground Penetrating Radar), est une méthode électromagnétique, basé sur la réflexion d'ondes électromagnétiques, principalement utilisée pour l'auscultation souterraine à des fins géophysiques, et plus tard en géotechnique et en génie civil. Elle permet d'imager le sous-sol à des profondeurs allant de plusieurs mètres à quelques kilomètres suivant les gammes de fréquence s'échelonnant de quelques MHz à quelques GHz. Ces dernières années, le géoradar a été largement utilisé dans la recherche proche de la surface en raison de sa vitesse d'acquisition, de ses caractéristiques non destructives et des excellentes capacités de résolution obtenues en reconnaissance de terrain peu profond.

L'un des composants matériels les plus importants pour les performances du radar à pénétration de sol (GPR) est le système d'antenne. Différents types d'antennes peuvent être utilisés dans un système radar pour fonctionner sur une large gamme de fréquences. Les antennes imprimées présentent des avantages attrayants tels qu'un petit volume, un profil très bas, un poids léger, une fabrication facile et des diagrammes de rayonnement directionnels constants, qui ont été largement utilisés dans la conception d'antennes miniaturisées.

La bande ultra haute fréquence (UHF) est très prometteuse pour le développement de radars à pénétration de sol (GPR) et de systèmes d'imagerie à travers les murs. En fait, à ces fréquences, les ondes électromagnétiques peuvent pénétrer le sol et les matériaux de construction.

Le but de ce mémoire est de concevoir une nouvelle géométrie d'antenne patch planaire qui fonctionne dans la bande UHF pour les applications du GPR en utilisant le simulateur électromagnétique CST Microwave Studio.

Pour atteindre notre objectif, le présent travail est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur le géoradar (GPR). Ce chapitre s'ouvre sur une définition sur le terme radar GPR, leur principe de fonctionnement et les différents types et les applications de ce radar, ainsi que leurs performances finiront ce chapitre par les différentes modes d'accusation de ce système.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur les antennes. Au début on cite les caractéristiques des antennes et ces différents types. Ensuite, une partie basée sur les antennes imprimées, leurs avantages et inconvénients est présentée. Complétons ce chapitre par les antennes utilisées dans GPR.



Le troisième chapitre est consacré à la simulation, la réalisation et la caractérisation de notre antenne. Premièrement, ce chapitre présente le logiciel de simulation CST studio 2018, ensuite les différentes modifications qui se sont produites sur l'antenne avec leurs résultats de simulation sont illustrés, ce qui a permis de choisir le modèle final de notre structure d'antenne. Finalement l'antenne est réalisée par la méthode à gravure mécanique puis plusieurs mesures expérimentales (S_{11} , diagramme de rayonnement, tests de pénétration) sont effectuées.



Chapitre 1

Etat de l'art sur le GPR

1.1 Introduction

Le radar GPR (Ground Penetrating Radar) est un outil de sondage non destructif et performant permettant l'exploitation du sous-sol visant à étudier la composition et la structure de ce dernier. Son principe repose sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec les hétérogénéités du milieu.

Dans ce chapitre, va être présenté le contexte général de cette thèse. Nous allons, dans un premier temps, donner une description générale sur le principe de fonctionnement du GPR. Ses techniques de modulation et ses principales applications dans divers domaines. On va aussi évoquer la théorie de l'électromagnétisme et les différents types du GPR et leur performance et leur différent mode d'accusation.

1.2 Radar GPR (Ground Penetrating Radar)

Le radar géologique (ou Ground Penetrating Radar) est une méthode d'investigation et de prospection géophysique du proche sous-sol rapide et non destructive, basée sur la propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques permettant d'imager la structure du sous-sol selon les contrastes des paramètres diélectriques (permittivité diélectriques et conductivité électrique). Il permet de faire un sondage du sous-sol jusqu'à des profondeurs parfois importantes. L'utilisation des hyperfréquences fait du radar géologique un outil de prospection géophysique. Sa large gamme de fréquence de sondage liée à sa nature non destructive et à sa facilité de mise en œuvre, ont permis de lui trouver un grand nombre d'applications tant dans le domaine du génie civil qu'en géologie [1]. Grâce à son caractère non destructif, ses applications sont en constante progression. Cet outil géophysique peut être utilisé directement sur la surface du sol comme dans les puits de forages ou encore depuis un satellite. C'est l'un des meilleurs outils d'imagerie du sous-sol pouvant atteindre une résolution de l'ordre du centimètre. Le radar sol a connu depuis une trentaine d'années une évolution considérable. Les premières références de l'utilisation des impulsions électromagnétiques comme outil d'investigation, remontent aux années 20, sous la forme de brevets allemands mais ce n'est que pendant la seconde guerre mondiale que furent développés les premiers RADARs (Radio Détection and Ranging) basés sur les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques à des fréquences élevées. Cependant, dans les années 70, les premières utilisations du radar sol était strictement militaire, concernaient la détection de tunnels en Corées et très vite la détection de mines anti-personnelles. Les premiers géoradars commerciaux furent proposés en 1974 par

la compagnie Geophysical Survey Systems Inc (GSSI). La technique des GPR a été depuis abondamment utilisée par les ingénieurs dans le domaine civil à partir des années 70. Toutefois, les premiers géoradars autorisant des prospections performantes n'ont été commercialisés qu'au début des années 90. Depuis, le nombre d'utilisateurs de cette technique n'a cessé de croître, et les géoradars de surface sont aujourd'hui employés dans des domaines d'application très variés s'étendant jusqu'aux applications spatiales.

1.3 Le principe de fonctionnement

Le radar GPR usuel est décrit par le schéma de principe de la Figure 1.1 [1]. Il consiste à disposer de deux antennes, une antenne d'émission et une pour la réception. Ces antennes sont connectées respectivement à une source et à un système d'acquisition qui est relié à un outil de traitement et de visualisation (ordinateur portable) en temps réel.

Une onde électromagnétique est rayonnée en direction du sol via l'antenne d'émission en contact ou pas avec le sol (mais le plus souvent à une distance très proche du sol pour favoriser le rayonnement dans l'axe de l'antenne et augmenter le couplage entre antenne et sol), des échos réfléchis par un obstacle ou contrastes provenant d'objets enterrés, des interfaces entre couches du sous-sol, un changement de milieu, sont récupérés par le système de réception (antennes, capteurs, unité de traitement).

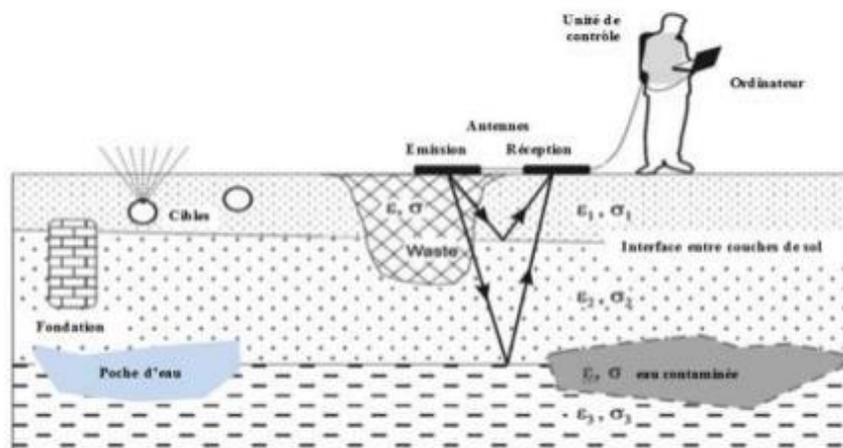


Figure 1.1: Schéma de principe d'un Radar GPR basique.

Cette opération est répétée plusieurs fois et sur tout le long de la zone auscultée. Les ondes réfléchies par le ou les obstacle(s) constituent un ensemble de tracés qui, une fois traités permettent d'obtenir une image appelée radargramme dont un exemple sans dimension est montré à la Figure 1.2.

Les radars GPR sont généralement large bande, les bandes utilisées sont incluses dans l'intervalle [10MHz -10GHz] et sont souvent sur plusieurs décades. Il existe cependant deux grandes familles de radars GPR ; le Radar GPR impulsionnel et les radars GPR harmoniques comme le GPR FMCW (Frequency-Modulation Continuous Wave) [2] et le Radar à saut de fréquences.

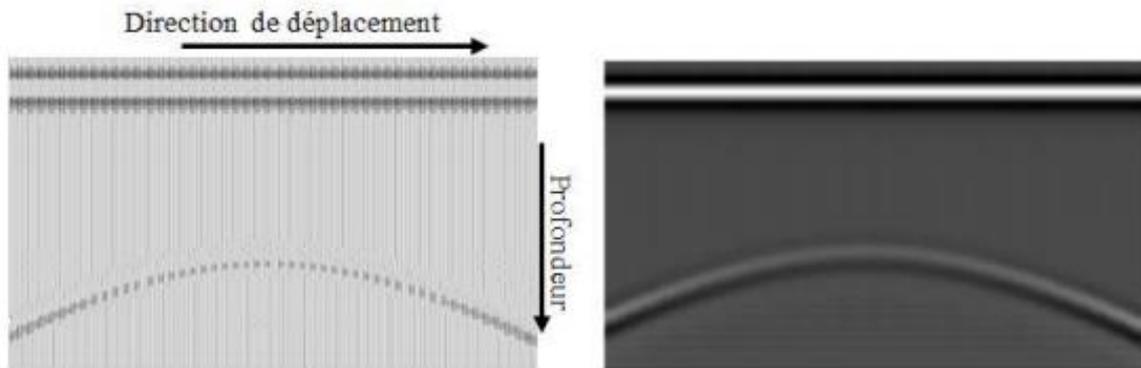


Figure 1.2: Exemple d'un tracé géoradar (à gauche) et le radargramme associé (à droite).

1.4 Les différents types de radar GPR

Le radar GPR peut utiliser plusieurs types de signaux. Chaque signal a ses caractéristiques, ses avantages et ses inconvénients. Tout dépend du type d'utilisation et du milieu dans lequel le radar est utilisé pour effectuer le sondage. Il faut toujours faire un compromis entre les performances, l'encombrement, la facilité d'utilisation, le coût. Le radar le plus souvent utilisé est le radar impulsionnel qui émet des impulsions ultra courtes.

1.4.1 Radar impulsionnel

Parmi les différentes méthodes de modulation utilisées en radar de surface, la méthode impulsionnelle est la plus répandue. Elle nécessite l'utilisation d'interrupteurs radiofréquences large bande et une forte puissance afin d'émettre des impulsions de courte durée (inférieures à 1 nanoseconde). Les transistors à avalanche permettent de générer des impulsions inférieures à 600ps et plusieurs Watts de puissance moyenne. L'acquisition est le point le plus délicat puisqu'il faut généralement échantillonner à quelques Giga Hertz. Ceci est réalisé par des convertisseurs « Flash » pouvant numériser le signal jusqu'à $2 \cdot 10^9$ échantillons par seconde, mais uniquement sur 8 bits. Pour compenser la faible dynamique, un amplificateur à gain

variable dans le temps est généralement introduit devant le système d'acquisition afin de compenser le faible niveau des échos lointains.

Le principal avantage de cette méthode est la simplicité de la structure des systèmes. De plus, elle mesure directement la réponse impulsionnelle sans traitement complémentaire. Enfin, ces systèmes sont rapides et très bien adaptés aux applications embarquées. Cependant, outre la complexité de l'étage amplificateur à gain variable lorsqu'on s'intéresse à des objets faiblement enterrés, le comportement des antennes à une impulsion de courte durée est la principale difficulté. En effet, on utilise une distribution de charge le long des antennes pour réduire les effets de « ringing », mais au détriment du rendement. De plus, il n'est pas envisageable d'utiliser des antennes indépendantes de la fréquence dont on ne peut corriger, dans ce cas, les dispersions de phase. Enfin, comme la bande d'analyse est large, cette méthode est sensible au bruit (figure1.3).



Figure 1.3: Signal émis par un radar impulsionnel.

1.4.2 Radar à vobulation linéaire de fréquence

Les radars FMCW « frequency modulated-continuous wave » dont la spécificité est de produire un signal dont le spectre varie dans le temps, et ainsi d'adapter de manière dynamique la résolution pour différents types de cible à différentes profondeurs. Ainsi, on obtient un signal FMCW, ou encore appelé (chirp), c'est-à-dire une sinusoïde modulée en fréquence (Figure 1.4).

Par rapport au simple procédé par radar impulsionnel, l'utilisation du radar FMCW a plusieurs avantages du fait qu'il garantit un bon rapport signal sur bruit. Il est multiplié par le rapport de compression $T*B$ avec $B=FH-FB$. D'autre part la puissance émise est réduite puisqu'elle est divisée par ce rapport. En outre cette méthode offre une meilleure résolution proportionnelle à la largeur de bande du signal hyperfréquence. De même, la phase du signal de sortie est

complètement maîtrisée. Un autre avantage est la rapidité de ce système puisque la vitesse de changement de fréquence est très rapide [3].

Cependant, ce système est complexe du fait du type de synthétiseur utilisé et les exigences que demande cette technique concernant la linéarité du balayage de fréquence et la reproductibilité de ce balayage qui fait appel à une correction de linéarité par un système électronique spécifique. En outre, la dynamique de ce système est limitée du fait que le radar émet en même temps qu'il reçoit ce qui produit un couplage entre les antennes.

