

جمهورية الجزائر الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : **GAMAZ SIHEM** et **GHELLAI SOUMIA**

Sujet

RADAR MONOSTATIQUE POUR LA DETECTION DES OBJETS MOBILES.

Soutenu publiquement, le **12 / 09 / 2020**, devant le jury composé de :

Mr F.T BENDIMERAD	Professeur Univ. Tlemcen	Président
Mr. S.M MERIAH	Professeur Univ. Tlemcen	Encadrant
Mr. F. DERRAZ	Maître de Conférences Univ. Tlemcen	Examineur
Mr M. BOUSAHLA	Maître de Conférences Univ. Tlemcen	Examineur

Remerciements

Nos premiers *remerciements* vont à *Dieu* Tout Puissant qui nous a comblés de ses grâces et de ses bénédictions tout au long de notre vie.

Que toutes les personnes qui nous ont aidé durant l'élaboration de ce travail trouvent dans ces lignes l'expression de notre reconnaissance et notre profonde gratitude.

On tient à remercier notre encadreur **Mr MERIAH SIDI MOHAMMED** Professeur à l'université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen et directeur du laboratoire de Télécommunications de Tlemcen LTT.

Qui nous a toujours prodigué encouragements et conseils et nous a réservé un temps précieux tout au long de notre projet.

On tient aussi à exprimer notre gratitude à tous les membres du jury d'avoir consacré une partie de leur temps à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

On remercie vivement tous ceux qui nous ont assisté à développer nos compétences dans diverses disciplines tout au long de notre cursus.

Une pensée particulière va à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Enfin, on tient d'exprimer notre profonde gratitude à nos très chers familles **GHELLAI** et **GAMAZ** pour leurs compréhensions, leurs soutiens durant toutes ces années d'étude, et qui étaient toujours là pour nous et sans eux tout cela n'aurait pas été possible, on remercie aussi nos meilleures ami(e)s et toute nos familles.

Il est difficile d'exprimer tout ce que on leur doit.

Ce mémoire est aussi le leur

Résumé

Dans ce travail, on se concentre sur l'étude et l'analyse de système RADAR monostatique. On rappelle le principe de fonctionnement du système radar, ainsi que les différents types de ce système. Nous avons aussi étudié les différentes formes d'onde et la fonction d'ambiguïté etc... Et on s'est intéressé aux antennes et réseaux d'antennes pour système RADAR.

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons étudié et analysé sous le logiciel Matlab un système RADAR monostatique à impulsions. Cette analyse nous a permis de développer un modèle informatique de simulation de toute la chaîne composant ce type de RADAR.

Les mots clés : Système RADAR, RADAR mono-statique, Antenne isotropic, Formes d'onde, Fonction d'ambiguïtés, détection de cible.

Abstract

This work focuses on the study and analysis of monostatic RADAR systems. The operating principle of the radar system is recalled, as well as the different types of this system. We also studied the different waveforms and the *ambiguity function etc...* And we were interested in antennas and antenna arrays for RADAR systems.

In this end-of-study project, we studied and analysed a monostatic pulse RADAR system using MATLAB software. This analysis enabled us to develop a computer model for the simulation of the whole chain composing this type of RADAR.

Key words: RADAR system, monostatic RADAR, Isotropic antenna, Waveforms, Ambiguity function, Target detection.

ملخص

في هذا العمل ، نركز على دراسة وتحليل أنظمة الرادار الأحادي. نتذكر مبدأ تشغيل نظام الرادار ، وكذلك الأنواع المختلفة لهذا النظام. كما درسنا الأشكال الموجية المختلفة ووظيفة الغموض وما إلى ذلك ... وألقينا نظرة على الهوائيات ومصفوفات الهوائيات لنظام الرادار.

في مشروع نهاية الدراسة هذا ، قمنا بدراسة وتحليل نظام رادار نابض أحادي باستخدام برنامج Matlab. سمح لنا هذا التحليل بتطوير نموذج محاكاة حاسوبي للسلسلة بأكملها التي تشتمل على هذا النوع من الرادار.

الكلمات المفتاحية: نظام الرادار ، الرادار أحادي السكون ، هوائي الخواص ، الأشكال الموجية ، وظيفة الغموض ، كشف الهدف.

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	II
ملخص.....	II
Table des matières	III
Liste des figures	VIII
Liste des Tableaux.....	X
Liste des abréviations	XI
Liste des symboles et notations	XII
Introduction générale.....	XIII
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les Radars.	
1.1 Introduction :	3
1.2 Définition :	3
1.3 Principe de fonctionnement :	4
1.4 Différents types de radar :	5
1.4.1 Radar à impulsions :	6
1.4.2 Radar à ondes continues modulées en fréquence (FMCW) :	7
1.4.3 Radar Doppler :	8
1.4.4 Radar à ondes pulsées et continues (CW) :	9
1.4.5 RADAR Ultra Large Bande ULB :	11
1.4.5.1 Radar ULB à impulsions :	14
1.5 Equation du radar :	15
1.6 Caractéristiques techniques du RADAR :	16

1.6.1	Portée (Range) :	16
1.6.2	Portée maximale ‘Rmax’ :	17
1.6.3	Résolution de la portée :	18
1.6.4	Distance minimale de détection :	19
1.6.5	Fréquence Doppler :	19
1.6.6	Vitesse de la cible :	20
1.6.7	Section transversale du radar (RCS) :	20
1.6.8	Fréquence de répétition des impulsions FRI :	20
1.6.9	Probabilité de fausse alerte :	22
1.6.10	Probabilité de détection :	23
Chapitre 2 : Les formes d'ondes d'un système Radar.		
2.1	Introduction :	25
2.2	Les composants de système radar :	25
2.2.1	L'émetteur :	26
2.2.1.1	Les paramètres de l'émetteur :	26
2.2.2	Le modulateur :	27
2.2.3	Le duplexeur :	27
2.2.4	L'antenne :	27
2.2.5	Les ondes électromagnétiques :	27
2.2.6	La cible :	28
2.2.7	Le récepteur :	28
2.2.8	Le traitement :	29
2.2.8.1	Traitement de signal :	29
2.2.8.2	Traitement de données :	29
2.2.9	Synchronisateur :	29
2.2.10	L'affichage radar :	30
2.2.11	Filtre adapté :	30

2.3	La fonction d'ambiguïté :	30
2.3.1	Définition :	30
2.3.2	Propriétés de la fonction d'ambiguïté :	31
2.3.3	Le diagramme de la fonction d'ambiguïté :	31
2.4	Les formes d'onde :	32
2.4.1	Importance de choix des formes d'ondes :	32
2.4.1.1	Performance :	33
2.4.1.2	Facteurs de choix des formes d'onde :	33
2.4.2	Conception et analyse de la forme d'onde :	34
2.4.2.1	Forme d'onde rectangulaire :	35
2.4.2.2	Modulation de fréquence linéaire (LFM) :	37
2.4.2.3	forme d'onde a impulsion FM echlonnée (Stepped FM) :	39
2.4.2.4	Forme d'onde constante de modulation de fréquence (FMCW) :	41
2.4.2.5	Formes d'onde codées en phase :	42
2.4.3	Comparaison des caractéristiques de base :	44
Chapitre 3 : Antenne et réseaux d'antennes pour systme Radar.		
3.1	Introduction :	45
3.2	Définition :	45
3.2.1	Caractéristiques électriques des antennes :	46
3.2.2	Rôles des antennes :	53
3.3	Simulations d'une antenne sous Matlab :	53
3.3.1	Radiateur et collecteur :	54
3.3.2	Antenne isotrope :	54
3.3.3	Radiateur à phases :	58
3.3.4	Collecteur progressif (Phased.collector) :	59
3.4	Réseau d'antenne :	59
3.4.1	Principe :	60

3.4.2	Alimentation d'un réseau d'antennes :	61
3.4.3	Réseaux d'antennes uniformes :	61
3.4.4	Réseau d'antennes linéaire ULA :	62
3.5	Simulations des réseaux d'antennes sous Matlab :	63
3.5.1	Réseaux d'antennes linéaire :	63
3.5.2	Réseaux d'antennes à commande de phase (Phasedarray) :	64
3.5.3	Réponse azimutale d'un réseau d'antennes linéaire ULA :	65
Chapitre 4 : Analyse d'un système Radar Monostatique.		
4.1	Introduction :	68
4.2	Les spécifications de conception :	68
4.3	Déclaration des principaux paramètres :	69
4.4	Configuration du radar mono-statique :	69
4.4.1	L'étape de configuration des paramètres du radar :	69
4.4.1.1	Génération de la Forme d'onde :	69
4.4.1.2	Les Caractéristiques du bruit du récepteur :	69
4.4.1.3	Emetteur :	70
4.4.1.4	Radiateur et collecteur :	70
4.4.1.5	Le traitement après configuration :	70
4.4.2	L'étape de simulation du système :	71
4.4.2.1	Cibles :	71
4.4.2.2	Environnement de propagation :	71
4.4.2.3	Synthèse des signaux :	71
4.4.2.4	Détection de la portée :	71
4.5	L'équation d'Albersheim :	72
4.6	Résultats d'exécution du programme Radar Mono-Statique :	72
4.6.1	Génération de la courbe ROC :	72
4.6.2	La détection des cibles :	74

4.6.2.1 Seuil de détection :	74
4.6.2.2 Filtre adapté :.....	75
4.6.2.3 Amélioration de la détection en utilisant un gain variant dans le temps :.....	76
4.6.2.4 Intégration des impulsions non cohérente :.....	76
4.6.2.5 La détection :.....	77
Conclusion Générale	78
Références bibliographiques	79

Liste des figures

Figure 1-1 : une idée de base de radar.....	4
Figure 1-2 : schéma fonctionnel du radar.....	5
Figure 1-3 : les types de radar.	6
Figure 1-4 : le plus simple alimente pour radar à impulsions.....	6
Figure 1-5 : (a) Descriptions des entrées et (b) photographie du LNA.....	7
Figure 1-6 : le fonctionnement du radar FMCW.....	8
Figure 1-7 : le fonctionnement du radar FMCW.....	9
Figure 1-8 : Radar à ondes CW utilise deux antennes souvent.....	10
Figure 1-9 : Relation entre les impulsions et les échos.	11
Figure 1-10 : Principe du radar ULB temporel.	12
Figure 1-11 : Schéma simplifié du rayonnement d'une impulsion.	13
Figure 1-12 : Illustration d'un radar à impulsions avec échantillonnage en temps réel ou séquentiel.....	14
Figure 1-13 : Concept de portée radar.....	16
Figure 1-14 : Train d'impulsions émises et reçues.	17
Figure 1-15 : Effet du mouvement de la cible sur les formes d'onde de l'équipase	19
Figure 1-16 : Définitions des composantes de l'impulsion radar.....	21
Figure 2-1: Les différents composants de système radar.	25
Figure 2-2 : Signal amplifié.	29
Figure 2-3: Le diagramme de la fonction d'ambiguïté.	32
Figure 2-4: Forme d'onde à impulsion rectangulaire.....	35
Figure 2-5: Une forme d'onde rectangulaire idéale.....	36
Figure 2-6 : Forme d'onde train d'impulsions.	37
Figure 2-7: Forme d'onde impulsion modulée linéairement en fréquence.	38
Figure 2-8 : Exemple Forme d'onde impulsion modulée linéairement améliorée.....	39
Figure 2-9 : exemple Stepped FM.....	40
Figure 2-10 : Forme d'onde constante de modulation de fréquence (FMCW).....	41
Figure 2-11 : exemple d'une Forme d'onde codées en phase.	43
Figure 3-1 : Structure générale d'une antenne.	45
Figure 3-2 : Diagramme de rayonnement d'une antenne.....	46
Figure 3-3 : Circuit équivalent d'antenne.	49
Figure 3-4 : Polarisation du champ électromagnétique.....	51

Figure 3-5 : Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace.	53
Figure 3-6 : Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace.	55
Figure 3-7 : coupe en azimut de la directivité d'antenne.	56
Figure 3-8 : coupe en azimut de la puissance d'antenne.	56
Figure 3-9: Modèle de réponse en 3D.	57
Figure 3-10 : coupe en azimut.	57
Figure 3-11 : coupe en azimut avec plage réduite.	57
Figure 3-12 : schéma électrique représentant la formation de faisceau d'un réseau d'antenne.	61
Figure 3-13 : réseau linéaire d'un dipôle d'antenne.	62
Figure 3-14 : Géométrie d'un réseau linéaire uniforme.	62
Figure 3-15 : Géométrie d'un réseau d'antennes ULA à 7 éléments espacés de 0.5 m.	63
Figure 3-16 : Le modèle 3D du réseau montre le maximum du faisceau à un angle azimutal de 90 degrés, Tracer un diagramme de rayonnement en 2D.	64
Figure 3-17 : un balayage du faisceau s'effectue à 30 degrés.	65
Figure 3-18 : un réseau linéaire de 6 éléments espacés de 0.5 lambda.	66
Figure 3-19 : un réseau linéaire de 6 éléments espacés de 0.8 lambda.	67
Figure 4-1: les courbes des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) Non fluctuante.	72
Figure 4-2 : les courbes des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) après intégration de 10 impulsions.	74
Figure 4-3 : Les impulsions reçues avec seuil.	75
Figure 4-4 : Représentation des deux impulsions avec filtre adapté.	75
Figure 4-5 : Présentation des deux mêmes impulsions après la normalisation de la portée. ...	76
Figure 4-6 : Intégration des deux impulsions de manière non cohérente.	77

Liste des Tableaux

Tableau 2-1 : Comparaison entre les caractéristiques des formes d'ondes.....	44
Tableau 4-1: Comparaison entre distance estimée et distance réelle.	77

Liste des abréviations

<i>Acronyme</i>	<i>Signification</i>
Radar	Radio Detection And Ranging.
FRI	périodes de répétition des impulsions.
Echo	phénomène de réflexion d'ondes sonores sur un obstacle.
CW	Ondes continues.
PRF	Fréquence de répétition des impulsions.
LNA	Amplificateur à faible bruit.
FMCW	Ondes continues moduler en fréquence.
DFT	La transformation de fourrier discrète.
RCS	Section Transversale du Radar.
IPP	période entre deux impulsions.
MTI	Visualisation des cibles mobile (Moving Target Indicator).
P_{fa}	La probabilité d'une fausse alerte.
P_D	La probabilité de détection.
SNR	Le rapport signal/bruit.
ROC	Courbes caractéristiques de fonctionnement du récepteur.
OEM	Onde électromagnétique.
SER	Surface équivalent radar.
CFAR	Constant False Alarm Rate.
PPI	Position du Plan Indicateur.
LFM	Modulation de fréquence linéaire.
FM	Modulation de fréquence.
UWB	Ultra Wide bande.
RL	Retun Loss
ULA	Uniform Linear Array (Réseau Uniforme linéaire)
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (rapport d'ondes stationnaires de).

Liste des symboles et notations

Symbole	Signification	Unité
τ	Durée de l'impulsion.	s
Tr	Période de répétition	s
F0	La fréquence du signal	hz
Vr	La vitesse radiale.	Rad/s
PRF	La fréquence de répétition des impulsions	hz
Fd	Le décalage de fréquence Doppler	hz
Pd	La densité de puissance	W/m ²
D	Distance antenne-cible.	m
C	La vitesse de la lumière.	m/s
Δt	Le temps mesuré par le radar.	s
τ	Durée de l'impulsion.	s
TP	La période de répétition d'impulsion.	s
Fd	La fréquence Doppler.	MHz
σ	La surface équivalente radar.	m ²
Pr	Puissance reçue.	W m ²
λ	La longueur d'onde en L'espace libre.	m
Ae	La surface effective de l'antenne.	m ²
D	La directivité de l'antenne	Dbi
G	Le gain de l'antenne.	Sans unité
Pt	Puissance transmise.	w
Rmax	Porté maximale.	m
E	Champs Electrique.	v/m

Introduction générale

Introduction Générale

Depuis l'invention du radar qui était inventer par les militaires, il est devenu une stratégie fondamentale dans les systèmes de détection des militaires du XX siècle. Dès le début de ce siècle, plusieurs inventeurs, scientifiques et ingénieurs ont contribué au développement du système radar.

Le radar est l'un des dispositifs les plus performant du 21ieme siècle. Le principe du radar est basé sur la propagation des ondes électromagnétiques ou plus exactement sur celle des ondes radiofréquences (RF), pour détecter les objets mobiles et déterminer leur trajectoire, leurs vitesse leur point du contact le plus proches, et d'autres données, ainsi pour faciliter le traitement en vue de la détection, le signal émis par l'émetteur du radar possède certaines caractéristiques qui définissent ce que l'on appelle la forme d'onde.

Aujourd'hui, l'utilisation du radar s'est étendue à d'autres domaines que le domaine militaire. On l'utilise dans le contrôle maritime, la détection météorologique, l'aviation civile, l'astrométrie et le contrôle du trafic routier (détecteurs de vitesse sur les routes), pour prévention sur les moyens de transport pour vérifier l'existence d'une cible, il est nécessaire de pouvoir relier le signal qu'elle réfléchit à la forme d'onde émise. Pour déterminer quel est le signal utile émis le plus adapté pour améliorer les spécifications du radar souhaitées (compromis entre la précision de la vitesse et de la distance de la cible détectée) on se base sur l'utilisation d'une fonction appelée fonction d'ambiguïté.

Notre travail dans ce mémoire de recherche comporte quatre principaux chapitres:

Dans le premier chapitre, nous faisons une étude générale sur les radars en rappelant leur théorie et leur principe de fonctionnement aussi en évoquant leurs différents types et les différentes caractéristiques du radar.

Le deuxième chapitre se propose de présenter les composants du systèmes radar. Puis une définition sur la notion de fonction d'ambiguïté ses principales propriétés, les principaux facteurs sur lesquels est basé. Ainsi qu'une étude détaillée sur plusieurs formes d'onde sous le logiciel Matlab.

Le troisième chapitre présente une étude sur les antennes puis une extension de cette étude au réseau d'antenne. On se base dans notre étude sur l'utilisation de Antenna Toolbox du logiciel Matlab avec lequel on peut analyser ses paramètres.

Dans le quatrième chapitre de ce manuscrit, on s'intéresse au développement d'un radar mono-statique sous le logiciel MATLAB. Ce programme va nous permettre d'analyser les performances de notre système radar en se basant principalement sur la programmation des différentes fonctions (ou composants) de la chaîne de transmission RADAR.

Le manuscrit se termine, par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1 :Généralités sur les Radars.

1.1 Introduction :

Le radar a été conçu pour remplir deux fonctions : la détection d'une cible et l'estimation de la distance séparant le radar de celle-ci. Son principe de base repose sur l'émission d'ondes électromagnétiques qui, après réflexion sur tout obstacle, sont captées par un récepteur pour être traitées (figure 1.1). Depuis de nombreuses années, le radar est capable d'estimer d'autres paramètres liés à la cible tels que sa vitesse radiale relative et sa localisation angulaire, à savoir l'azimut et l'élévation. Pour cette raison, il est utilisé dans de nombreux domaines : la surveillance du trafic aérien ou routier, la météorologie, l'automobile, l'astronomie, etc...

Nous présentons dans ce chapitre une généralité sur les radars, tout en expliquant graduellement l'équation radar qui relie la puissance émise versus celle retournée par les cibles, ainsi que les différents paramètres utiles pour la détection de la cible, tels que : la portée maximal (Maximum Range) R_{max} , la résolution de la portée, la fréquence Doppler, la fréquence de répétition des impulsions FRI, la Probabilité de fausse alerte, et la Probabilité de détection. Nous présentons aussi dans ce chapitre le radar ultra large bande.

1.2 Définition :

Le mot radar est un acronyme ' ' RAdio Detection And Ranging ' ' que l'on peut traduire par « détection et estimation de la distance par ondes radio », « détection et télémétrie radio », ou plus simplement « radiorepérage », est un instrument de télédétection active qui génère des d'ondes électromagnétique de fréquences données. Il utilise des antennes directives pour transmettre l'énergie électromagnétique.

Le radar a vu le jour en tant qu'instrument de détection des objets (cibles). Il émet des ondes électromagnétiques sous formes de micro-ondes qui voyagent à la vitesse de la lumière ; celles-ci sont réfléchies par les objets qu'elles frappent. Ces échos (retours radar) sont ensuite traités par le récepteur radar pour extraire des informations sur la cible telles que la portée, la vitesse, la position angulaire et d'autres caractéristiques d'identification de cible. Le temps qui s'écoule entre l'émission et la réception des signaux, divisé par deux et multiplié par la vitesse de la lumière, donne la mesure de la distance entre l'émetteur et la cible.

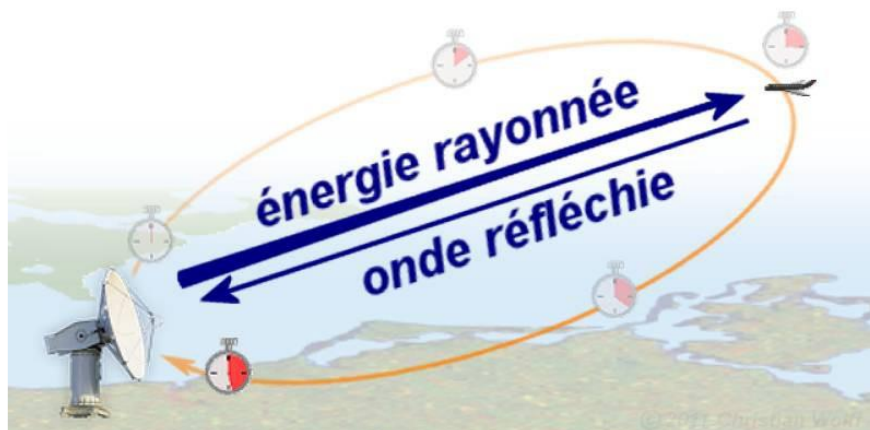


Figure 1-1 : une idée de base de radar.