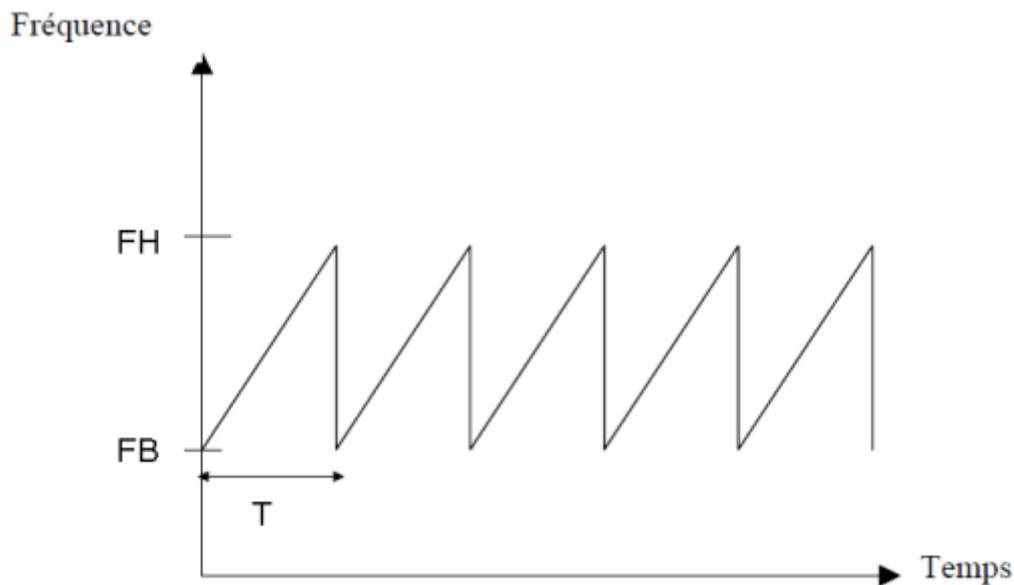


Figure 1.4: Principe de la modulation de fréquence FMCW.

1.4.3 Radar à saut de fréquence

Le radar GPR à saut de fréquences est une évolution du radar FMCW. Son principe repose sur un balayage d'une large gamme de fréquence suivant une évolution par palier Δf comme l'illustre la Figure 1.5[4]. Pour ce type de modulation, la puissance émise est alors réduite et la réception est réalisée en bande étroite. Cette technique de modulation a pour effet la réduction du bruit mais aussi la diminution de la vitesse d'échantillonnage.

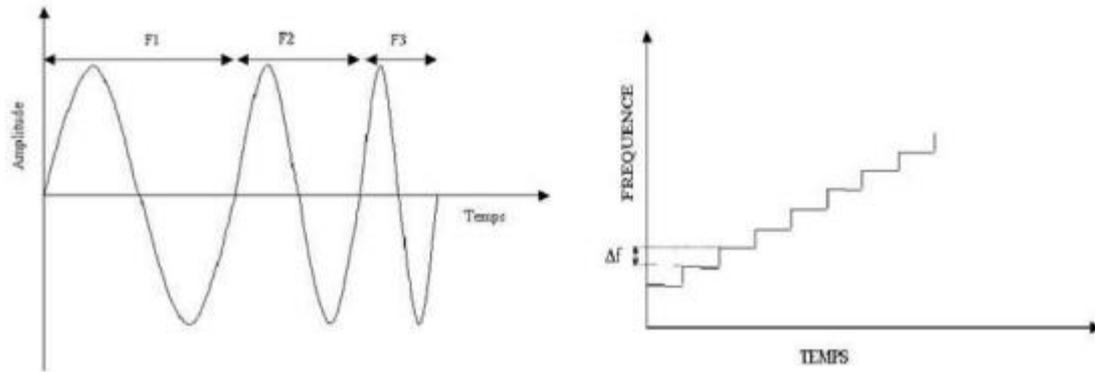


Figure 1.5: Evolution de la fréquence en fonction du temps pour un Radar GPR à saut de fréquence.

Son principal avantage est de pouvoir mieux assurer l'échantillonnage des mesures pour chaque fréquence du balayage de manière à corriger des effets gênants comme l'atténuation du sol ou encore les réponses des antennes.

1.4.4 Autre méthodes

De nombreuses autres techniques de modulation ou de traitement appliquées au GPR sont utilisées. On peut trouver, par exemple, l'utilisation de la modulation de phase par un code [5] ou encore la modulation par le bruit [6]. Enfin, il existe aussi des techniques mono-fréquentielles comme les radiomètres [7] ou des méthodes holographiques.

1.5 Les applications du radar GPR

Les systèmes GPR permettent d'obtenir des images très précises et détaillées du sous-sol sondé (Figure 1.6). En fait, dans l'analyse de sous-sols par méthodes de sondage non destructif, ces systèmes ont pris une place importante ces dernières années en vue d'applications dans des domaines aussi variés que le génie civil ou le spatial.

- Les GPR sont utilisés actuellement l'exploration minérale et dans des secteurs toujours plus variés. Dans le secteur de la construction, les GPR permettent d'établir en quelques minutes le profil souterrain où par exemple des conduites d'eau ou de gaz, des lignes électriques ou tout autre objet enfoui peuvent être clairement identifiés et localisés. Dans le secteur de l'entretien des routes, ils permettent de contrôler l'état de la chaussée. Les GPR sont également utilisés dans la construction des tunnels où il s'agit d'identifier la nature des roches à percer et d'éviter des accidents majeurs.

- Les GPR sont prisés par les géologues dans leur travail quotidien mais également par les paléontologues à la recherche de fossiles enfouis parfois sous plusieurs mètres de sable ou d'argiles ou encore par les archéologues [8]-[9] (localisation de vestiges archéologiques, système de galeries et de tunnels a été trouvé sous le Sphinx et les pyramides en Egypte).
- Les GPR sont toujours plus utilisés également dans le secteur des sciences criminelles où ils permettent de retrouver des cadavres ou des armes enfouies. Les GPR peuvent être d'une très grande utilité dans le cas des catastrophes naturelles telles que tremblement de terre, éboulement, avalanche ou encore d'attentats terroristes comme celui de septembre 2001 à New York afin de retrouver des survivants ensevelis.
- Finalement, un des secteurs où les GPR sont très utiles est le domaine du déminage. En fait, La multiplication des conflits de par le monde a eu pour principale conséquence de disperser des millions de mines antipersonnel qui mettent en danger la vie des populations et constituent un empêchement au développement économique des régions concernées. On estime dans le monde à plus de 100 millions le nombre de mines anti-personnelles enfouies et provoquant la mort ou la mutilation d'un humain toutes les 20 minutes. Dans ce cas le GPR s'avère un outil très prometteur dans la détection de ces mines [10],[11].

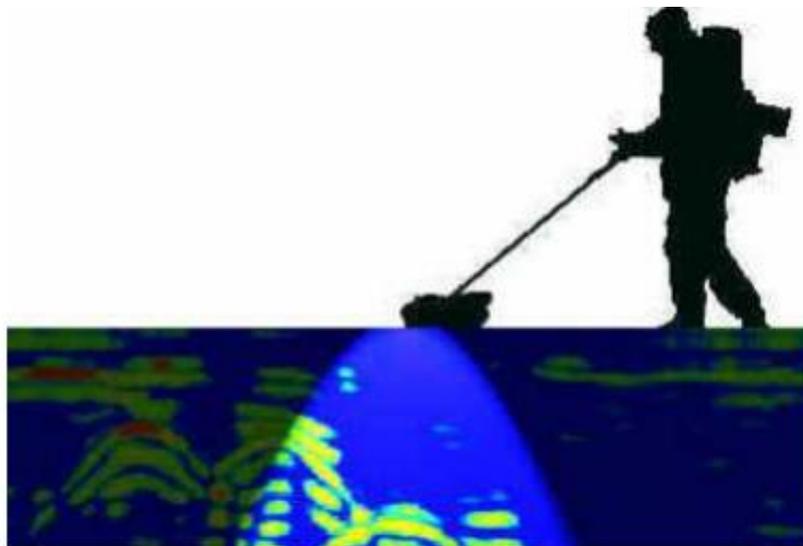


Figure 1.6: *Technique de sondage par géoradar.*

1.6 Performance du radar GPR

Le radar GPR peut-être caractérisé par ses performances telles que sa profondeur maximale d'investigation et sa résolution. Ces paramètres techniques importants permettent à l'utilisateur de faire son choix en fonction de l'application désirée. Toutefois, les performances du radar peuvent être altérées en fonction du type de milieu diélectrique sondé. Selon l'application à laquelle le radar GPR sera destiné, l'utilisateur favorisera soit la profondeur maximale, soit une résolution optimale. De nombreuses études comparatives [12] ont été menées afin d'estimer les performances radar [13] [14] [15] de divers systèmes en fonction du type d'application et donc de guider le manipulateur dans le choix du système le plus approprié.

1.6.1 Bilan de liaison

Le bilan de liaison d'un système radar GPR est établi à partir de l'équation liant la puissance émise à la puissance reçue appelée 'équation radar'. L'équation d'un radar classique est donnée par une relation établie par Skolnik [16].

Eq1 :

$$\frac{|V_r(f)|^2}{Z_g} = P_r(f) = \frac{P_e(f)G_e(f)S(f)}{4\pi R_e^2} \frac{A_{er}(f)}{4\pi R_r^2}$$

- P_e : désigne la puissance émise,

- G_e : représente le gain de l'antenne d'émission

- S : correspond à surface équivalente radar de la cible

- A_{er} : représente l'aire efficace de l'antenne de réception,

- R_e : désigne la distance entre antenne émission et cible.

- R_r : représente la distance entre cible et antenne de réception.

- Z_g : impédance du générateur,

- V_r : tension reçue au pied de l'antenne de réception, le module de la tension reçue s'écrit:

Eq2 :
$$|V_r| = \frac{\sqrt{Z_0}}{4\pi R_e R_\gamma} \sqrt{P_e(f) G_e(f) S(f) A_{er}(f)}$$

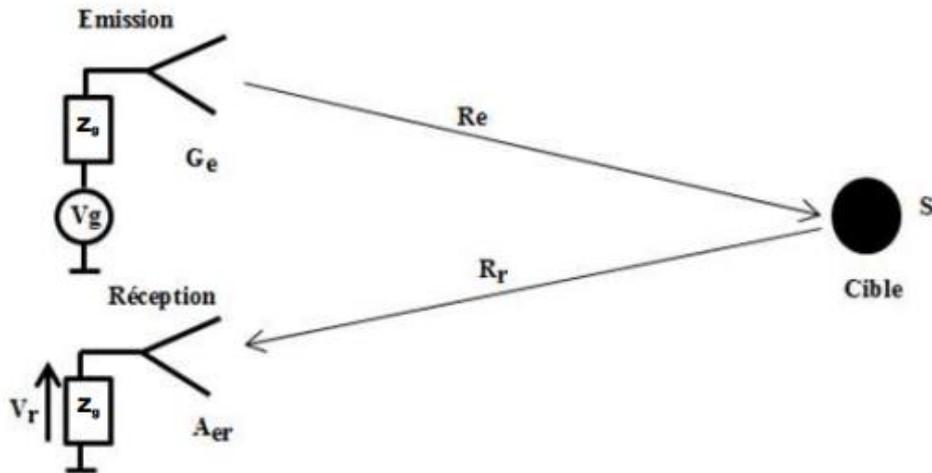


Figure 1.7: Schéma de principe de mesure d'un radar.

L'aire efficace de l'antenne de réception est définie en fonction du gain et de la longueur d'onde par la relation suivante.

Eq3 :

$$A_{er}(f) = \frac{G_r(f)}{4\pi} \lambda^2$$

Où

- G_r : représente le gain de l'antenne de réception

- λ : désigne la longueur d'onde.

Ce qui conduit pour l'équation radar à :

Eq4 :

$$P_r(f) = \frac{P_e(f) G_e(f) G_r(f) \lambda^2 S(f)}{(4\pi)^3 R_e^2 R_\gamma^2}$$

1.6.2 Dynamique du radar GPR

La dynamique du système est le rapport entre la puissance maximale P_{\max} émise par l'antenne de réception et la puissance du bruit au niveau du récepteur P_{\min} . Ce paramètre est donné en dB.

Eq5 :

$$SP = 10\log_{10}\left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right)$$

La dynamique du système est un paramètre important qui caractérise la performance du radar.

1.6.3 Rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit désigne la qualité d'une transmission d'information par rapport aux parasites. Ce terme désigne le rapport entre la puissance moyenne du signal et celle du bruit. Cependant le bruit peut avoir plusieurs sources :

- Sources externes générées en dehors du système,
- Sources internes dues à des phénomènes microscopiques aléatoires.

Les radars doivent pouvoir plus ou moins ignorer ces sources de signaux parasites, afin de se focaliser uniquement sur les cibles intéressantes. La capacité d'un radar à surmonter ces nuisances définit son rapport signal sur bruit (SNR). Plus le SNR est grand, plus le radar peut séparer efficacement une cible des signaux parasites [17].

1.6.4 Résolution en profondeur

La résolution en profondeur r [m] est définie comme étant la distance minimale entre deux cibles pour que ces dernières apparaissent distinctes sur un radargramme.

Eq6 :

$$r = \frac{v}{2B}$$

Avec :

- v : la vitesse de propagation dans le milieu
- B la largeur de bande à mi-hauteur du signal reçu
- f_c la fréquence d'utilisation

Dans la plupart des cas, les systèmes radars sont conçus tel que $B \sim f_c$:

Eq7 :

$$r = \frac{3.10^8}{\sqrt{\epsilon_r} 2 f_c}$$

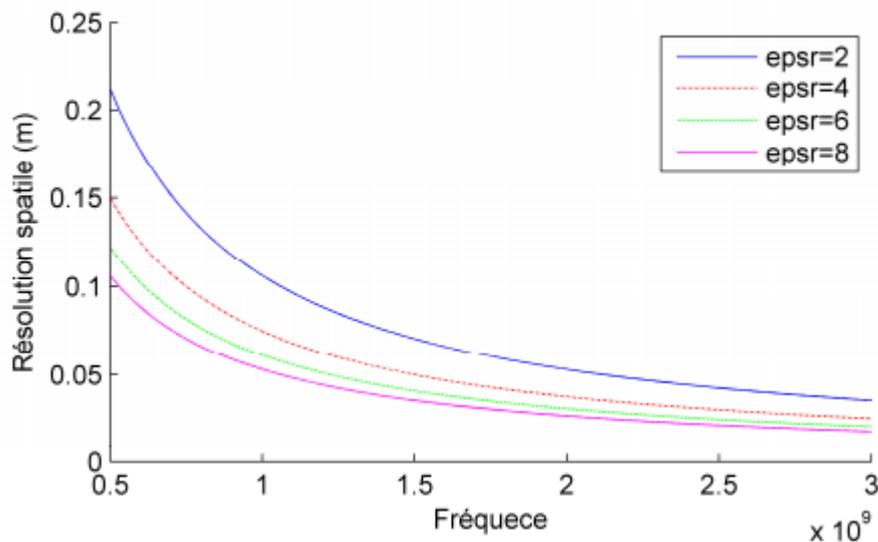


Figure 1.8: Variation de la résolution spatiale en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la permittivité.