1.3 Principe de fonctionnement :

Comme la figure 1.2 le montre, le radar utilise des impulsions d'énergie électromagnétique. Le signal hyperfréquence est émis en direction de la cible. Une petite partie de l'énergie transmise est réfléchi par la cible dans la direction du radar. Cette énergie renvoyée par la cible jusqu'au radar est appelée ECHO, exactement comme lorsque l'on considère les ondes sonores. Un radar utilise l'écho afin de déterminer la direction, la distance et l'emplacement de l'objet qui a réfléchi son signal.

Le schéma ci-dessous illustre les différentes fonctions exercées par un radar et son fonctionnement, on peut le décrire en terme assez simple. Lorsqu'on dit allumer un radar et envoyer une impulsion, la première des choses à faire est de générer une forme d'onde puis de l'amplifier dans l'émetteur, après elle passe à un commutateur qui permet à l'énergie d'impulsion de sortir vers l'antenne pour détecter s'il y a une cible dans l'espace, et lorsque l'énergie rayonnée (émise) frappe la cible une partie sera réfléchi vers le radar. L'émetteur est éteint juste après la transmission de l'impulsion, et le récepteur écoute les échos le plus loin de la cible est le plus long, donc le temps de retour avant l'écho d'une cible est reçu, c'est une mesure de la distance entre le radar et la cible afin que l'antenne recueille une très petite énergie. Puis elle va dans le récepteur pour le traitement de ces données afin d'optimiser la capacité de détection de la cible. Ensuite cet écho va se transformer du domaine analogique au numérique avec un convertisseur analogique/numérique, puis va entrer dans un processus de signal où l'écho cible va être traité pour obtenir une meilleure résolution, après nous passons

au processus de compression d'impulsions de manière optimale pour continuer le traitement des données et voir s'il y'a un décalage de fréquences de l'écho de retour, et mesurer directement la vitesse de la cible, ensuite ces données numériques vont passer dans un processus de détection où nous allons voir quel objet est supérieur à une taille de seuil pour dire que c'est une cible passant par la suite à un dernier processus appelé suivi et estimation des paramètres où nous gardons une trace d'un ensemble d'impulsion à une autre des cibles de détection et les corrélés à partir d'un balayage du radar à un autre ensemble d'impulsions afin que nous puissions dire que tous cet ensemble de détections à ces différents moments sont tous de la même entité physique réelle dans l'espace et obtenir une très bonne estimation de la portée et du roulement et de la vitesse, à la fin ces données sont affichées sur une console et les enregistrées à fin que nous puissions comprendre plus tard ce qui se passe avec le radar.

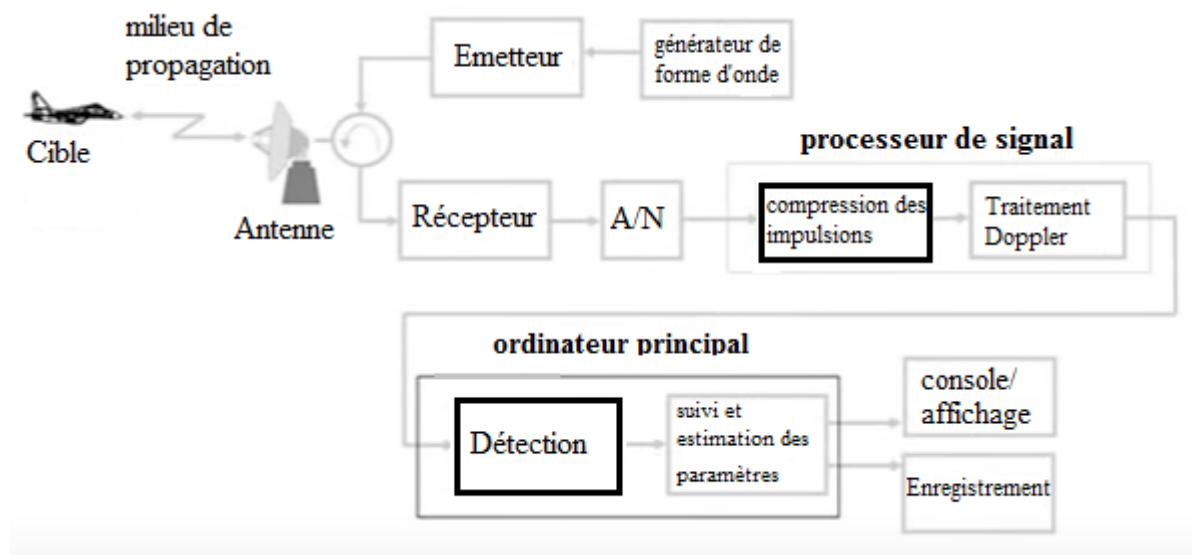


Figure 1-2 : schéma fonctionnel du radar.

1.4 Différents types de radar :

Il existe différents types de RADAR (figure 1.3), tels que :

- Radar à impulsions.
- Radar à ondes continues modulées en fréquence (FMCW).
- Radar Doppler.
- Radars à ondes pulsées et continues (CW).
- Radar Ultra Large Bande (ULB)

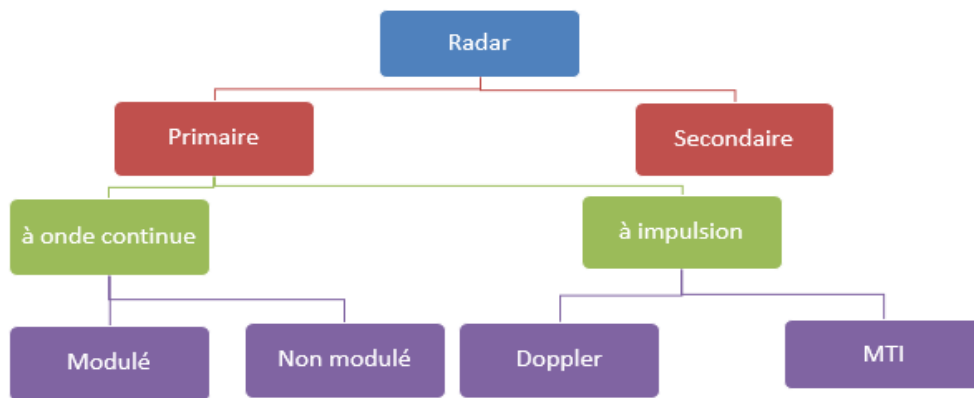


Figure 1-3 : les types de radar.

1.4.1 Radar à impulsions :

Ce type de radar émet périodiquement un signal formé d'impulsions d'ondes radio très brèves et puissantes dans le temps. Les ondes radioélectriques sont donc émises dans l'espace par des impulsions répétitives à des intervalles réguliers appelés périodes de répétition des impulsions TR (Pulse Repetition Interval, PRI). La PRI du radar est un paramètre important dans le calcul de la distance maximale de détection (D_{max}) car les échos qui reviennent au radar après un temps supérieur à la PRI apparaissent sur le scope à des positions erronées (distances fausses) [1]. La figure (1.4) nous montre le principe de fonctionnement de ce radar. Le générateur d'impulsions crée une impulsion de durée τ et de la répétée dans chaque période T_r seconde ($T_r = 1 / PRF$), PRF (Fréquence de répétition des impulsions) [2].

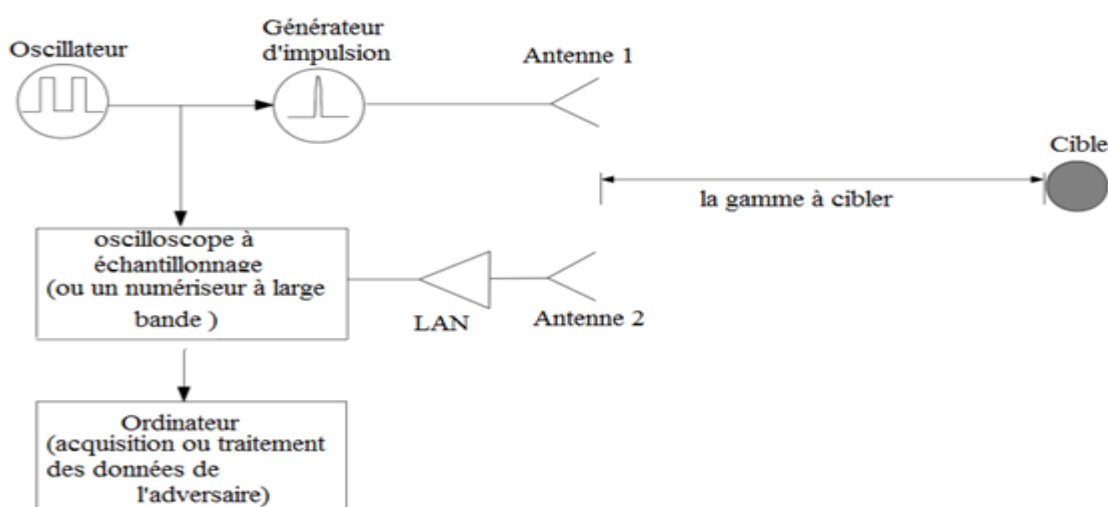


Figure 1-4 : le plus simple alimente pour radar à impulsions.

Les systèmes de radar à impulsions courtes suivent généralement une architecture simple dans laquelle le générateur d'impulsions est souvent relié directement à une antenne d'émission et un amplificateur à faible bruit (LNA) est relié à une antenne de réception. Un numériseur à grande vitesse est déclenché par le générateur d'impulsions et acquiert des données sur la sortie du LNA [3].

Le principal rapport en gain dans une chaîne d'amplification est l'amplificateur à faible bruit (LNA). La saturation de l'amplificateur et le facteur de bruit limitent son gain. Le rapport entre le signal (S) et le bruit en entrée (N_e) et celui à la sortie de l'amplificateur (N_s) :

$$N_F = \frac{S / N_e}{S / N_s} \tag{1.1}$$

L'utilisation d'un LNA hyperfréquence est plus intéressante qu'un amplificateur de puissance, car les facteurs de bruit augmentent généralement lorsque la fréquence diminue[4].

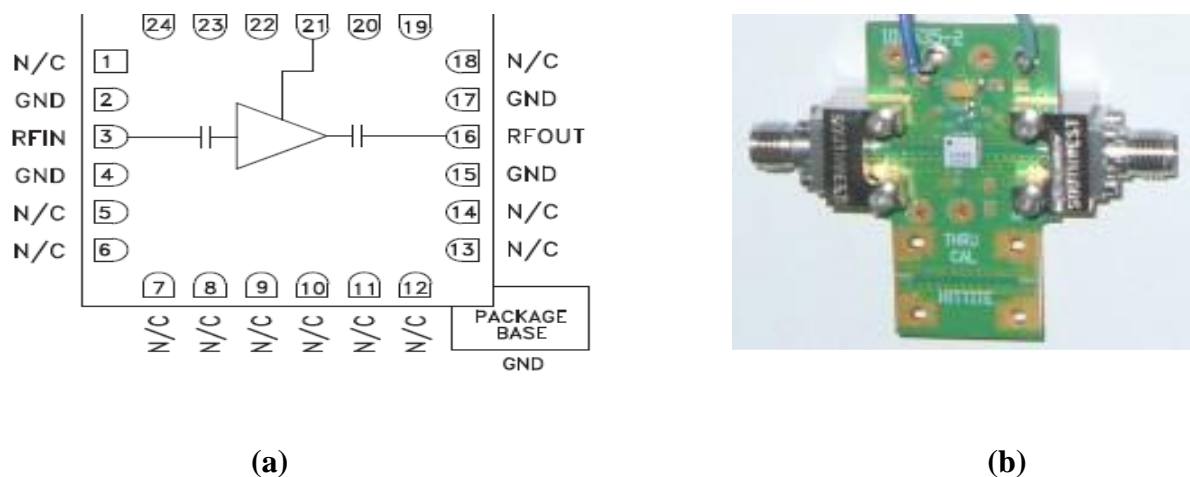


Figure 1-5 : (a) Descriptions des entrées et (b) photographie du LNA.

1.4.2 Radar à ondes continues modulées en fréquence (FMCW) :

Pour un radar FMCW, un oscillateur CW est modulé en fréquence avec une rampe linéaire. En d'autres termes, l'oscillateur CW démarre à une fréquence et monte en puissance jusqu'à une seconde sur une période de temps relativement longue (0,5-10 uS). Cette forme d'onde est émise par l'antenne d'émission vers la scène cible. Une partie de cette forme d'onde est transmise au mélangeur du récepteur. Ce qui est diffusé par la cible est amplifié par le LNA et introduit dans le mélangeur de réception où il est mélangé à la forme d'onde d'émission. Le produit du mélange

donne une tonalité de battement à basse fréquence (gamme de KHz) proportionnelle à la gamme. Plus la fréquence du battement est élevée, plus la cible est éloignée. Si la mesure d'une multitude de cibles s'attendent alors à voir se superposer une multitude de rythmes. Pour mesurer la distance aux cibles, vous numérisez avec un numériseur à faible bande passante en prenant soin de synchroniser le déclenchement du numériseur avec le début de la rampe montante. Avec ces données numérisées pour chaque rampe montante, appliquez le DFT. Il en résulte une représentation temporelle du temps aller-retour entre l'émetteur, les cibles et le récepteur [3]. Comme le montre la figure ci-dessous :

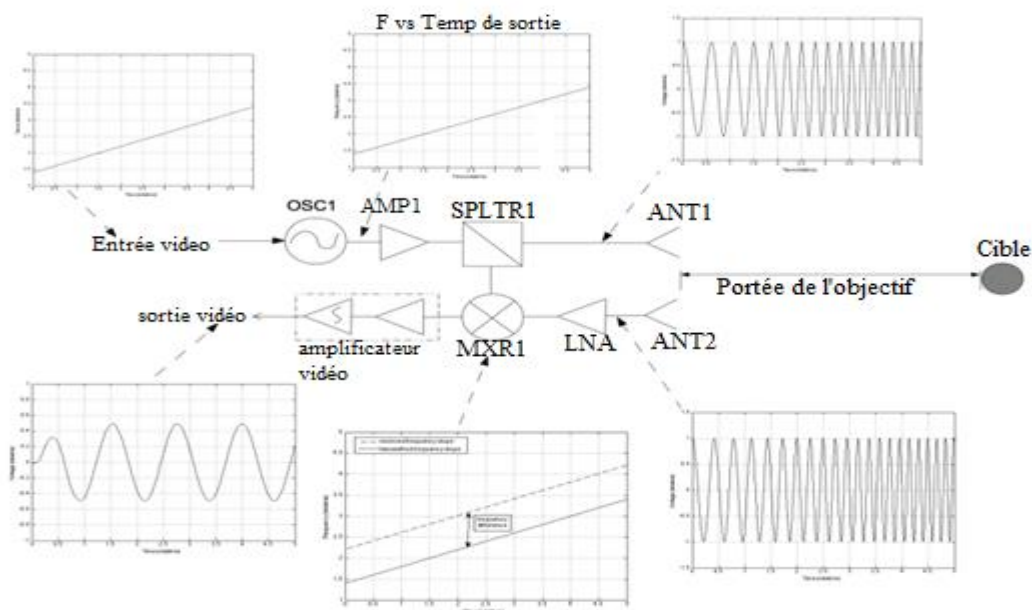


Figure 1-6 : le fonctionnement du radar FMCW.

1.4.3 Radar Doppler :

Un radar Doppler est un radar spécialisé qui utilise l'effet Doppler pour produire des données de vitesse sur des objets à distance. Pour ce faire, il fait reproduire un signal micro-ondes sur une cible souhaitée et analyse comment le mouvement de l'objet a modifié la fréquence du signal renvoyé. Si la fréquence réfléchi par l'objet déplacé sera positive, donc probablement l'objet s'éloigne du radar, et si la fréquence réfléchi sera négative cela signifie que l'objet se dirige vers le radar.

Si un émetteur radar envoie un signal à la fréquence f_0 et frappe la cible en mouvement, le signal renvoyé a la fréquence $f_0 + f_d$, où f_d est le décalage de fréquence Doppler donné par la relation suivante [5] :

$$f_d = \frac{2V_r}{C} f_0 \quad (1.2)$$

où c : est la vitesse de la lumière .

et v_r : est la vitesse relative de la cible perçue par le radar et il est donné par :

$$V_r = V_a \cos \theta \quad (1.3)$$

Comme la figure (1.7) nous montre, le radar Doppler CW fonctionne en alimentant la sortie d'un oscillateur CW à une antenne et en rayonnant cette porteuse vers une cible mobile. Cette porteuse diffuse la cible mobile vers l'antenne de réception où elle est amplifiée et alimente un mélangeur de fréquences. Le mélangeur mélange l'oscillateur et la porteuse diffusée, ce qui donne un produit de décalage Doppler. Ce produit est le décalage Doppler de la fréquence centrale de la porteuse et se situe généralement dans la gamme des KHz.

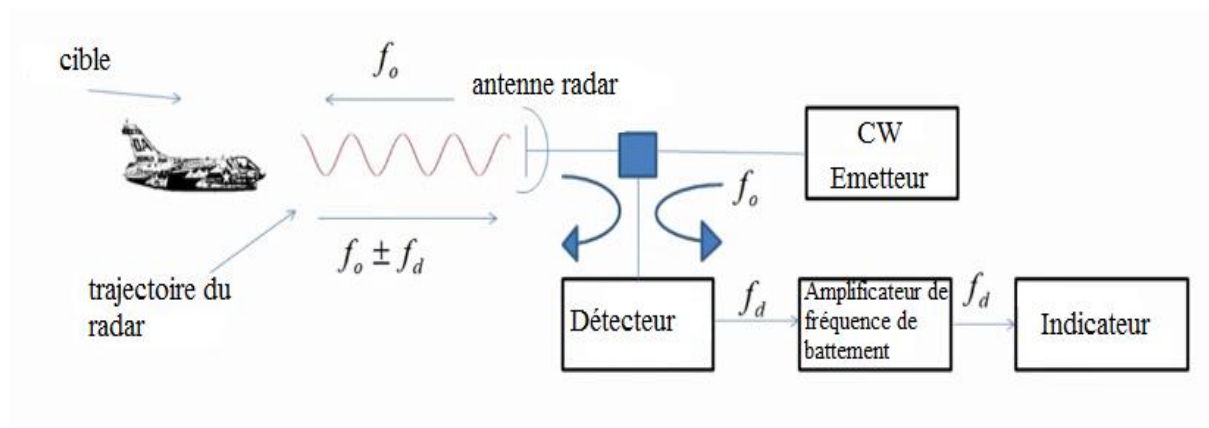


Figure 1-7 : le fonctionnement du radar FMCW.

1.4.4 Radar à ondes pulsées et continues (CW) :

Lorsque le type de forme d'onde est utilisé comme classificateur de systèmes radar, il existe deux types de radars ; systèmes radar à ondes pulsées et à ondes continues (CW). Les radars à ondes continues sont ceux qui émettent en continu de l'énergie électromagnétique et utilisent des antennes d'émission et de réception distinctes.

Il mesure le taux de changement de la portée de la cible en mesurant le décalage Doppler du signal de retour. Dans un radar CW, des radiations électromagnétiques sont émises à la place d'impulsions. Il est essentiellement utilisé pour la mesure de la vitesse. Les formes d'onde continues peuvent être considérées comme des ondes sinusoïdales pures de la forme $\cos(2\theta f_0)t$. Les radars CW non modulés peuvent mesurer avec précision la vitesse radiale cible (décalage Doppler) et position angulaire.

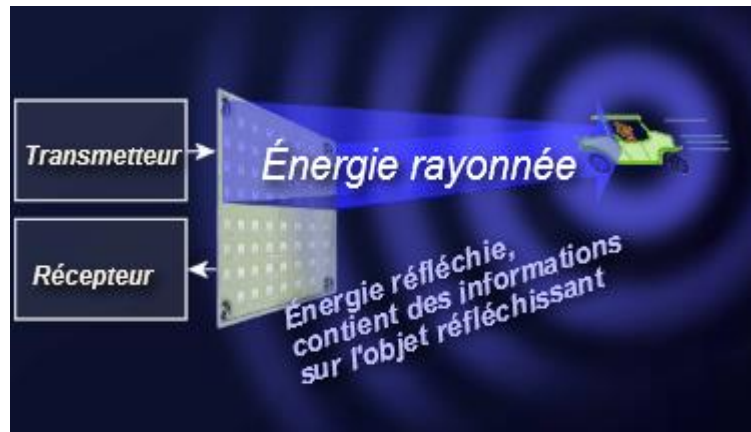


Figure 1-8 : Radar à ondes CW utilise deux antennes souvent.

Un radar pulsé est un appareil de télédétection qui émet des impulsions puis se met en mode écoute de l'écho renvoyé par les cibles dans l'environnement. Au contraire des radars à ondes continues, le transmetteur est mis hors-circuit durant le temps d'écoute. Cette méthode d'écholocation est caractérisée par la transmission d'impulsions de très courte durée τ de l'ordre de $\approx 0,1$ à $1 \mu\text{s}$ et d'un temps d'écoute T beaucoup plus long ($\gg \tau$) de l'ordre de 1 ms, comme démontré dans la figure 1.8. La distance à la cible est déterminée par le temps aller-retour du signal (pour un radar stationnaire) ou par la comparaison du spectre Doppler entre le signal émis et l'écho par rapport à la distance (pour un radar mobile). Les radars pulsés sont surtout conçus pour la détection à longue portée et émettent donc des impulsions très puissantes. Une différence importante avec les autres types de radar est la nécessité d'une coordination efficace du temps de chacun des processus dans le circuit du radar.