1.7 Les différents modes d'acquisitions

L'utilisation d'antennes radar bistatiques permet de réaliser des enregistrements GPR dans des configurations d'antennes différentes. En fonction de l'orientation et de la position relative des antennes, il est possible de définir plusieurs modes d'acquisition. Par la suite on présentera le mode réflexion et le mode transmission [17].

1.7.1 Mode réflexion

L'acquisition en géoradar se fait selon deux méthodes, l'un dit à offset constant, l'autre à offset variable. Ces deux types d'acquisition permettent pour le premier d'imager le sous-sol, pour le deuxième de donner un modèle de vitesse en fonction de la profondeur. L'analyse des résultats en temps donnés par l'acquisition à offset constant et variable permet de replacer chaque objet imagé à sa vraie profondeur.

a. Offset constant

C'est le mode le plus souvent utilisé en prospection radar pour l'imagerie du sous-sol. Dans ce mode, l'espacement entre les antennes émettrices (TX) et réceptrices (RX) est fixe. Le couple émetteur-récepteur est déplacé suivant une distance constante le long d'un profil horizontal (Figure 1.9). Pour chaque position, une acquisition est enregistrée. Le radargramme obtenu présente l'amplitude mesurée en fonction du temps et de la position du centre du couple émetteur-récepteur.

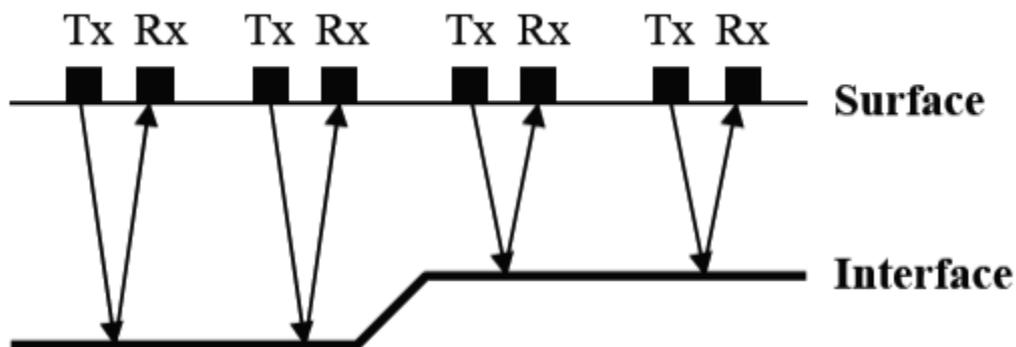


Figure 1.9: Mode réflexion à offset constant. Le profil radar s'obtient en déplaçant les antennes le long d'une ligne horizontale.

b. offset variable

Les sondages radars ou sondages de vitesse sont désignés sous les noms de « Common Mid Point » (CMP) et « Wide Angle Reflection and Refraction » (WARR). La vitesse est évaluée à partir des variations des temps de propagation des ondes radar obtenues pour différents écartements entre antenne émettrice et antenne réceptrice.

En mode à offset variable on distingue deux cas :

- Mode CMP : dans ce cas la distance entre les antennes émettrices et réceptrice varie. Les antennes TX et RX sont écartées à pas constant autour d'un point milieu (Figure

1.10). On obtient une courbe à allure hyperbolique pour chacun des réflecteurs. La pente de cette courbe donne accès à la vitesse moyenne entre la surface et le réflecteur.

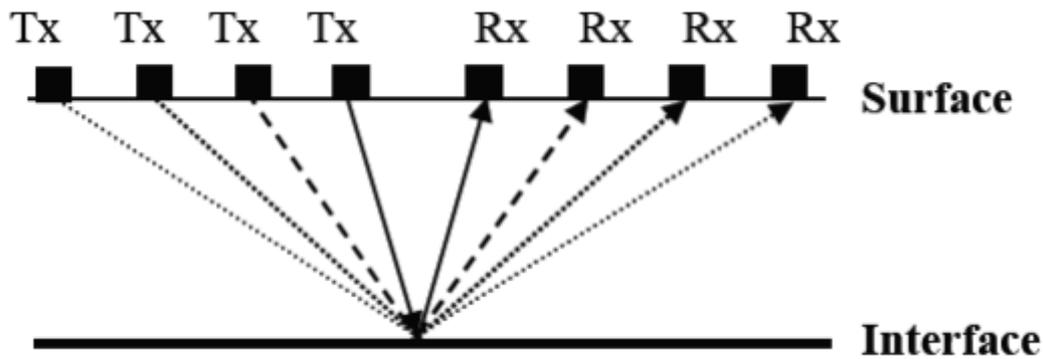


Figure 1.10: Mode CMP. La distance entre les antennes augmente le long du profil du radar.

- Mode WARR : Dans ce cas l'émetteur reste fixe et le récepteur s'éloigne de l'émetteur.

1.7.2 Mode transmission

Ce mode permet d'enregistrer la propagation d'une onde radar depuis l'antenne émettrice vers l'antenne réceptrice. Ce type d'acquisition peut se faire avec des antennes de surface. Pour chaque position de l'antenne émettrice, une trace est enregistrée pour une série de positions de l'antenne réceptrice. L'antenne émettrice est ensuite déplacée, et la séquence d'acquisition répétée (Figure 1.11). Le traitement de ce type de radargramme n'est pas direct et nécessite l'utilisation de méthodes d'inversion numériques. Cette méthode est très utilisée avec des antennes de forage, en déplaçant les antennes émettrice et réceptrice dans des puits parallèles.

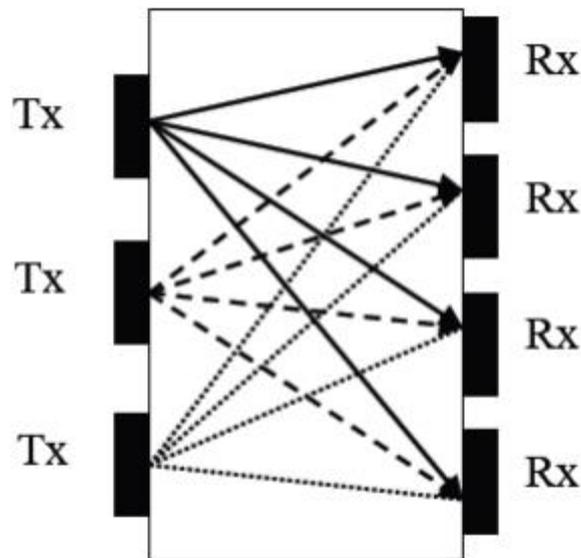


Figure 1.11: *Mode transmission. Pour chaque position de l'antenne émettrice, une série de mesures est effectuée en déplaçant l'antenne réceptrice.*

1.8 Radars commercialisés

Les différents modèles existants sont peu nombreux. L'achat d'un radar GPR reste un investissement financier important. Nous allons donc décrire quelques systèmes commercialisés[18].

1.8.1 Radar GPR RAMAC

Le radar GPR RAMAC a été conçu et commercialisé par la société Malagéosciences. Ce modèle à impulsion temporelle se compose :

- D'un lot d'antennes : Il offre une palette d'antennes, fonctionnant à des fréquences centrales diverses. Les fréquences de travail sont les suivantes :
 - ✓ Antennes blindées : 100MHz, 250MHz, 500MHz, 800MHz et 1.6GHz,
 - ✓ Antennes non blindées : 10MHz, 25MHz, 50MHz, 100MHz, 200MHz,
 - ✓ Antennes de forage : 100MHz et 205MHz.



Figure 1.12: Radar RAMAC monté sur le chariot RAMAC GPR SCART.

- Unités de contrôle : Actuellement, deux unités de contrôles sont disponibles pour le RAMAC (figure 1.13):
 - ✓ L'unité CU2
 - ✓ L'unité X3M

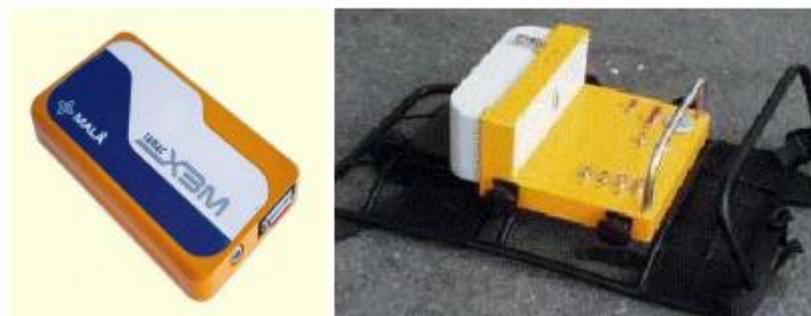


Figure 1.13: Unités de contrôle CU2 (à droite) et X3M (à gauche).

L'unité de contrôle X3M est une version beaucoup plus compacte mais moins performante que l'unité de contrôle CU2. Elle ne peut être connectée à toutes les antennes 76 disponibles. Le module électronique CU2 est adaptable à toutes les antennes et offre la possibilité de connecter quatre antennes. Le CU2 se positionne entre les antennes d'émissions et de réception et l'unité de visualisation. La communication entre le CU2 et les antennes s'opère par fibre optique. Hormis la fragilité des connecteurs des fibres, l'utilisation de signaux optiques permet de s'affranchir de potentielles perturbations liées aux impulsions émises. Cependant, la connexion entre l'unité de contrôle (CU2 ou X3M) et le dispositif de visualisation nécessite un câble parallèle 25 broches.

- Unité de visualisation et logiciel GROUNDVISION : le RAMAC permet la visualisation instantanée des radargrammes. Deux modèles sont proposés :

- ✓ Le RAMAC Monitor XV11,
- ✓ Le RAMAC CX11.

Le RAMAC Monitor XV11 (figure 1.14) est une nouvelle unité proposée par Malagéosciences. Il s'agit d'un écran LCD léger à fort contraste et peu encombrant. Une simple touche permet l'accès à toutes les fonctions proposées et le transfert des données vers un autre ordinateur s'effectue par le port USB



Figure 1.14: *RAMAC Monitor XV11.*

1.8.2 Radar pulse EKKO

Ce radar bistatique est commercialisé par la société canadienne Sensors and Software.

Il est constitué de :

- une unité de visualisation.
- plusieurs antennes qui font partie intégrante d'un kit vendu pour compléter le radar initial.

Elles autorisent une amélioration des performances du radar en terme de précision et de profondeur maximale d'investigation. Lors de l'acquisition, les antennes sont poussées par l'opérateur à l'aide d'une poignée.

La visualisation du profil se fait par l'intermédiaire d'un logiciel fourni avec le radar et d'un micro-ordinateur. Cet ensemble reste fixe et le transfert des informations entre l'antenne de réception et le PC s'effectue au moyen d'un câble posé à même le sol, nécessitant un remplacement régulier dû à l'usure et aux frottements avec le sol. Cette société propose en option, une solution de remplacement de l'ordinateur par un écran LCD léger et facile d'utilisation intégrant de multiples fonctionnalités.



Figure 1.15: *Radar GPR pulse EKKO 1000.*

1.9 Conclusion

Le radar GPR est un outil de mesure précieux et ses domaines d'utilisations sont multiples (génie civil, exploration spatiale, déminage...). Toutefois, les méthodes d'acquisitions sont variées et multiples. Le choix du radar demeure un choix important souvent difficile à effectuer. De plus les caractéristiques techniques varient d'un radar à un autre d'où la nécessité d'avoir une idée sur la profondeur maximale d'investigation, la résolution et sur le type d'antennes dont le dispositif est équipée.

Le dimensionnement du GPR est soumis à des contraintes inhérentes principalement aux caractéristiques de la cible et à celles exigées par toute mission spatiale. La maîtrise des lois d'électromagnétisme permet d'appréhender le fonctionnement du GPR grâce aux ondes électromagnétiques. Ces informations ne sont pas immédiates et exigent de nombreux traitements et le recours parfois à des algorithmes de traitement complexes et à des méthodes d'analyse des données.

Bibliographie

- [1] A. P. Annan, "GPR Methods for Hydrogeological studies", *Hydrogeophysics*, PP.185-213, 2005.
- [2] D. Daniels, "Surface-penetrating radar", *British Library Cataloguing in Publication Data*, 1996.
- [3] A. Olver and L. G. Cuthbert, "FMCW radar for hidden object detection" *Radar and processing*, *IEE Proceedings*, vol. 135, issue 4, pp.354-361, Aout 1988.
- [4] K. Iizuka and A. Freundhorfer, "Step frequency radar" *Journal of applied Physics*, Vol. 59, no.6, pp.2572-2582, November 1984.
- [5] Y.I. Lukashenko, A.I. Maslov and al., "Subsurface sounding in the UHF band of lenses of ground Water and continental glaciers", *Telecomm. & Radio Eng.*, Vol. 34, N°4, avril 1979, p.94-95.
- [6] E.K. Walton, "Ground penetrating radar using ultra-wideband noise", *proc. Of the second Gov Workshop on GPR: Technologies and applications*, Columbus, Ohio, USA, octobre 1993, p. 121-131.
- [7] D.J. Daniels, "A low cost, hand-held, microwave radiometer for surface land mines", *proc. of the second international conference on the detection of abandoned land mines*, Edimburg, UK, octobre 1998, p. 222-225.
- [8] A. Novo, M. Grasmueck, D. A. Dave, H. Lorenzo, "3D GPR In Archaeology: What can be gained from Dense Data Acquisition and Processing", *13 th International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 16-19 2008, Birmingham, UK.
- [9] P.M. Barone, E. Pettinelli, E. Mattei, A. De Santis, E. De Minicis, "GPR Investigations in the Archaeological Area of Ferento (Viterbo, Lazio, Italy)", *41 special theme 7 th International Conference Archaeological Prospection*, Nitra 2007, 101-103.
- [10] A. M. Zoubir, L. J. Chant, L. C. Brown, B. Barkat, C. Abeynayake, "Signal Processing Techniques for Land Mine Detection Using Impulse Ground Penetrating Radar", *IEEE sensors journal*, vol.2, no. 1, pp.41-51, 2002.

- [11] D. P. Gader , M. Mystkowski, Z. Yunxin, “LandMine Detection with Ground Penetrating Radar using Hidden Markov Models”, IEEE transactions on geoscience and remote sensing , vol. 39, no. 6, pp. 1231-1244,2001.
- [12] T. Scullion, C.L. Lau, T. Saarenketo, “Performance specifications of Ground Penetrating Radar”, Proceeding, 6 th International Conference on Ground-Penetrating Radar, September 1996, p341-346.
- [13] D. Noon, G. Stickley, D. Longstaff, “A frequency-independent characterization of GPR penetration and resolution performance”, Journal of Applied Geophysics, P 127-137, 1998.
- [14] D. Noon, G. Stickley, D. Longstaff, “A frequency-independent characterisation of GPR penetration and resolution performance” 7 th International Conference on Ground Penetrating Radar, 27-28 May 1998, P 27-30.
- [15] R. Plumb, D. Noon, G. Stickley and D. Longstaff, “A waveform range performance diagram for Ground Penetrating Radar”, Journal of applied Geophysics, P117-126, 1998.
- [16] M. I. Skolnik, “Radar Handbook”, Boston: Mc Graw Hill, 1990.
- [17] Thèse doctorat Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS pp.37 ECOLE DOCTORALE Sciences et Ingénierie pour l’information FACULTE des SCIENCES et TECHNIQUES de LIMOGES.
- [18] Mémoire de magister ‘‘Etude théorique de la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux hétérogènes - Application au radar Sol –’’pp.61.



Chapitre 2

Généralités sur les antennes

2.1 Introduction

Les systèmes GPR sont généralement large bande, les bandes utilisées sont incluses dans l'intervalle [10MHz -10GHz] et le composant le plus important dans ce système est l'antenne (émission et réception).

De ce fait, ce chapitre sera consacré à l'étude des antennes. Nous allons, dans un premier temps, donner une description générale sur les antennes, leurs caractéristiques et ses différents types. Ensuite, nous allons focaliser sur les antennes imprimées, en présentant leurs avantages, inconvénients et ces applications. Nous finirons ce chapitre par les antennes utilisées dans les applications GPR.

2.2 Généralité sur les antennes

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission de l'information. On peut les qualifier comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

2.3 Caractéristiques des antennes

2.3.1 Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné.

$$r(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_0(\theta_0, \varphi_0)}$$

En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont : le plan E (plan vertical) et le plan H (plan horizontal) ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales [1]. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En réalité, l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace certaines directions sont privilégiées, ce sont les lobes de rayonnement.

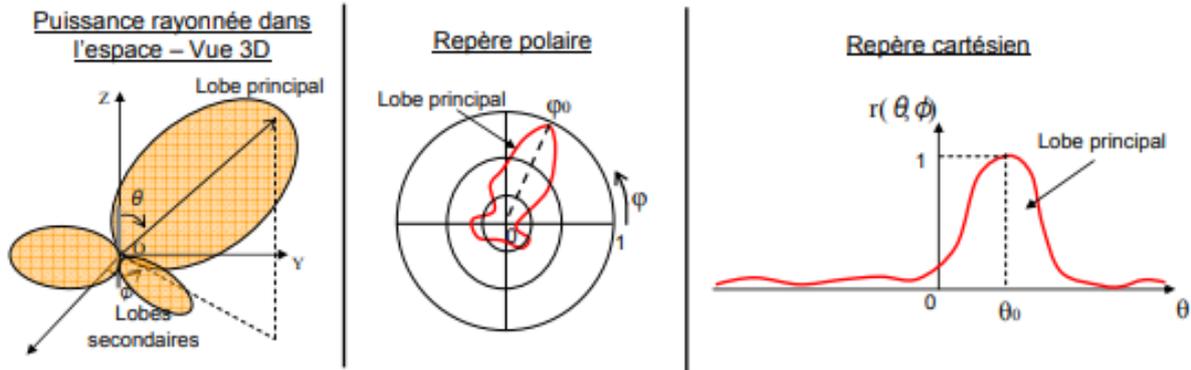


Figure 2.1: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne.

2.3.2 Le coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation)

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion [2] d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies. Pour une antenne d'impédance Z , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_s (souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

$$s_{11} = \frac{(Z_e(f) - Z_0)}{(Z_e(f) + Z_0)}$$

– Z_e : est l'impédance d'entrée de l'antenne.

– Z_0 : est l'impédance caractéristique (Généralement égale à 50Ω).

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}|$$

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

2.3.3 Gain

Le gain $G(\theta, \phi)$ [3] d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \phi)$ sur la puissance que rayonne la source isotrope par unité d'angle solide. Il est exprimé en dB et présenté par l'équation [3] :

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{(p_a/4\pi)}$$

Avec :

- $P(\theta, \phi)$: Puissance rayonnée dans une direction.

- P_a : Puissance rayonnée par l'antenne.

2.3.4 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante [4] :

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P(\theta, \phi)_{iso}} = \frac{P(\theta, \phi)}{(p_r/4\pi)}$$

Avec :

- $P(\theta, \phi)$: La Puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, ϕ) .

- P_r : est la puissance totale rayonnée.

2.3.5 Le rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle qui lui fournit l'alimentation. Il est exprimé par [5] :

$$\eta = \frac{R_r}{(R_r + R_p)}$$

Avec :

- R_r : Résistance liée à son rayonnement.

-Rp : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

Il est aussi exprimé par :

$$\eta = \frac{p_r}{p_a}$$

Avec :

-Pr : Puissance totale rayonné.

- Pa : Puissance d'alimentation de l'antenne.

2.3.6 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e [6].

$$Z_e = \frac{v_e}{I_e} = R + jX$$

Où :

- Z : impédance d'entrée aux bornes a et b.

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

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

2.3.7 La bande passante (BP)

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement.

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{min} et une valeur maximale f_{max} . La bande passante, ainsi la bande relative peut être exprimée comme donnée par l'équations [7] :

$$BP = f_{max} - f_{min}$$

$$BP(\%) = \left[\frac{f_{min} - f_{max}}{f_c} \right] \times 100$$

Avec :

f_c est la fréquence centrale ou de résonance.

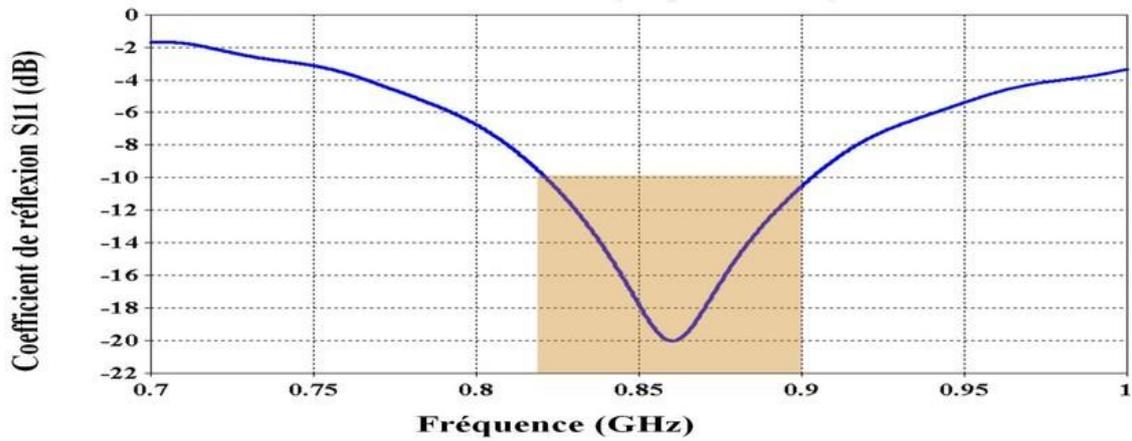


Figure 2.2: Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.

2.3.8 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à -3 dB 2θ représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée.

Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal.

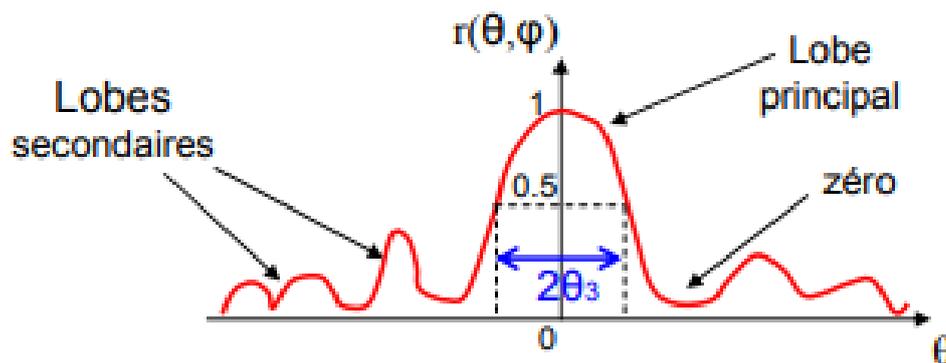


Figure 2.3: Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.

2.4 Type des antennes

Il existe plusieurs types d'antennes selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. On peut les classer comme suit, selon [8] :

- les formes ou les géométries :
 - ✓ filaires : dipôle, boucle, spirale,...
 - ✓ à ouverture : cornet, fente,...
 - ✓ imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale.
- le gain :
 - ✓ élevé : planaire,
 - ✓ moyen : cornet,
 - ✓ bas : dipôle, fente, patch.
- la forme de faisceau :
 - ✓ omnidirectionnelle : dipôle,
 - ✓ étroit : planaire,
 - ✓ large : réseau.
- la largeur de bande :
 - ✓ large : spirale,
 - ✓ étroite : patch, fente.

Et voici quelque type d'antennes :

-Antenne dipolaire (Figure 4.a) : elle est constituée de deux fils alignés alimentés par une ligne bifilaire, elle est souvent utilisée aux basses fréquences.

-Boucle magnétique (Figure 4.b) : elle est constituée d'un conducteur circulaire alimenté par un générateur à travers une ligne bifilaire.

-Antenne cornet (Figure 4.c) : c'est un guide d'onde rectangulaire dont la section est variable ce qui permet de passer graduellement l'onde guidée vers l'espace libre. Elle est très utilisée en haute fréquence.

-Antenne fente (Figure 4.d) : c'est un guide d'onde rectangulaire qui contient des fentes sur sa paroi métallique, le rayonnement s'effectue alors perpendiculairement au plan troué du guide.

-Antenne à réflecteur parabolique (Figure 4.e) : elle est constituée d'une source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique.

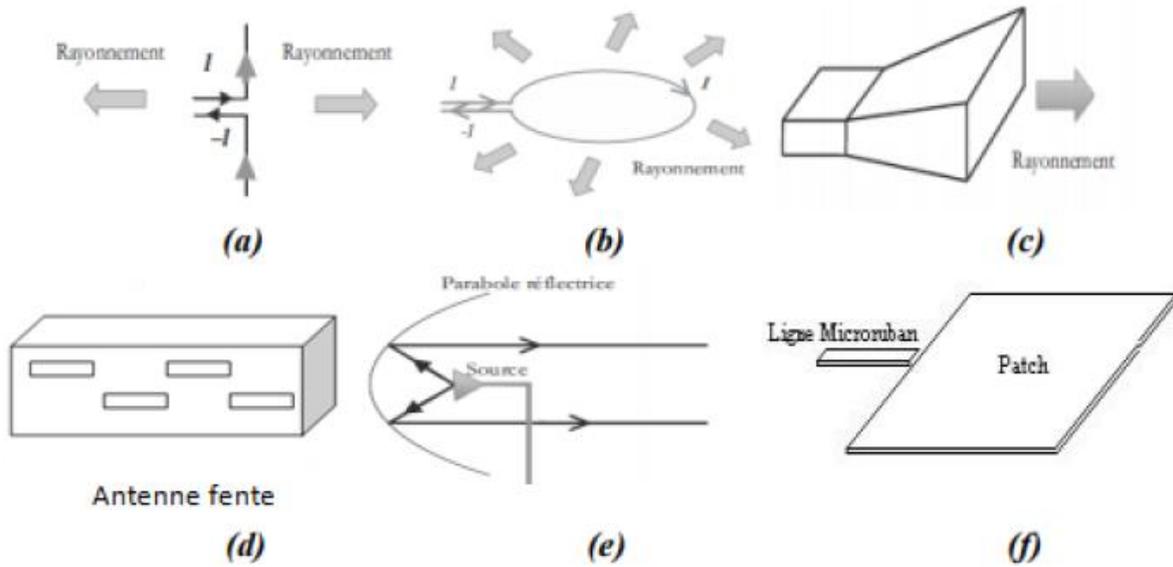


Figure 2.4: Types des antennes.

2.5 Antenne imprimée (patch)

Une antenne imprimée est généralement constituée d'un plan de masse, d'une ou plusieurs couches de substrat qui de permittivités ϵ_r (figure 2.5). Sur la surface, on a un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangulaire, circulaire, carrée,...). Il existe plusieurs mécanismes d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnements en polarisations linéaires ou circulaires [9], [10].

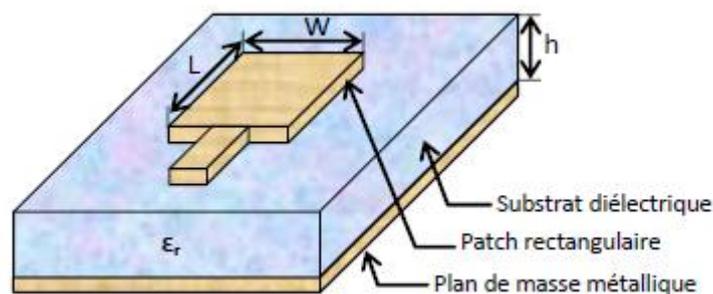


Figure 2.5: Présentation d'une antenne patch microruban.

En pratique, les formes des éléments rayonnants les plus utilisées sont montrées dans la figure ci-dessous (figure 2.6).