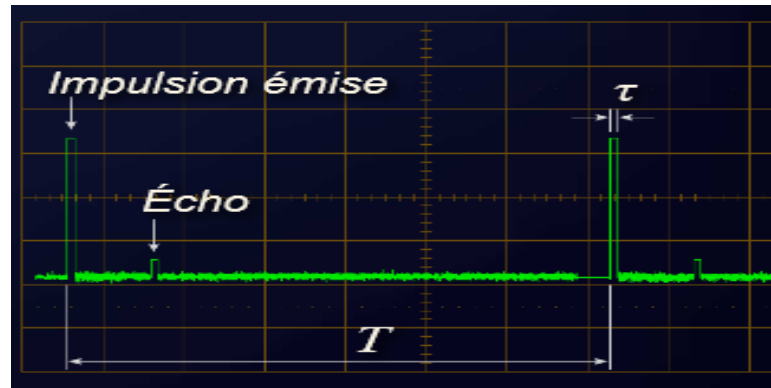


Figure 1-9 : Relation entre les impulsions et les échos.

1.4.5 RADAR Ultra Large Bande ULB :

Le radar UWB est basé sur l'émission d'impulsions temporelles ultra courtes (de l'ordre de la nanoseconde) générant un spectre très large bande, lui procure de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes [6] :

- Une bonne capacité de pénétration des matériaux constituant les sols et les murs.
- Une bonne résolution spatiale de l'image (de l'ordre de la dizaine de cm) car celle-ci est inversement proportionnelle à la bande passante du radar :

$$\nabla R = \frac{V}{2\nabla F} \quad (1.4)$$

où ∇R est la résolution spatiale du radar, V la vitesse de propagation des impulsions, et ∇F la largeur de bande.

- Une robustesse aux perturbations du fait de sa très grande bande passante.
- La possibilité, non seulement de détecter une présence humaine, mais aussi de la localiser.

La bande passante fractionnelle est un facteur utilisé pour classer les signaux en bande étroite, large bande ou ultra large bande est définie par le rapport de la bande passante à -10 dB points par rapport à la fréquence centrale. Pour obtenir la classification « ULB », un signal doit présenter une bande passante de largeur supérieure à 25 % de la fréquence centrale du signal.

Cela peut s'écrire sous la forme

$$BP_{rel} = \frac{2.(f_h - f_b)}{(f_h + f_b)} \geq 0.2 \quad (1.5)$$

D'où :

$$\frac{2.(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} \geq 0.25 \quad (1.6)$$

avec :

f_H et f_L fréquences de coupures à -10 dB, respectivement hautes et basses du spectre du signal considéré.

Ainsi, pour être considérée comme ULB, une application fonctionnant autour de 1 GHz devra avoir une bande passante supérieure à 250 MHz, soit : 875 MHz ; 1 125 MHz.

Les éléments nécessaires pour construire un système ULB sont : un générateur d'impulsions électriques, antennes, dispositifs d'adaptation d'impédance, atténuateurs, câbles ainsi que d'un système d'acquisition et de traitement numérique des signaux. Ces divers éléments apparaissent sur la figure (1.9) [7].

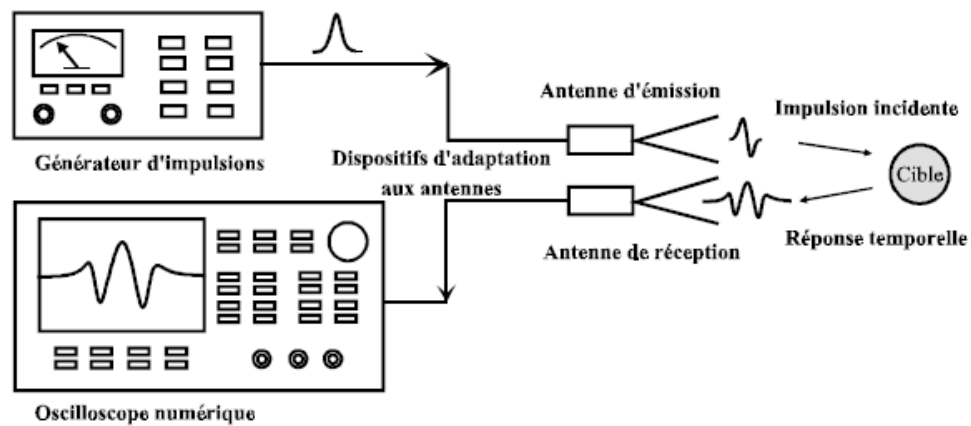


Figure 1-10 : Principe du radar ULB temporel.

La figure 1.9 présente le principe du radar ULB temporel. Le Système d'émission comporte :

- Un générateur délivrant une impulsion ultra rapide fort niveau et d'une antenne adaptée permettant le rayonnement de tout le contenu spectral (de 30 MHz à 3 GHz) de l'impulsion.

- Une antenne large bande se comporte, électriquement, comme une inductance discrétisée qui tend à dériver les signaux délivrés par le générateur. L'antenne ne transmettant que les variations de courant, il est donc important de répartir la puissance générée à travers une forme d'onde bien adaptée au rayonnement.

Il est préférable de générer une impulsion ayant la forme d'une pseudo-oscillation. lorsqu'il s'agit de hautes tensions et de fronts de montée rapides, ce type d'impulsions est technologiquement difficile à générer.

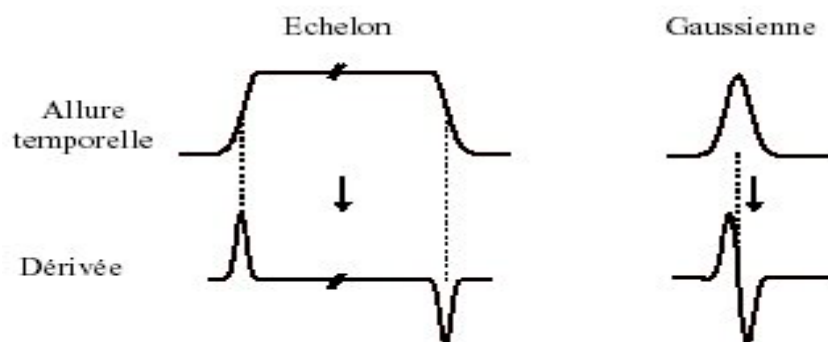


Figure 1-11 : Schéma simplifié du rayonnement d'une impulsion.

Le système de réception comporte :

- Un oscilloscope lié à une deuxième antenne de réception, permet l'acquisition du signal dans le domaine temporel. Le passage dans le domaine fréquentiel est assuré par la transformée de Fourier. Le signal temporel réfléchi par la cible est très différent de l'impulsion émise.

Les modifications de l'allure de l'impulsion réfléchi par rapport à celle émise apparaissent sur le spectre fréquentiel. Le flux d'énergie émis d'une antenne perd de son intensité au carré de la distance. Pour obtenir des puissances significatives à longues distances, il est nécessaire d'éjecter de la source de très grandes puissances. La volonté de rayonner efficacement, par une antenne, une forte puissance électrique implique donc la génération de rapides variations de forts courants. L'efficacité, en termes de signal rayonné, est principalement liée au temps de montée, à la durée et à l'amplitude de l'impulsion délivrée par le générateur[8].

1.4.5.1 Radar ULB à impulsions :

Le principe d'un radar ULB à impulsions (figure 1.11) consiste en une commutation d'énergie de durée très brève dans une chaîne d'émission Ultra large bande. Le signal ULB émis est une impulsion ultra courte, de l'ordre de la nanoseconde, sans porteuse. Son contenu spectral instantané est compris entre quelques MHz et quelques GHz.

Dans un système radar pulsé normal, un oscillateur local est activé et désactivé pour générer l'impulsion transmise. Dans le radar à impulsion, une courte impulsion CC est appliquée directement à l'antenne de l'émetteur. L'antenne de l'émetteur fonctionne comme un filtre et un signal passe-bande est émis par l'antenne. La forme et la largeur de bande du signal rayonné sont déterminées par la fonction de transfert d'antenne, c'est-à-dire les parties du spectre que l'antenne peut effectivement transmettre. Un filtre peut également être placé devant l'antenne pour façonner le spectre. Le signal reçu doit être échantillonné et stocké pour un traitement ultérieur. La figure ci-dessous illustre le processus d'échantillonnage dans un radar à impulsions.

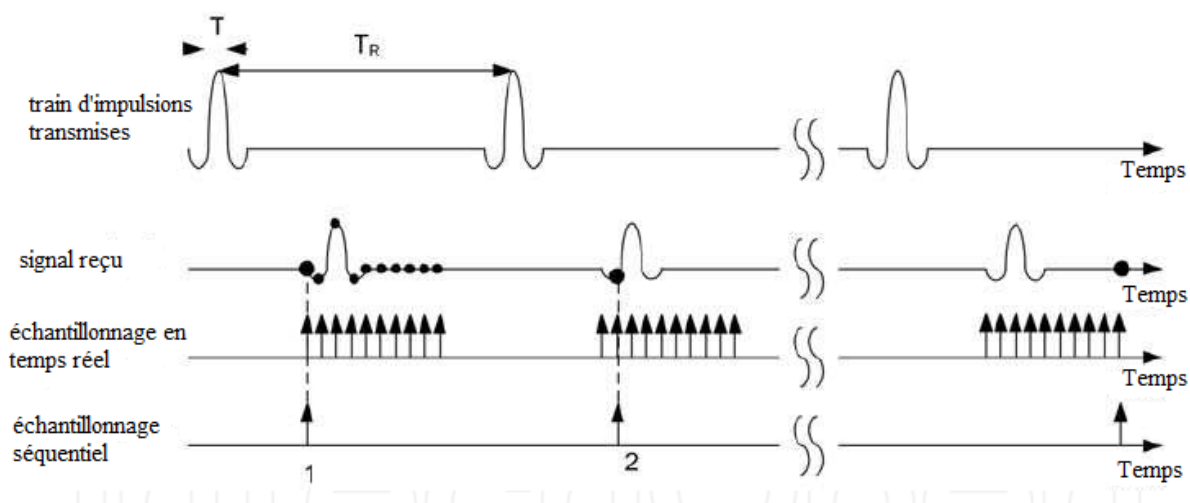


Figure 1-12 : Illustration d'un radar à impulsions avec échantillonnage en temps réel ou séquentiel.

Le filtre adapté pour une impulsion est un filtre passe-bande ayant la même largeur de bande que l'impulsion et échantillonnant l'impulsion au point d'amplitude maximale. Cela peut être fait en échantillonnant la forme d'onde reçue avec une fréquence d'échantillonnage d'au moins deux fois la fréquence la plus élevée de la forme d'onde. En GPR impulsif, ils échantillonnent normalement au moins 10 fois la fréquence centrale de la forme d'onde transmise. Dans les radars à impulsions UWB, la fréquence la plus élevée peut-être de plusieurs GHz, de sorte qu'un convertisseur analogique-numérique (ADC) qui peut échantillonner à cette

vitesse avec une résolution de plusieurs bits est très difficile à fabriquer et serait coûteux et consommerait beaucoup d'énergie. Ceci est appelé échantillonnage en temps réel. Une solution à ce problème consiste à ne prendre qu'un seul échantillon de réception pour chaque impulsion transmise [9].