Figure 2.6: *Formes des éléments rayonnants.*

2.6 Avantages et inconvénients des antennes imprimées

Les antennes microrubans sont devenues de plus en plus populaires grâce à leurs applications qui couvrent un large domaine de fréquence : 100MHz à 100 GHz [11]. Une caractéristique qui les rend extrêmement demandées dans les téléphones portables.

Certains avantages sont les suivants [12] :

- ✓ Faible poids.
- ✓ Volume réduit.
- ✓ Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- ✓ Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- ✓ La tendance à grouper plusieurs patches identiques pour construire des antennes réseaux.
- ✓ Peuvent être facilement intégrés dans les circuits micro- ondes intégrés (MIC).
- ✓ Capables de fonctionner en double ou triple fréquence.

Toutefois, les antennes microrubans ont également des limitations telles que [13]:

- ✓ Bande passante étroite.
- ✓ Généralement faible gain (6 dB).
- ✓ La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi- plan.
- ✓ Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouches et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes [14].

2.7 Les applications des antennes Patch

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimés, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient incapable de répondre à ces exigences. Pour cette raison, les antennes patch remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications [15], [16].

Parmi ces applications on cite :

- ✓ Les télécommunications par satellites.
- ✓ La commande et contrôle.
- ✓ La télémétrie par missile.
- ✓ Les équipements portatifs.
- ✓ Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- ✓ Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- ✓ Les systèmes GPR.

2.8 Les antennes utiliser dans le GPR

2.8.1 Antenne papillon

Une antenne UWB nœud papillon est largement utilisée dans la conception des applications GPR, car elle a la capacité de réduire la susceptibilité au sol pendant les opérations GPR [17]. La figure 2.7 montre une conception d'antenne en nœud papillon simple qui se compose de deux fusées éclairantes connectées à une alimentation commune.

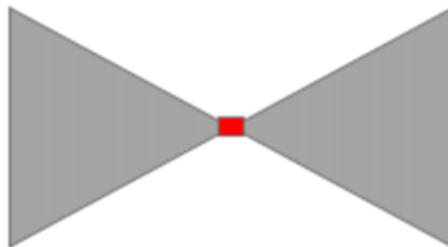


Figure 2.7: Conception d'antenne papillon.

La fabrication de ces types d'antennes s'effectue avec la technologie de type circuit imprimé. Les deux brins de l'antenne sont constitués d'une couche résistive d'où elles acquièrent la propriété des antennes large bande (L'antenne a été fabriquée sur un substrat de verre époxy

FR-4 avec une valeur de constante diélectrique, ϵ_r elle est alimentée par un câble coaxial pour l'adaptation d'impédance au balun à courant équilibré). Les concepteurs de ces antennes ont essayé de modifier le profil résistif afin d'augmenter au maximum l'efficacité de l'antenne sans pour autant sacrifier la bande passante de l'antenne. L'association d'une charge capacitive et d'une charge résistive permet d'obtenir un bon compromis.

2.8.2 Antenne Vivaldi

Les antennes Vivaldi sont couramment utilisées pour les applications telles que le GPR qui nécessitent une plus grande bande passante généralement avec un rapport 10:1 [18]. Par conséquent, diverses conceptions d'antennes Vivaldi ont été étudiées et discutées. La figure 5 montre la conception d'une antenne Vivaldi.

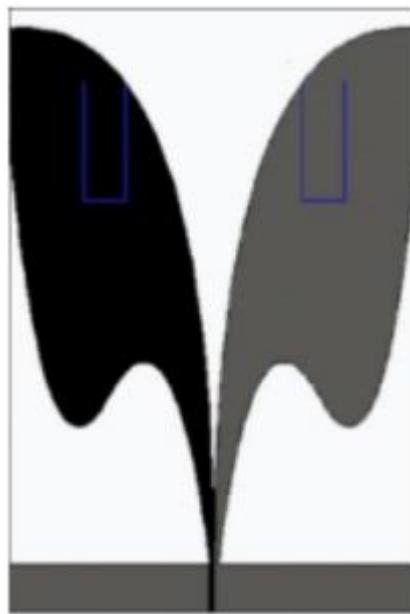


Figure 2.8: *Une antenne Vivaldi.*

2.8.3 Antenne Corne

Les cornets constituent une première catégorie d'antennes large bande directives. Ces antennes sont souvent utilisées dans le cadre d'applications GPR et particulièrement pour les radars GPR FMCW. Ces antennes sont constituées de guides d'onde rectangulaires ou circulaires et d'une transition (adaptateur d'impédance). Celle-ci est considérée comme un transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée. Sa forme permet

de passer graduellement des dimensions du guide d'onde à l'espace libre. L'onde est ainsi graduellement transmise dans l'espace libre.

Cette antenne se caractérise par une bonne directivité. Les cornets présentent une grande pureté de polarisation et sont en principe des antennes peu dispersives, le centre de phase de ces antennes varie peu avec la fréquence.

La bande passante est relativement large. En ajoutant une paire d'arches de forme exponentielle à la structure du corne, on forme un corne ridgé. Cette modification permet d'élargir davantage la bande de fonctionnement tout en conservant des dimensions relativement modestes [19].

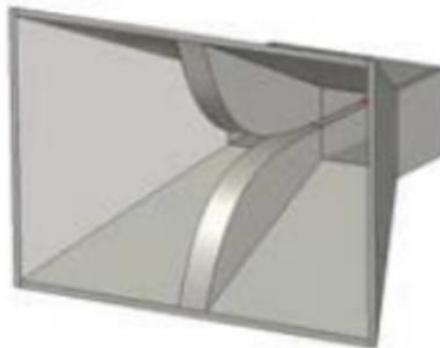


Figure 2.9: *Une antenne cornet.*

2.8.4 Antennes à spirale logarithmique

L'antenne spirale logarithmique fait partie des antennes indépendantes de la fréquence. Ces antennes ont été décrites par Dyson [20]. Elles sont définies par leurs dimensions angulaires et leurs caractéristiques (diagramme de rayonnement et impédance d'entrée) sont indépendantes de la fréquence. Cela veut dire que si les dimensions de l'antenne sont multipliées par un facteur M , les caractéristiques de l'antenne ne changent pas, par contre la fréquence de travail elle sera multipliée par ce même facteur. Ces caractéristiques sont déterminées par sa forme et ses dimensions rapportées à la longueur d'onde. Les antennes spirales se caractérisent par une polarisation circulaire du champ et par un diagramme de rayonnement proche de celui d'un dipôle.

Cette antenne est dispersive, c'est pourquoi elle est utilisée dans le cas où le GPR utilise la technique step frequency qui permet de faire une correction de phase pour chaque fréquence.



Figure 2.10: *Une antenne spirale.*

2.8.5 Antenne planaire

Une antenne plane, comme le montre la figure 2.11, est un candidat populaire pour l'UWB en raison de sa simplicité, de sa conformité dans la conception, de sa rentabilité et de ses propriétés de légèreté [21].

Une antenne plane se compose principalement d'un patch rayonnant et d'un plan de masse ce type d'antenne est largement utiliser dans les applications du GPR.

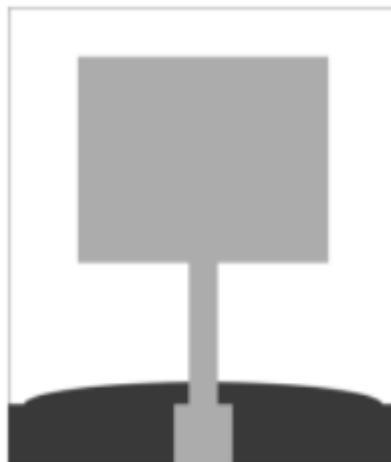


Figure 2.11: *Une antenne plane.*

2.9 Conclusion

Les antennes jouent un rôle important. Que ce soit dans les téléphones portables, la radioastronomie, les systèmes de positionnement par satellite (GPS), les système GPR les signaux de télévision et les transmissions radio, ou dans les tours de contrôle des avions et les tours maritimes, tout doit être établi entre deux liaisons distantes. ...Et ainsi de suite.

L'antenne est toujours là, et elle est indispensable au fonctionnement normal de tout système de télécommunications. Compte tenu de ses paramètres de base, mais chaque antenne est conçue pour une application spécifique.

Bibliographie

- [1] Ulaby, F.T, «Fundamentals of Applied Electromagnetic»Prentice Hall, 1999.
- [2] S. Tebache .« Méthode De Caractérisation Hyperfréquence Des Antennes Imprimées » Magister, Faculté des Sciences Et De La Technologie, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
- [3] A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Diriges» Institut National Des Sciences Appliqués De Toulouse.
- [4] Keit.R.Caver and James.W.Mink , «Microstrip antenna Technology», IEEE.1981.
- [5] Stalling, D, Zockler, M; Hege, H-C: «Fast display of illuminated field lines "Visualization and computer Graphics », IEEE transaction on .Vol.3, Issue2, pp.118-128, June 1997.
- [6] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008.
- [7] M, Gujral, J.L.W, Li,T, Yuan, and CW.Qiu, « Bandwidth improvement of microstrip antenna array using dummy ebg pattern on feed line» national university og singapore, progress in electromagnetic research, Vol.127, pp.79-92, 2012.
- [8] G. Kumar and K. P. Ray, Broadband microstrip antennas, Artech House Boston, London 2003.
- [9] C. A. Balanis, Antenna theory analysis and design, 2nd edition John Wiley and Sons, 1997.
- [10] D. M. Pozar and S. M. Voda,"A rigorous analysis of a microstrip line fed patch antenna", IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 35, n° 12, pp. 1343- 1350, December 1987.
- [11] D. Khedrouche, " Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009.
- [12] M. Titaouine, " Analyse des antennes microrubans de forme arbitraire par la méthode des moments et le modèle généralisé de la cavité", Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 09/2007.
- [13] B . Zaoui , "Modélisation d'une antenne microruban compacte", Master academique ,Université Echahid Hamma Lakhdar El oued,06/2015.

- [14] D. Khedrouche, " Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009.
- [15] J. R. Mosing, Fred E. Gardiol, "Rayonnement d'une antenne microruban de forme arbitraire " Ann. Télécommum. 40, N° 3-4, 1985.
- [16] A. BEHLOUL, " Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire ", Mémoire de Magister, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2010.
- [17] F. B. Gross, Frontiers in antennas : Next generation design & engineering, New York : McGraw-Hill Professional, 2011.
- [18] L. Yang, H. Guo, X. Liu, H. Du et G. Ji, « An antipodal Vivaldi antenna for ultra-wideband system », IEEE Int. Conférence sur l'Ultra-Wideband, Nanjing, pp. 1-4, 2010.
- [19] H. A. Mohamed, H. Elsadek et E. A. Abdallah, « Antenne à cornet UWB TEM quadrillée pour les applications GPR », IEEE Radar Conference, Cincinnati, pp. 79-82, 2014.
- [20] Thèse doctorat Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS pp.37 ECOLE DOCTORALE Sciences et Ingénierie pour l'information FACULTE des SCIENCES et TECHNIQUES de LIMOGES.
- [21] C. A. Balanis, Théorie de l'antenne : Analyse et conception. Royaume-Uni : John Wiley & Sons Ltd, 2005.



Chapitre 3

Simulation et mesures d'une antenne GPR.

3.1 Introduction

Après l'étude générale du système GPR et des antennes utilisées dans les applications du GPR qui ont fait l'objet du premier et du deuxième chapitre de ce mémoire, on s'est consacré dans ce troisième chapitre à la conception et à l'étude des structures d'antennes qui en peuvent utiliser dans les applications du GPR.

Notre travail est basé sur une antenne planaire. En premier lieu différentes modifications seront menées sur l'antenne de base puis nous avons fait une étude paramétrique (par CST studio) pour choisir une antenne optimale.

Une fois le modèle choisi, nous passerons à la réalisation de cette antenne, puis à la caractérisation expérimentale. À savoir, mesures du coefficient de réflexion (S_{11}) et du diagramme de rayonnement. De plus, une étude sur la puissance de pénétration pour tester l'application GPR de notre antenne

3.2 Logiciel de simulation CST Studio Suite

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique.

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 Dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Integration Technic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateur

CST Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [1].

3.3 Description générale de l'interface CST :

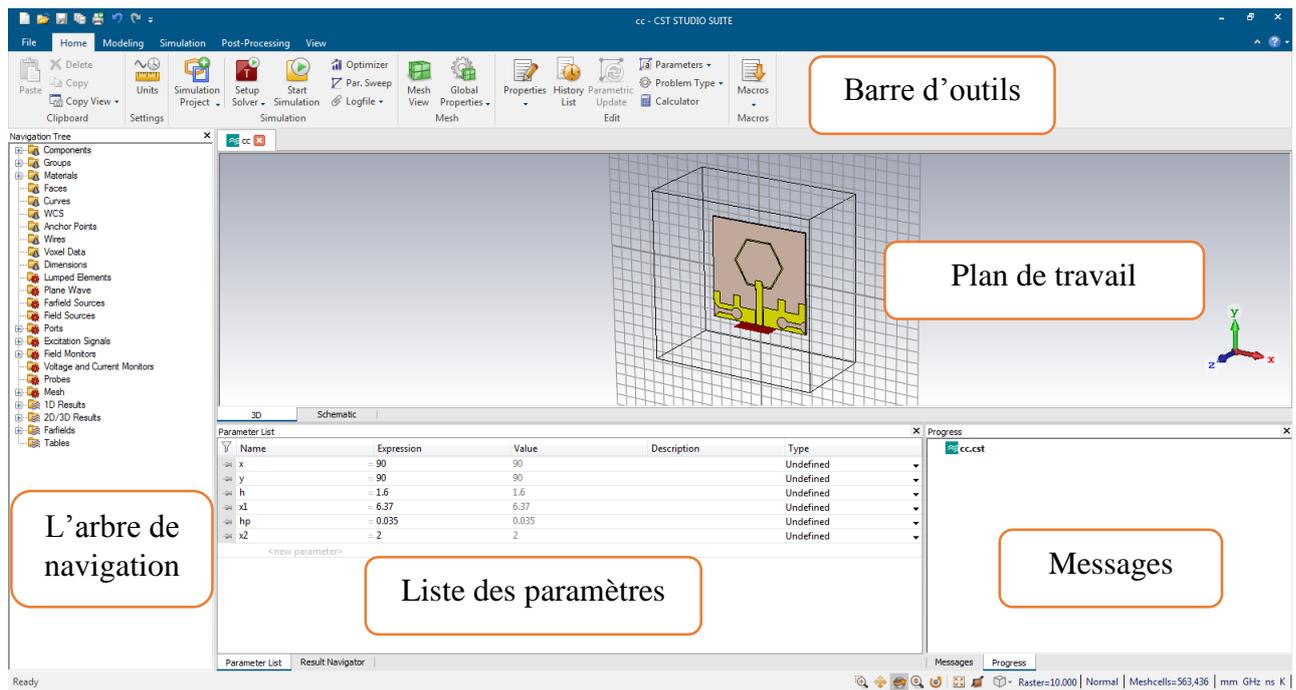


Figure 3.1: l'interface du CST studio.

- ❖ A l'entête de l'interface, on trouve une barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre de menu.
- ❖ A gauche de l'interface, nous avons l'arbre de navigation d'où on peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- ❖ Au milieu de l'interface se trouve le plan de travail sur lequel la structure est en 3D.
- ❖ Au pied de l'interface, nous avons :
 - la liste des paramètres d'où on trouve les variables utilisées pendant la simulation.
 - le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès et le contraire, un message d'erreur.

3.4 Description de l'antenne de base

Cette antenne est fabriquée sur un substrat époxy FR-4 d'une superficie de 90x90 mm, d'une épaisseur de 1,5 mm et d'une permittivité relative $\epsilon_r = 4.3$. Une fente rectangulaire avec un petit espace est alimentée par une ligne d'alimentation 50Ω avec une largeur de bande de signal de $W=6,37$ mm, un plan de masse symétrique de longueur $L=17$ mm et deux espacements identiques de 0,5 mm entre la bande signal et le plan de masse symétrique. La

bande de signal a une longueur de $L_s=40$ mm. À la fin de cette bande un patch sous forme d'un cercle du rayon $r=23.5$ mm.

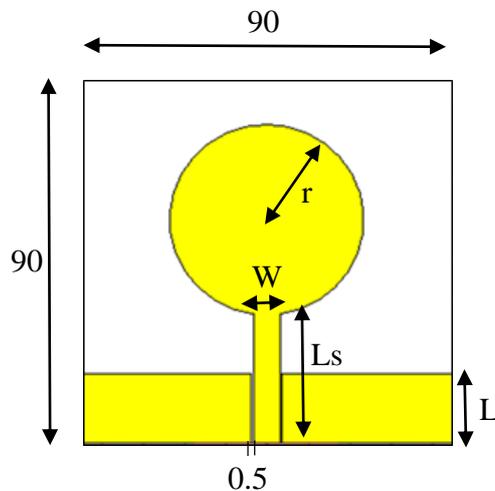


Figure 3.2: les paramètres de l'antenne de base.

3.5 Les étapes de conception

étapes	Structures	S11
01		
L'antenne 01 de base est bi-bande, rayonne autour des deux frequences $f_1 = 0.9\text{GHz}$ & $f_2 = 3.5\text{GHz}$.		
02		
L'antenne 02 reste bi-bande, seulement il y'a un petit decalage de la frequence f_2 vers les bases frequences telque $f_2 = 3.4\text{GHz}$.		

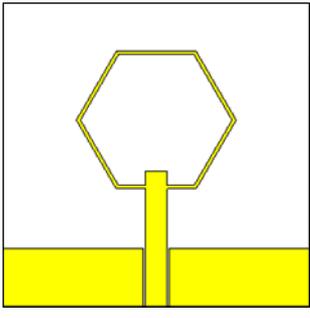
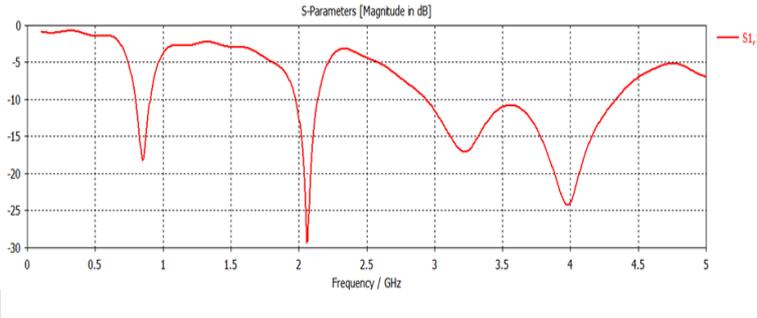
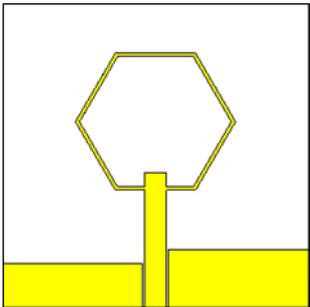
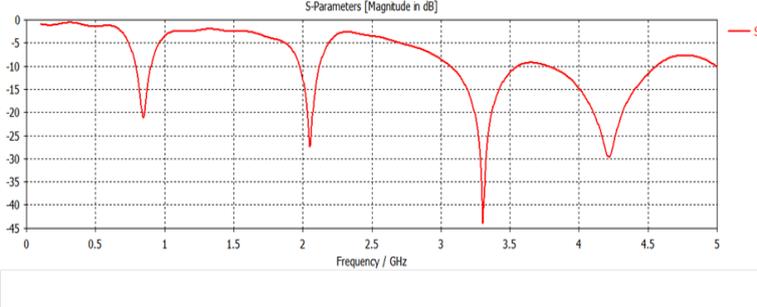
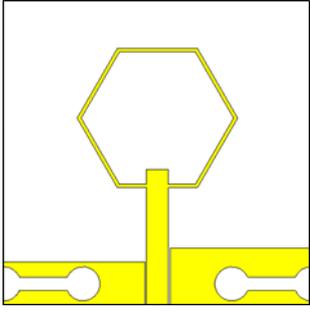
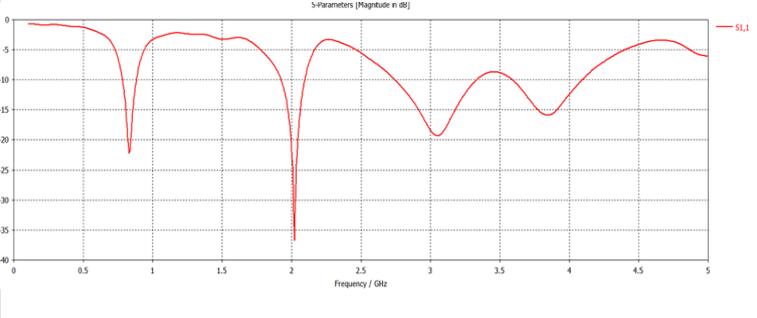
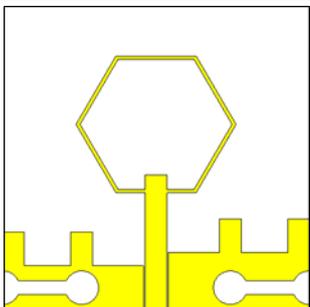
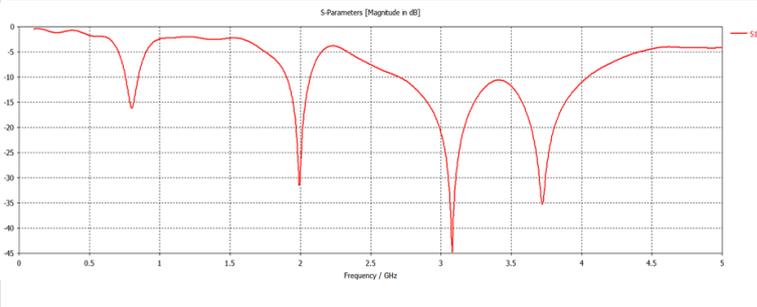
<p>03</p>		
<p>L'antenne 03 devien multi-bande, rayonne autour des frequences $f_1=0.8\text{GHz}$ & $f_2=2.1\text{GHz}$ et une bande $[2.8-4.3]\text{GHz}$.</p>		
<p>04</p>		
<p>L'antenne 04 reste multi-bande, rayonne autour des frequences $f_1=0.8\text{GHz}$, $f_2=2.1\text{GHz}$, $f_3=3.3\text{GHz}$ & $f_4=4.2\text{GHz}$.</p>		
<p>05</p>		
<p>L'antenne 05 reste toujours multi-bande, rayonne autour des frequences $f_1=0.8\text{GHz}$, $f_2=2.05\text{GHz}$, $f_3=3.1\text{GHz}$ & $f_4=3.7\text{GHz}$.</p>		
<p>06</p>		
<p>L'antenne 06 est multi-bande, rayonne autour des frequences $f_1=0.8\text{GHz}$, $f_2=2\text{GHz}$ et une bande de $f_3=2.75\text{GHz}$ jusqu'à $f_4=4.1\text{GHz}$</p>		

Tableau 1: Les étapes de conception.

D'après cette étude, nous avons arrivé à concepter une nouvelle antenne originale multi-bande. Une des bandes est très intéressante pour notre étude expérimentale à savoir la bande centrée à 2GHz. En effet nous disposons dans notre département d'un générateur de fréquence qui travaille à cette fréquence ce qui nous va permettre de faire une mesure de diagramme de rayonnement.

3.6 Etude paramétrique

3.6.1 Effet de largeur de la ligne d'alimentation (w) :

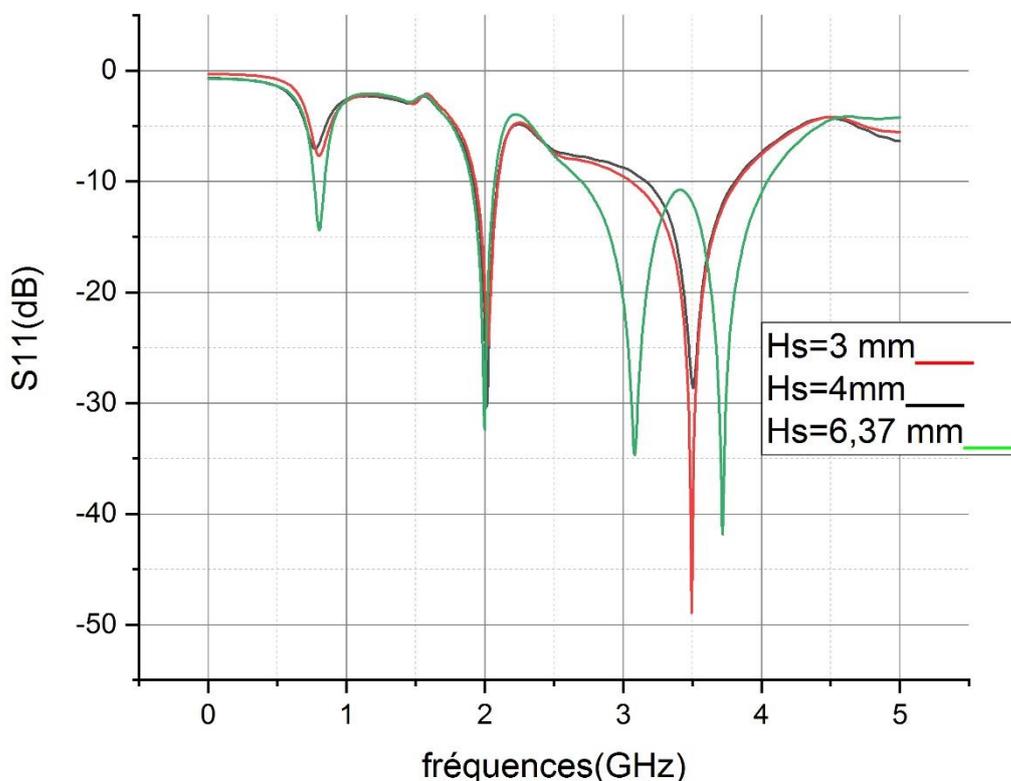


Figure 3.3: *S11 pour différentes largeur de ligne.*

La figure 3.3 présente le S11 de l'antenne à différents largeur de ligne.

- Pour $W=3$ mm l'antenne est bi-bande, rayonne autour de deux fréquences $f_1 = 2\text{GHz}$ & $f_2 = 3.5\text{GHz}$.
- Pour $W=4$ mm l'antenne reste bi-bande, rayonne autour de deux fréquences $f_1 = 2\text{GHz}$ & $f_2 = 3.5\text{GHz}$.
- Pour $W=6.37$ mm l'antenne devienne multi-bandes avec une bande inferieure à 1GHz

Par conséquent, cette étude montre que la largeur de la ligne $W=6.37$ mm est la meilleur car l'antenne est multi-bande avec une bande inferieure à 1GHz centrée sur $f_1 = 0.8\text{GHz}$, une

deuxième bande bien centrée sur 2 GHz et une troisième bande de $f_3 = 2.75\text{GHz}$ jusqu'à $f_4 = 4.1\text{GHz}$.