1.5 Equation du radar :

Le signal radar touche la cible, elle réfléchit l'énergie radar vers le récepteur. La quantité d'énergie renvoyée par le radar dépend de la taille et de l'orientation de la cible, la forme et le matériau qui est proportionnel à un paramètre appelé section transversale radar (RCS "Radar Cross Section : Section Transversale du Radar, est une mesure de l'énergie qu'une cible radar intercepte et diffuse vers le radar). Il s'agit du rapport entre la puissance réfléchi par la cible et la densité de puissance incidente sur celle-ci.

La densité de puissance P_d du radar est calculée comme suit[10] :

$$P_d = \frac{P_t G}{4\pi R_1^2} \quad (1.7)$$

Où

P_t : est la puissance émise.

G : est le gain de l'antenne.

R_1 : est la distance entre l'antenne radar et la cible.

Le temps de retard entre le signal émis et le signal reçu Δt permet de calculer la distance D entre l'antenne et la cible :

$$D = \frac{c * \Delta t}{2}. \quad (1.8)$$

Aussi, à partir de la fréquence du signal reçu (décalage par rapport au signal émis dû à l'effet doppler) on peut déduire la vitesse de déplacement de l'objet mobile.

L'avantage d'un système radar est de recevoir une puissance suffisante par rapport au bruit, l'équation radar permet de calculer cette puissance en fonction de la puissance émise ainsi que des autres paramètres du système [11] :

$$Pr = \frac{Pt * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 * R^4} \quad (1.9)$$

Avec : Pr : Puissance reçue.

Pt : Puissance transmise.

G : Gain de l'antenne.

λ : Longueur d'onde du signal émis.

σ : Surface équivalente radar SER.

R : Distance entre l'antenne et l'objet.

1.6 Caractéristiques techniques du RADAR :

1.6.1 Portée (Range) :

La mesure de la distance est l'une des fonctions les plus importantes du radar. Les radars les plus courants La forme d'onde utilisée dans la mesure de la distance est un train d'impulsions rectangulaires à largeur d'impulsion étroite.

Le radar pulsé transmet cette énergie électromagnétique, vers la cible, comme le montre la figure 1.12, dont une partie retourne au récepteur radar après avoir été réfléchi par la cible. L'impulsion rectangulaire représente la transmission, et l'impulsion triangulaire plus courte représente l'écho du signal de la cible. La portée de la cible, R est calculée en mesurant le temps de retard Δt , elle prend une impulsion pour parcourir le trajet à double sens entre le radar et la cible. Comme les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière, $C=3 \times 10^8$ m/s. Où : $R=(c\Delta t)/2$.

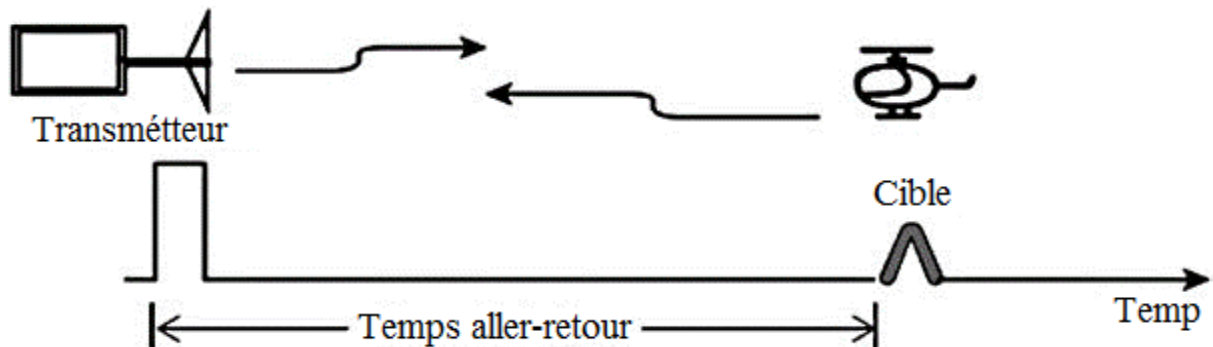


Figure 1-13 : Concept de portée radar.

Généralement, un radar à impulsions émet et reçoit un train d'impulsions, comme l'illustre la figure 1.13. La période de temps (IPP), T , est souvent appelée répétition des impulsions intervalle (PRI). L'inverse du PRI est le PRF (**La fréquence de répétition des impulsions**), désigné par f_r , est donné par $f_r = 1 / T$. Le devoir le facteur, désigné par d_t , est exprimé par :

$$d_t = 1 / T .$$

La puissance moyenne émise est alors :

$$E_p = P_t \tau = P_{av} T = \frac{P_{av}}{f_r} \quad (1.11)$$

où P_t est la puissance de crête transmise par le radar. L'énergie d'impulsion est :

$$P_{av} = P_t d_t = \frac{P_t \tau}{T} = P_t \tau f_r \quad (1.12)$$

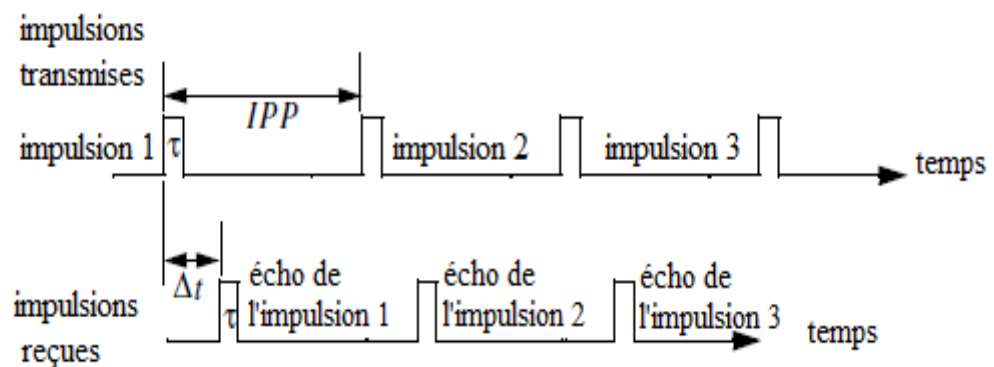


Figure 1-14 : Train d'impulsions émises et reçues.

1.6.2 Portée maximale 'Rmax' :

Le positionnement d'un écho sera déterminé par le temps aller-retour que parcourt l'impulsion entre le radar et la cible à la vitesse de la lumière dans l'air (c_0). L'impulsion ait été envoyée, après une PRI, le système de traitement des données ne pourra pas distinguer si elle appartient à la première ou à la seconde impulsion. Le rapport PRI/FRI détermine la portée maximale non ambiguë d'un radar.

La portée maximale théorique non ambiguë est donc donnée par :

$$R_{\max} = \frac{C0}{2.FRI} = \frac{C0.PRI}{2} \quad (1.13)$$

Après mise en forme nous pouvons exprimer la distance R sous la forme suivante :

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s * G * \sigma * \lambda^2}{P_e * (4\pi)^3}} \quad \text{en mètres.} \quad (1.14)$$

Pour un radar donné, la plupart des grandeurs (P_s , G , λ) peuvent être considérées comme des constantes puisqu'elles ne varient que dans des fourchettes très étroites. D'autre part, la surface équivalente radar variant énormément dans le temps, pour des raisons pratiques nous la poserons égale à 1 m².

Soit PE_{\min} la puissance minimum du signal autorisant sa détection par le radar. Tout signal de puissance inférieure ne peut être exploité puisqu'il est noyé dans le bruit du récepteur. Ce signal de puissance minimum PE_{\min} est donc celui qui permet au radar d'atteindre sa portée maximum de détection R_{\max} comme indiqué par l'équation 1.13 ci-dessus [12] :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_s * G * \sigma * \lambda^2}{P_{e \min} * (4\pi)^3}} \quad (1.15)$$

1.6.3 Résolution de la portée :

La résolution en distance est la capacité d'un radar à distinguer deux ou plusieurs cibles différentes à différentes portées. La résolution de portée R est donnée par :

$$\Delta R = \frac{CTp}{2} = \frac{C}{2B} \quad (1.16)$$

D'où : $B = \frac{1}{Tp}$ est la largeur de bande du signal[13].

1.6.4 Distance minimale de détection :

La distance minimale ou « zone d'ombre » est liée à la durée d'émission τ des impulsions radar pendant laquelle le système radar ne peut traiter les échos de telle sorte que :

$$d_{min} = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (1.17)$$

1.6.5 Fréquence Doppler :

Les radars utilisent la fréquence Doppler pour extraire la vitesse radiale de la cible (taux de portée), ainsi que pour distinguer entre des cibles mobiles et fixes ou des objets tels que le fouillis [14].

Si la cible n'est pas stationnaire, il y aura un changement de la fréquence du signal émis par le radar et reçu par celui-ci. Cet effet est connu sous le nom d'effet Doppler.

Selon l'effet Doppler, nous obtiendrons les deux cas possibles suivants :

- La fréquence du signal reçu augmente lorsque la cible se déplace vers la direction du radar.
- La fréquence du signal reçu diminue lorsque la cible s'éloigne du radar.

Une forme d'onde incidente sur une cible a des fronts d'onde en équiphase séparés par la longueur d'onde. Une cible qui se rapproche provoque la réflexion des fronts d'onde en phase équipotentielle pour se comprimer et se rapprocher les uns des autres, ce qui se traduit par une longueur d'onde de la forme d'onde réfléchi. Alternativement, une cible mobile loin du radar provoquera l'expansion des fronts d'onde de l'équiphase réfléchi, ce qui entraînera une plus

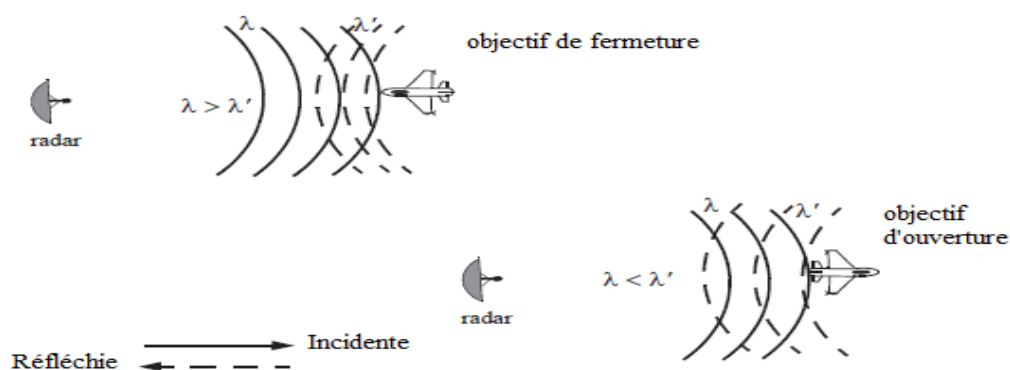


Figure 1-15 : Effet du mouvement de la cible sur les formes d'onde de l'équiphase

grande longueur d'onde de la forme d'onde réfléchi. Ceci est illustré dans la figure ci-dessous :

1.6.6 Vitesse de la cible :

L'effet Doppler permet de déterminer la vitesse de la cible en plus de sa position. La cible en mouvement produit un décalage en fréquence entre les impulsions émises et reçues. Ainsi, pour une cible se déplaçant à une vitesse radiale v , la fréquence Doppler s'écrit :

$$f_D = \frac{2v}{C.TRF} \quad (1.18)$$

Les radars capables de détecter essentiellement les cibles mobiles en éliminant les échos des cibles fixes sont appelés MTI (Moving Target Indicator) [15].

1.6.7 Section transversale du radar (RCS) :

En anglais (Radar Cross Section),est la zone qui intercepte la quantité de puissance qui est rayonnée de manière isotrope, et produit la même puissance reçue par le radar. Le RCS d'une cible peut être considéré comme une comparaison de l'intensité du signal réfléchi d'une cible vers le signal provenant d'une sphère de section transversale parfaitement lisse de 1 m². La section transversale du radar est la mesure de la capacité à réfléchir les signaux radar dans la direction du radar récepteur, c'est-à-dire une mesure du rapport entre la puissance de rétrodiffusion par stéradian (unité d'angle solide) dans la direction du radar(de la cible) à la densité de puissance qui est interceptée par la cible. La définition conceptuelle du RCS inclut le fait que toute l'énergie rayonnée ne tombe pas sur la cible. Le RCS d'une cible est le plus facilement visualisé comme le produit de trois facteurs :

-la section transversale projetée.

-la réflectivité.

-la directivité[16].

1.6.8 Fréquence de répétition des impulsions FRI :

En anglais, Pulse Repetition Frequency (PRF). Un radar à impulsions n'émet pas en continu mais produit plutôt une série de courtes impulsions sur une longueur d'onde porteuse spécifique, entre lesquels son récepteur écoute les retours.FRI est donc le nombre d'impulsions transmise par seconde. La période de répétition des impulsions (PRI) est le

temps écoulé entre le début de deux impulsions successives. La relation entre ces deux notions est [12].

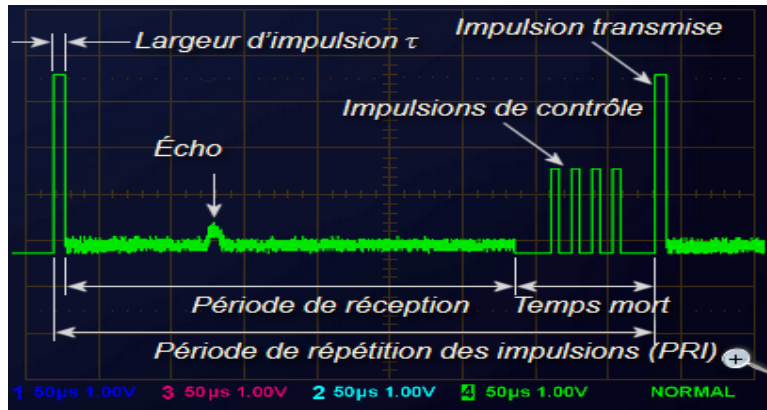


Figure 1-16 : Définitions des composantes de l'impulsion radar.

Il y'a 2 types d'équations de FRI :

- Équation radar à faible FRI :

Envisager un radar à impulsions avec une largeur d'impulsion τ , PRI (ou T) et la puissance de crête transmise P_t , où $dt = T / \tau$ est le facteur de transmission, nous pouvons définir le facteur de droit de réception dr comme :

$$dr = \frac{T - \tau}{T} = 1 - \tau fr. \tag{1.19}$$

L'équation radar du faible PRF peut s'écrire comme suit :

$$(SNR)_{np} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma T i f r \tau}{(4 \Pi)^3 R^4 K T_e F L} \tag{1.20}$$

- Équation radar de FRI élevée :

Maintenant, considérons le cas du radar du PRF élevé. Le signal émis est un signal périodique train d'impulsions. La largeur d'impulsion est τ et la période est T . Ce train d'impulsions peut être représenté par une série de Fourier exponentielle. Le spectre central de puissance de cette série contient la majeure partie de la puissance du signal. Sa valeur est $(\tau / T)^2$ et il est égal au carré du facteur de transmission. Ainsi, l'équation du radar à impulsion unique pour un radar à forte PRF est [14]:

$$(\text{SNR})_{\text{np}} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma dt^2}{(4\Pi)^3 R^4 K T_e BFL dr} \quad (1.21)$$

D'où :

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{av}} T_i G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\Pi)^3 R^4 K T_e FL} \quad (1.22)$$

où P_{av} a été remplacé par $P_t \tau f_r$. Et que le produit $P_{\text{av}} T_i$ est une "sorte de produit énergétique", ce qui indique que les radars à forte PRF peuvent améliorer les performances de détection en utilisant une puissance relativement faible et un temps d'intégration plus long.

1.6.9 Probabilité de fausse alerte :

La probabilité d'une fausse alerte P_{fa} est définie comme la probabilité qu'un échantillon R du signal $r(t)$ dépassera le seuil de tension v_T quand le bruit seul est présent dans le radar [14] :

$$P_{fa} = \int_{v_T}^{\infty} \frac{r}{\Psi^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\Psi^2}\right) dr = \exp\left(\frac{-V_T^2}{2\Psi^2}\right) \quad (1.23)$$

d'où le seuil de tension donne :

$$V_T = \sqrt{2\Psi^2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)} \quad (1.24)$$

tel que l'heure de la fausse alerte T_{fa} est liée à la probabilité de fausse alerte par :

$$T_{fa} = \frac{t_{\text{int}}}{P_{fa}} \quad (1.25)$$

Comme t_{int} représente le temps d'intégration du radar, ou le temps moyen pendant lequel la sortie du détecteur d'enveloppe dépassera la tension de seuil. Puisque le radar bande passante d'exploitation, B est l'inverse de t_{int} puis en remplaçant l'Eq (1.24) dans l'Eq. (1.25), on obtiendra T_{fa} comme la suite :

$$T_{fa} = \frac{1}{B} \exp\left(\frac{V_T^2}{2\Psi^2}\right) \quad (1.26)$$

1.6.10 Probabilité de détection :

La probabilité de détection P_D est la probabilité qu'un échantillon R de $r(t)$ dépassera la tension de seuil dans le cas du bruit plus signal ,où :

$$P_D = \int_{v_T}^{\infty} \frac{r}{\Psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\Psi^2}\right) \exp\left(\frac{r^2 + A^2}{2\Psi^2}\right) dr \quad (1.27)$$

Si nous supposons que le signal radar est une forme d'onde sinusoïdale avec une amplitude , alors sa puissance est $A^2 / 2$ Maintenant, en utilisant $SNR = A^2 / 2\Psi^2$ (SNR à impulsion unique) et $(V_T^2 / 2\Psi^2) = \ln(1 / P_{fa})$, [14] on peut écrire l'Eq précédente comme la suite :

$$P_D = \int_{\sqrt{2\Psi^2 \ln(1/P_{fa})}}^{\infty} \frac{r}{\Psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\Psi^2}\right) \exp\left(\frac{r^2 + A^2}{2\Psi^2}\right) dr = Q\left[\sqrt{\frac{A^2}{\Psi^2}} \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}\right] \quad (1.28)$$

D'où :

$$Q[\alpha, \beta] = \int_{\beta}^{\infty} \zeta I_0(\alpha\zeta) e^{-(\zeta^2 + \alpha^2)/2} d\zeta \quad (1.29)$$

Q s'appelle Marcum's Q-fonction, lorsque P_{fa} est petit et P_D large, de sorte que le seuil est également large, L'Eq(1.28) peut être approché par :

$$P_D \approx F\left(\frac{A}{\Psi} - \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}\right) \quad (1.31)$$

Où la fonction $F(x)$ est donné par :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\zeta^2/2} d\zeta \quad (1.32)$$

De nombreuses approximations pour le calcul de l'équation (1.29) peuvent être trouvées tout au long de la littérature. parmi ses équations on a :

$$P_D \approx 0.5 \times \text{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{\text{SNR} + 0.5}) \quad (1.33)$$

où la fonction d'erreur complémentaire erfc est :

$$\text{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (1.34)$$

***Chapitre 2 : Les formes d'ondes d'un
système Radar.***

2.1 Introduction :

Le système radar est composé de plusieurs éléments, chacun joue un rôle important, il fonctionne au moyen d'un type particulier des formes d'ondes.

La diversité des formes d'onde devient rapidement l'une des méthodes les plus puissantes par lesquelles les systèmes de détection peuvent être adaptés de manière dynamique à leur environnement.

Le choix d'un type d'onde particulier et d'une technique de traitement du signal dans un système radar dépend fortement de la mission et du rôle spécifiques du radar.. Le meilleur choix sur les diverses formes d'onde conduisant aux bonnes performances du système radar peut être apprécié par la fonction d'ambiguïté.

En général, les signaux ou les formes d'onde peuvent être analysés en utilisant des techniques du domaine temporel ou du domaine fréquentiel. Ce chapitre présente un grand nombre des formes d'onde radar les plus couramment utilisées [1].

Dans ce chapitre on va voir ces différentes formes d'onde et ces fonctions

2.2 Les composants de système radar :

Les 4 parties importantes du radar qui sont l'émetteur, le récepteur, les antennes avec les composants associés, et la partie traitement du signal de système radar vont être décrites sur La figure ci-dessous qui résume les composants d'un système radar :

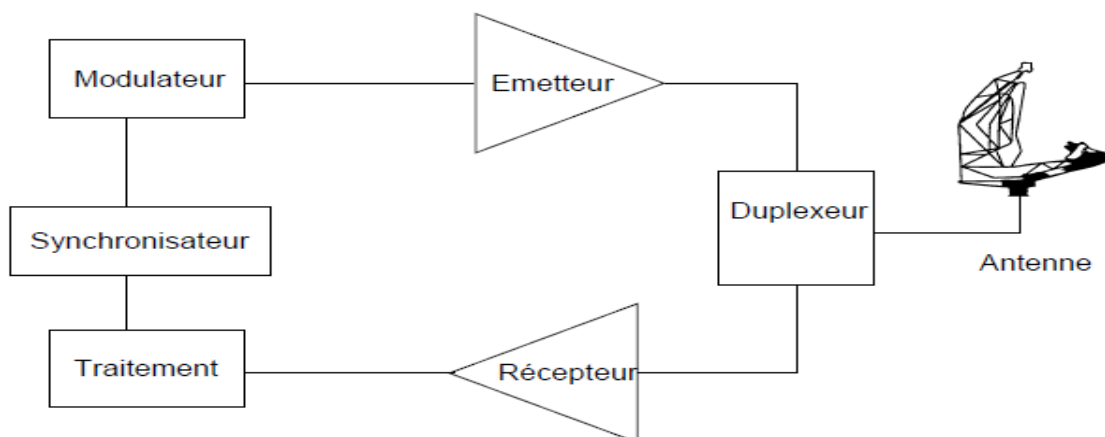


Figure 2-1: Les différents composants de système radar.