3.6.2 Effet de longueur de la ligne d'alimentation (L_s)

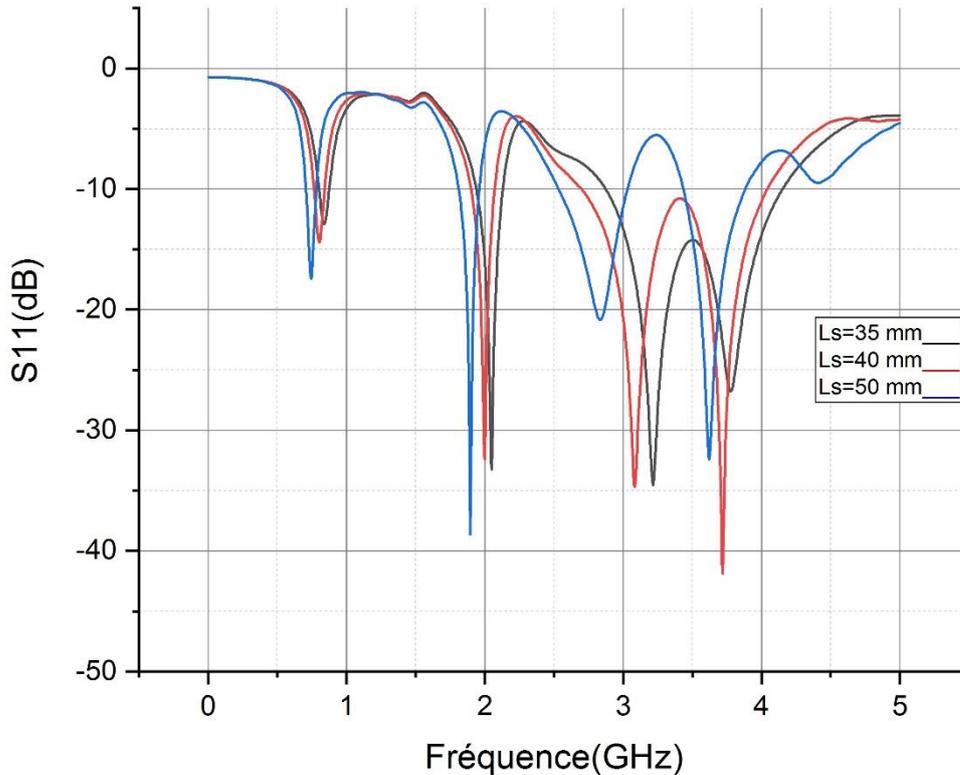


Figure 3.4: S_{11} pour différentes longueurs de ligne.

Dans cette étude, on remarque qu'il y a une petite différence entre les bandes de fréquence pour les trois longueurs (35, 40, 50 mm) mais l'antenne reste toujours multi-bande dans les trois cas.

Par conséquent, cette figure montre que la longueur de la ligne $L_s = 40\text{ mm}$ est la meilleure pour notre étude car l'antenne est bien centrée sur la fréquence 2 GHz.

Finalement, d'après l'étude paramétrique, on peut fixer la longueur et la largeur de la ligne (le patch) comme suit :

- La longueur $L_s = 40\text{ mm}$.
- La largeur $W = 6.37\text{ mm}$.

3.7 Dimensionnement de l'antenne optimisée

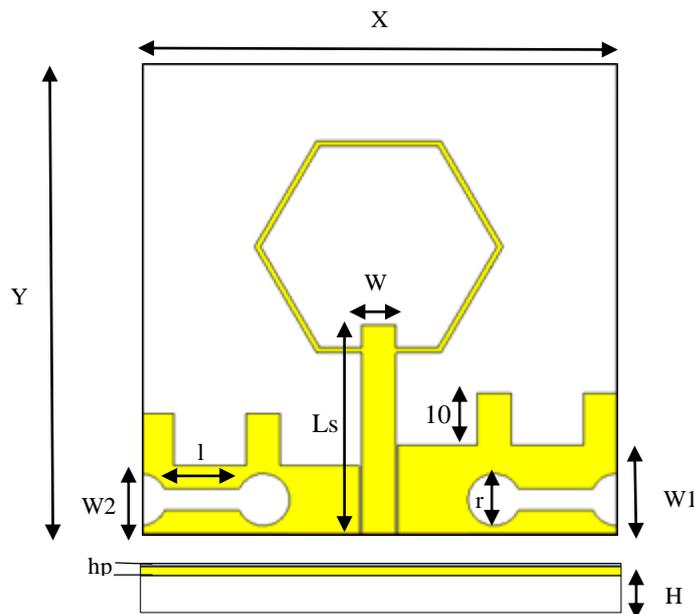


Figure 3.5: Dimensionnement d'antenne.

Paramètre	(mm)	Paramètre	(mm)
X	90	W1	17
Y	90	r	10
W2	13	l	13.5
Hp	0.035	Ls	40
H	1.5	W	6.37

Tableau 2: les différents paramètres d'antenne.

3.8 Réalisation et mesure expérimentale

3.8.1 Description du matériel et réalisation

Graveur de circuits imprimés LPKF ProtoMat S103 pour le prototypage de circuits imprimés et la production de petites quantités, est configuré spécifiquement pour les exigences des applications RF et micro-ondes. Le limiteur de profondeur pneumatique sans contact permet en outre le traitement des substrats tendres et flexibles dotés de surfaces fragiles, Le ProtoMat S103 permet également de d'égrapper soigneusement les circuits imprimés flexibles aux formes irrégulières hors des circuits plus grands.

Tous les graveurs de circuits imprimés LPKF sont équipés puissants logiciels systèmes permettant la conversion des données de topologie dans les circuits imprimés : ils récupèrent les données des logiciels de conception, les éditent pour la production, les décomposent en étapes de procès, et guident les utilisateurs, étape par étape, dans le processus de fabrication. Le LPKF Circuit Pro est capable d'importer tous les formats d'échange de données, offre un grand éventail d'options d'édition et permet de contrôler les graveurs de circuits imprimés. En outre, le logiciel a la possibilité de produire des stencils pour des vernis épargnes et des calques d'assemblage. Le LPKF Circuit Pro Lite est une version simplifiée du LPKF Circuit Pro pour les graveurs de circuits imprimés LPKF d'entrée de gamme [2].



Figure 3.6: *la machine ProtoMap S103.*

La réalisation de notre antenne a pris beaucoup de temps. Nous avons effectué plusieurs essais de réalisation sur le substrat FR-4, malheureusement à chaque fois on trouve des défauts de fabrication dû aux réglages de l'appareille. Finalement, après quelques astuces et modifications nous avons réussi à produire notre antenne (figure 3.10).

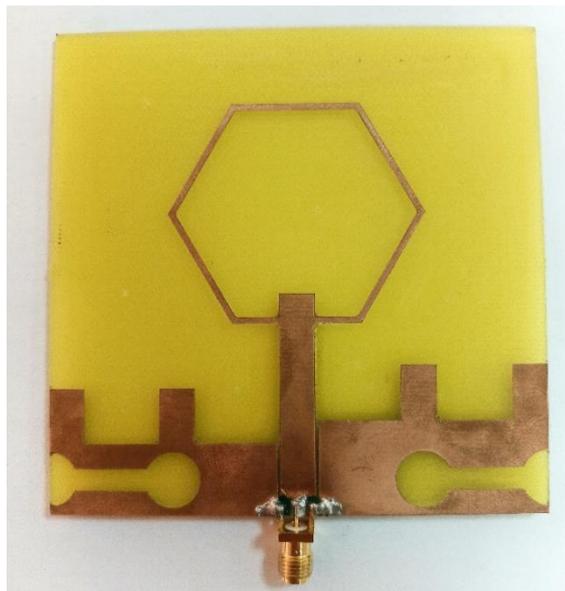


Figure 3.7: *l'antenne réalisée.*

➤ **Contrainte du connecteur SMA**

Lors de la conception nous n'avons pas pris en compte les dimensions du connecteur SMA. Nous avons eu de difficulté à souder le connecteur sans avoir un court-circuit, donc par obligation nous avons fait une petite modification sur l'antenne pour souder le connecteur SMA (enlevé une petite partie du cuivre de la ligne de signal), cette modification n'a aucun effet sur le coefficient de réflexion (S_{11}) comme montre la figure 3.8.

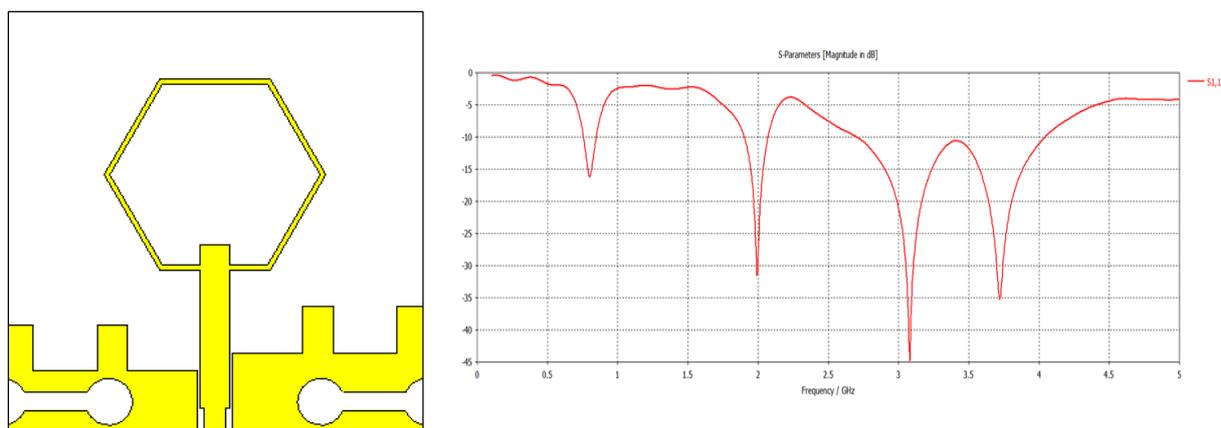


Figure 3.8: *Simulation après la modification de connecteur SMA.*

3.9 Mesures expérimentales

3.9.1 Mesure de coefficient de réflexion S11

La mesure est réalisée par un analyseur de réseau ZNB 20-VECTOR NETWORK fonctionne de 100 kHz à 20GHz disponible dans notre département (figure3.9).



Figure 3.9: ZNB 20-VECTOR NETWORK ANALYSER.

Après calibration de l'analyseur de réseaux sur la bande 0.1-5 GHz, nous avons tracé le coefficient de réflexion S11 de notre antenne à l'aide de logiciel origin 2018. La comparaison entre le S11 simulé et mesuré est présentée dans la figure 3.10 :

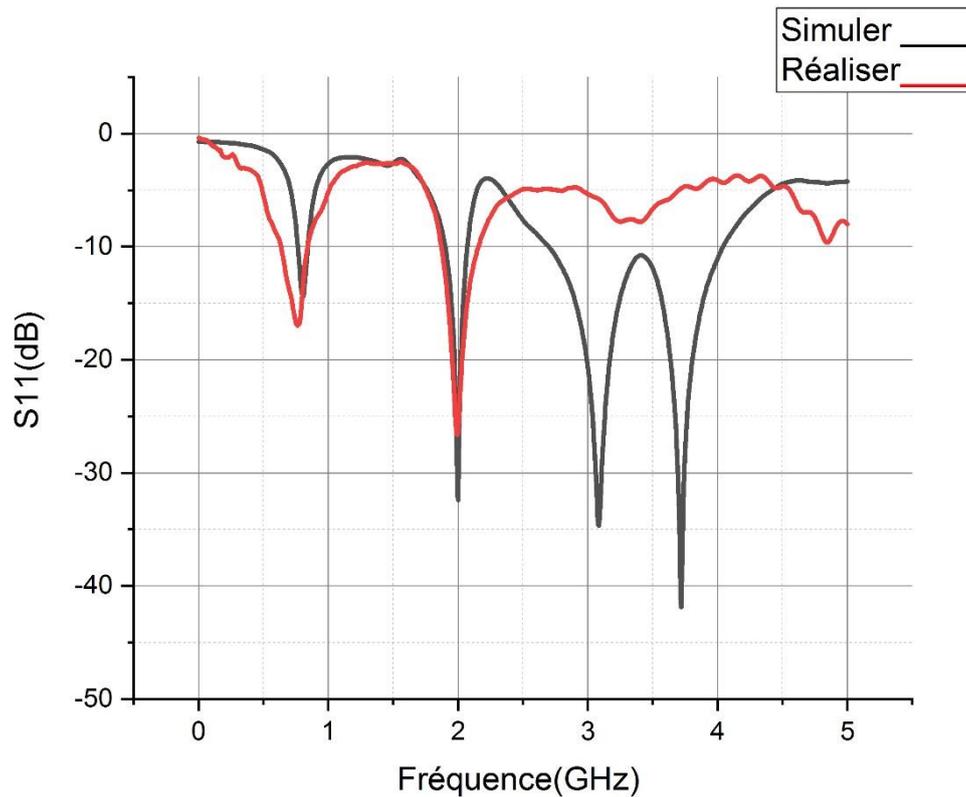


Figure 3.10: Comparaison entre le S_{11} simulé et mesuré.

On remarque d'après cette figure que les résultats de mesure et de simulation sont quasiment identiques pour les deux premières bandes [0.6-0.9] [1.8-2.1] GHz. A partir de la fréquence 2.5GHz on constate que les résultats de mesure et de simulation ne sont pas en concordance. Cette différence est peut être liée :

- ✓ Au défaut de précision de la machine de gravure lors de la fabrication.
- ✓ A L'emplacement du connecteur SMA
- ✓ A la qualité de soudure.

Ces résultats restent satisfaisants pour notre application GPR car l'antenne reste bi-bande, une bande inférieure à 1GHz et la deuxième bande autour de 2GHz. Cette dernière va nous permettre de mesurer le diagramme de rayonnement.

3.9.2 Mesure du diagramme de rayonnement

Le banc de mesure de diagramme de rayonnement est présenté dans la figure 3.11. La mesure est réalisée :

- A la fréquence de 2 GHz.

- Dans deux positions (verticale, horizontale).



Figure 3.11: Banc de mesure de diagramme de rayonnement.

Les résultats du diagramme sont montrés dans les tableaux suivants :

- Plan E :

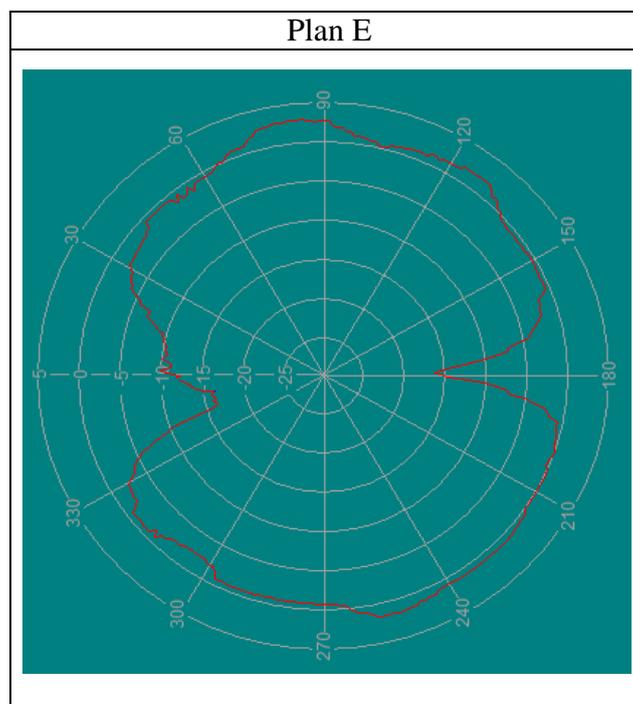


Tableau 3: Diagramme de rayonnement en plan E.

La figure dans le tableau 3 montre que l'antenne est quasi-omnidirectionnelle qui rayonne dans toutes les directions sauf les deux directions de 0° et 180° .

- Plan H :

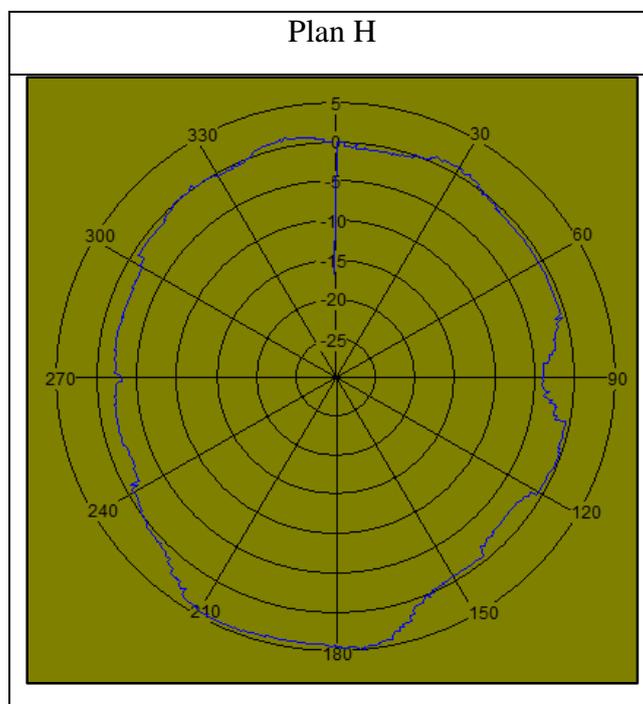


Tableau 4: *Diagramme de rayonnement en plan H.*

La figure dans le tableau 4 montre que l'antenne est omnidirectionnelle qui rayonne dans toutes les directions.

Les résultats obtenus par la simulation de diagramme de rayonnement autour la même fréquence 2 GHz :

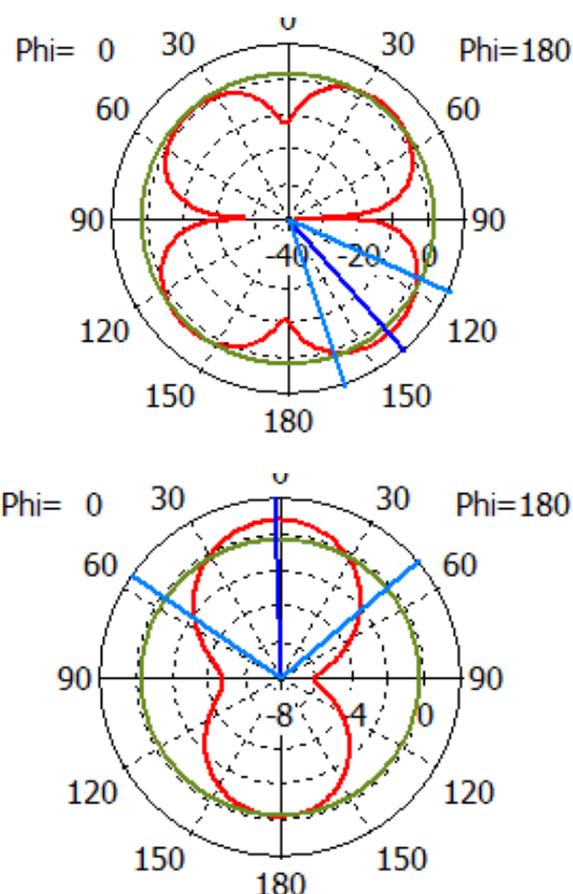


Figure 3.12: Les diagrammes de rayonnement simulés.

D'après l'observation des tableaux (3 et 4) et la figure 3.12 qui présentent les diagrammes rayonnement mesurées, ainsi que simulés, nous remarquons que ces diagrammes des rayonnements ont presque la même forme de distribution d'énergie dans les deux plans avec une atténuation dans quelques ongles, on peut lier cette atténuation par le bruit et les rayonnements externes dans la salle des mesures.

3.9.3 Test de la pénétration de l'antenne GPR

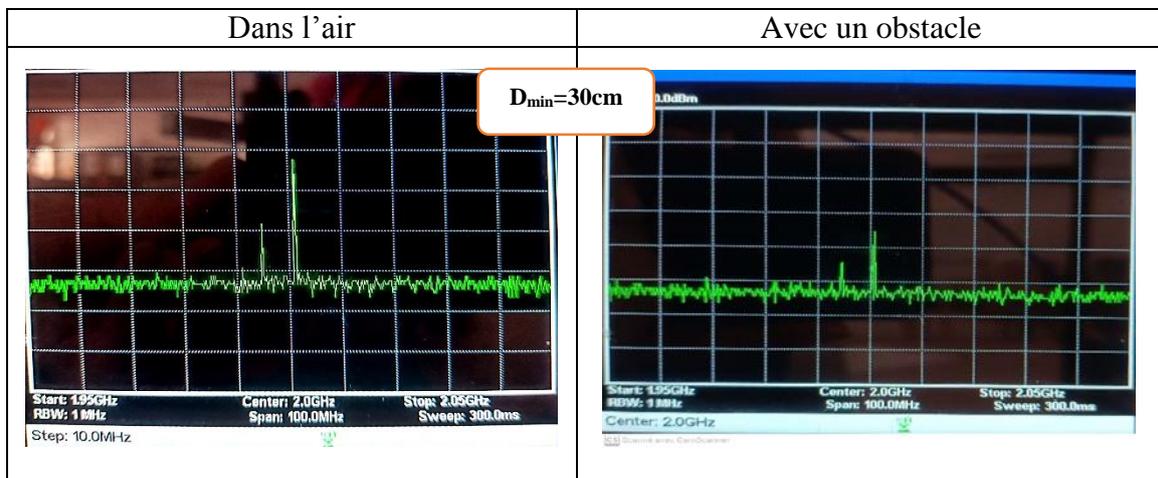
Dans ce test on cherche à étudier la portée de notre antenne dans le vide (Air) avec et sans obstacle, nous avons utilisé le banc de test (Figure 3.13) composé de :

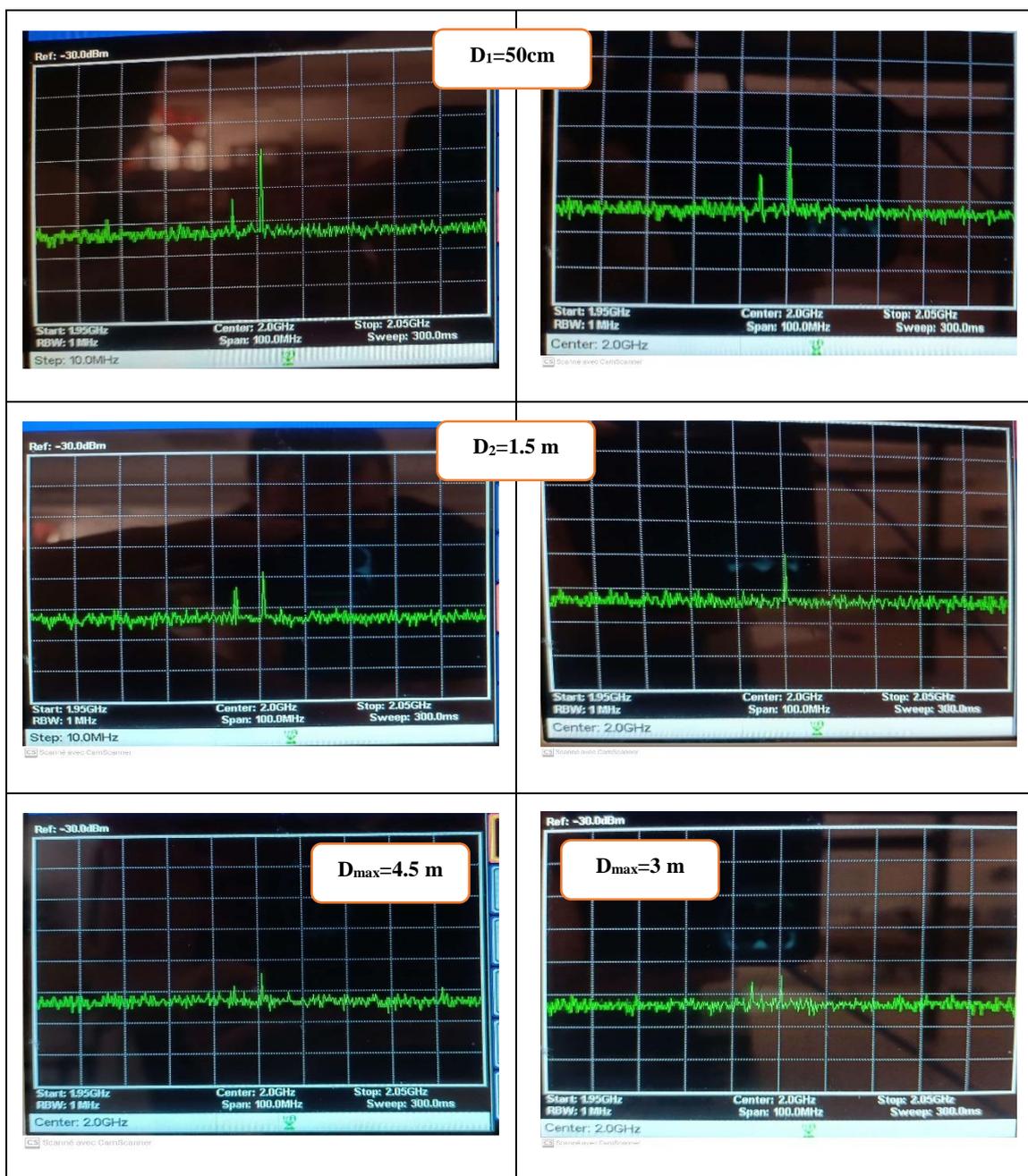
- ✓ Analyseur de fréquence [150KHz- 3GHz].
- ✓ Générateur de fréquence 2GHz.
- ✓ Un obstacle (boite remplie de sable)



Figure 3.13: Banc de test de pénétration.

Les résultats obtenus avec différents distance :





Le tableau suivant résume les résultats obtenus en termes de puissance reçu au niveau de l'analyseur de spectre en fonction de la distance

La distance	Puissance dans l'air (dBm)	Puissance avec un obstacle (dBm)
$D_{\min}=30$ cm	30	15
$D_1=50$ cm	21	14
$D_2=1.5$ m	11	10
$D_{\max}=(\text{air}=4.5 \text{ m}/\text{obs}=3\text{m})$	5	5

Tableau 5: les valeurs de puissance pour différentes distances.

Les résultats de ce test montrent que notre antenne rayonne bien même avec la présence d'un obstacle. Aussi la puissance transmise de notre antenne est capable de pénétrer à travers l'obstacle quel que soit la distance.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle antenne patch destinée à des applications GPR. La simulation, la réalisation et la caractérisation de l'antenne optimisée sont présentées et discutées. Un accord entre les résultats obtenus par la simulation et ceux obtenus par la mesure a été obtenu. En générale les résultats des mesures montrent que le modèle proposé satisfait les critères demandés par les applications GPR. Les résultats de test de pénétration restent primaires et encourageants.

Bibliographie

[1]<https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/>

[2]https://www.lpkf.com/en/productfinder/?tx_burgproductfinder_productfinder%5BselectedTechnology%5D=20&tx_burgproductfinder_productfinder%5BselectedApplication%5D=#c-product-finder

Conclusion générale

Les antennes patch planaires ont attiré beaucoup d'attention pour les systèmes de communication sans fil en raison de leur faible coût de fabrication et de leur capacité d'adaptation aux configurations requises en termes de forme et de taille. Aussi, il est hautement souhaitable de concevoir des antennes multi-bandes pour répondre aux besoins de plusieurs normes de communication avec des performances adaptées. Par ailleurs, pour l'application GPR, de nombreuses antennes ont été citées dans la littérature pour couvrir une telle application. Cependant, la majorité d'entre eux sont UWB. Pour certains systèmes GPR, des antennes multi-bandes sont nécessaires pour la détection des objets enterrés à différentes profondeurs. De plus, le niveau de fréquence est le facteur clé pour la pénétration du signal. De nombreuses antennes ont été proposées pour les applications GPR, mais la plupart d'entre elles fonctionnent à des fréquences plus élevées et/ou ont une conception complexe.

Dans ce sens, Le but de ce travail est de concevoir une antenne patch multi-bande pour des applications GPR. Afin d'atteindre notre objectif, nous avons effectué des simulations poussées à l'aide du logiciel CST. Les résultats des simulations ont permis de concevoir une antenne optimale avec une nouvelle géométrie moins complexe à caractère multi-bande et qui couvre la gamme UHF.

L'antenne est réalisée sur un substrat FR4 avec une taille globale de 9x9x0.15 cm³. L'antenne fonctionne entre deux bandes centrées à environ 0,8 GHz et 2 GHz. L'antenne présente une bonne adaptation d'impédance entre les deux bandes 0,6-0,9 GHz et 1,8-2,1 GHz. De plus, l'antenne proposée peut fournir de bons diagrammes de rayonnement, un gain suffisant et une efficacité de rayonnement élevée aux deux fréquences de résonance. Les résultats du test de pénétration ont montré que l'antenne est un candidat efficace pour une application GPR qui nécessite des fréquences plus basses pour une bonne pénétrabilité.