2.2.1 L'émetteur :

Un émetteur est un circuit oscillateur qui produit des pulsations électromagnétiques à très hautes fréquences. Il comprend un oscillateur permanent, un amplificateur et un modulateur.

Il génère une onde électromagnétique lancée à intervalles réguliers (par exemple, toutes les millisecondes) des signaux très brefs (par exemple, 1 microseconde de durée), à une fréquence donnée. Il transforme donc l'énergie électrique fournie par le modulateur et les sources d'alimentation en énergie radioélectrique dans la gamme des radiofréquences destinée à être diffusée par l'antenne. Une partie active est le tube d'émission dans lequel est générée l'impulsion hyperfréquence à la fréquence et la puissance désirées. On peut classer les émetteurs de radar en deux grandes catégories [17] :

- Les émetteurs oscillateurs de puissance.
- Les émetteurs à chaîne d'amplification.

➤ Sous MATLAB R2015a :

L'Objet émetteur permet de modéliser les éléments clés de l'équation du radar, notamment la puissance d'émission de crête, le gain d'émission et un facteur de perte du système. Ainsi pour relier la puissance de l'écho reçu aux spécifications avec l'émetteur.

L'objet émetteur a les propriétés modifiables suivantes :

PeakPower : Puissance d'émission crête en watts.

Gain : Gain de transmission en décibels.

LossFactor : Facteur de perte en décibels.

2.2.1.1 Les paramètres de l'émetteur :

- La puissance de crête requise.
- la puissance maximale de portée sans ambiguïté.
- le rapport signal/bruit requis au niveau du récepteur : est de la forme d'onde, déterminé par l'objectif de conception de Pd et Pfa.
- la largeur d'impulsion de la forme d'onde.

La relation entre Pd, Pfa et SNR peut être représentée au mieux par une courbe des caractéristiques de fonctionnement du récepteur ROC qui sera bien expliqué dans le chapitre 4.

2.2.2 Le modulateur :

Le modulateur est un circuit électronique qui permet de fractionner le signal radio en pulsations et constitue la partie active de l'émetteur, il fait aussi le stockage de l'énergie entre deux impulsions et la mise en forme de l'impulsion (modulation d'impulsion) [18,19].

2.2.3 Le duplexeur :

Duplexeur : C'est un commutateur électronique [9] qui dirige l'onde vers l'antenne et qui permet d'utiliser l'antenne comme émetteur ou récepteur. En transmettant le signal d'émission à l'antenne et le signal capté au récepteur, il se compose de trois ports, et son isolation est un paramètre important pour protéger du signal d'émission la chaîne de réception calibrée pour traiter des signaux de faible amplitude [20].

2.2.4 L'antenne :

C'est le composant le plus distinct du radar, qui convertit l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Les antennes radars sont toutes faites à partir de sources primaires ou élémentaire qui sont soit installées au foyer d'une optique, soit associées en réseaux. Les sources élémentaires ont presque toujours un rayonnement qui n'est pas très directif (faisceau de rayonnement large). La directivité (finesse du faisceau) est donc obtenue soit par l'optique, soit par l'organisation en réseaux. Les sources élémentaires sont essentiellement les suivantes: dipôle demi-onde, les cornets, hélices, bougie, guides à fentes [21].

2.2.5 Les ondes électromagnétiques :

Un champ électromagnétique est la combinaison de deux composantes : un champ électrique E et un champ magnétique B oscillant dans des plans perpendiculaires. La propagation couplée de ces deux champs est appelée onde électromagnétique (OEM). Ce sont les variations du champ électrique qui servent en général à représenter une onde électromagnétique (les variations de ces deux champs étant liées) [22].

2.2.6 La cible :

Au sens large du terme, une cible (target en anglais) est l'objet qui interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de l'énergie vers le radar.

La cible est définie par sa taille dans la gamme de fréquence d'émission de l'onde, appelée surface équivalent radar (SER) [23].

On fait la distinction entre une cible est l'objet qu'on veut détecter et le <<Clutter>> que représente les objets non désirées (réflexion de la mer, de la terre, pluie, oiseaux, météorites.....) qui interceptent aussi l'énergie et la renvoient[24].

2.2.7 Le récepteur :

La fonction du récepteur est d'amplifier ou d'augmenter la résistance des très faibles échos et les reproduire comme signaux vidéo à passer à l'indicateur, mesurer un signal extrêmement faible à une fréquence extrêmement haute. En effet, le signal est converti et amplifié par un circuit superhétérodyne à une fréquence intermédiaire d'environ 30 MHz. La fréquence très élevée du signal radar nécessite l'utilisation d'un oscillateur et d'un mélangeur de signaux avec une précision beaucoup plus élevée que pour les récepteurs radio ordinaires. Des circuits appropriés ont été mis au point, utilisant comme oscillateurs des tubes hauts puissances à hyperfréquences. La fréquence intermédiaire est amplifiée de manière classique [9].

➤ Sous MATLAB R2015a :

Nous supposons que le seul bruit présent au niveau du récepteur est le bruit thermique, La puissance du bruit thermique est liée à la largeur de bande du récepteur. La largeur de bande du bruit est fixée à la même valeur que la largeur de bande de la forme d'onde.

La figure 2-2 ci-dessous présente un exemple d'un signal amplifié d'une onde sinusoïdale :

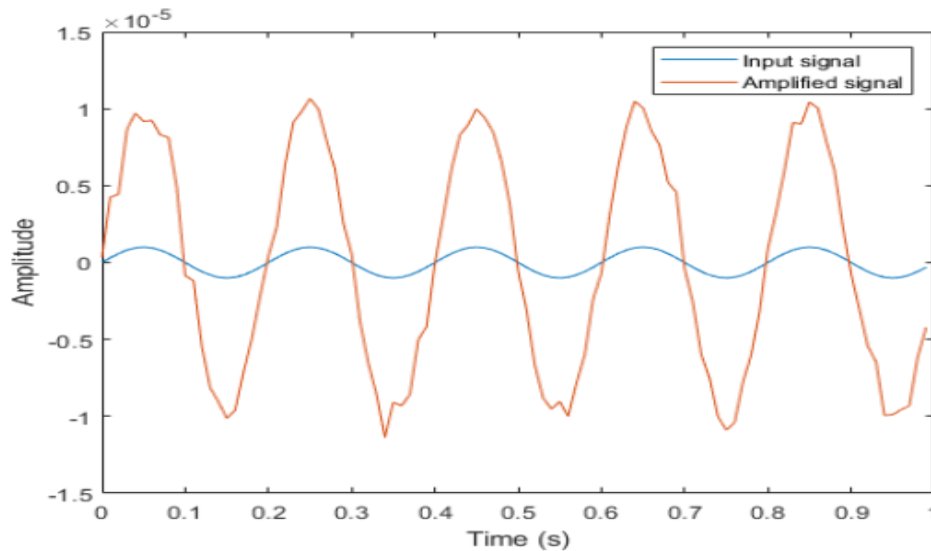


Figure 2-2 : Signal amplifié.

2.2.8 Le traitement :

Exploitation et mise en forme des informations fournies par le récepteur qui sont divisées en deux groupes essentiels [24] :

2.2.8.1 Traitement de signal :

- CFAR (Constant False Alarm Rate).
- Compression d'impulsions .
- Traitement Doppler, MTI (Moving Target Indicator).

2.2.8.2 Traitement de données :

- Extraction de données : calcul distance, direction, vitesse des échos reçus
- Traitement de données, génération de pistes à partir des pilots (filtre de poursuite Kalman).

2.2.9 Synchronisateur :

Le synchronisateur est le cœur du système radar, il a la charge de délivrer les signaux de base qui définissent les instants d'émission, et divers signaux annexes nécessaires aux opérations en temps réel. Son élément de base est une horloge de grande stabilité à partir de laquelle sont engendrés les signaux de synchronisation. Ces signaux sont distribués aux

différents éléments à piloter. Leur distribution doit être assurée avec une très grande reproductibilité sur chaque voie, de manière à ne pas fausser les mesures effectuées [4].

2.2.10 L'affichage radar :

La fonction principale de l'indicateur est de fournir un affichage visuel des plages et des paliers des cibles radar à partir desquels des échos sont reçus. Dans Système de radar de base le type d'affichage utilisé est la Position du Plan Indicateur (PPI) qui est essentiellement un diagramme polaire. Les images des échos cibles sont reçues et affichées soit sur leurs roulements relatifs ou véritables, soit sur leurs distances du centre PPI [23].

2.2.11 Filtre adapté :

Un filtre adapté (matched filter) est le filtre linéaire optimal pour maximiser le rapport signal sur bruit (S/B) pour un signal connu et en présence bruit stochastique. Ces filtres sont souvent utilisés dans la détection d'un signal inconnu en corrélation avec un signal déjà connu dit de « signature » [4].

2.3 La fonction d'ambiguïté :

2.3.1 Définition :

La fonction d'ambiguïté est un outil essentiel qui a été introduit par Ville [24-25] à l'occasion d'un problème de la théorie de la détection en radar qui caractérise les propriétés du signal comme instrument de mesure. La fonction d'ambiguïté décrite, en fonction des variables de retard temporel τ et de la fréquence Doppler f , la réponse du filtre adapté ou niveau du récepteur radar au signal émis $u(t)$ avec comme entrée le signal émis affecté d'un retard τ et d'un Doppler f [26-27].

Cette fonction est normalement utilisée par les concepteurs de radars comme un moyen d'étudier différentes formes d'ondes. Elle peut donner un aperçu de la façon dont les différentes Les formes d'onde radar peuvent convenir aux diverses applications radar [27].

La forme générale de la fonction d'ambiguïté est définie par :

$$\chi_s(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} u_s(t) u_s^*(t - \tau) e^{2i\pi\nu t} dt \quad (2.1)$$

D'où :

τ : temps.

ν : la fréquence.

us : est l'enveloppe complexe du signal $s(t)$.

2.3.2 Propriétés de la fonction d'ambiguïté :

Les principales propriétés de la fonction d'ambiguïté qui sont mentionnées ci-dessous [26] :

- Cette propriété indique que la fonction d'ambiguïté idéale présenterait un pic au centre $\tau, fd = (0, 0)$ et serait nulle ailleurs.
- Le maximum de cette fonction, correspondant à l'énergie du signal $u(t)$, est atteint uniquement à l'origine $(0, 0)$.
- Le volume global de cette fonction est constant :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\chi_u(\tau, f_d)|^2 d\tau df_d = 1 \quad (2.2)$$

- La fonction d'ambiguïté est symétrique par rapport à l'origine :

$$|\chi_u(-\tau, -f_d)| = |\chi_u(\tau, f_d)| \quad (2.3)$$

- La fonction d'inter-ambiguïté est la réponse temporelle du filtre adapté appliqué au signal $r(t)$ rétrodiffusé par l'environnement radar :

$$\chi_{r,u}(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) u^*(t + \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \quad (2.4)$$

2.3.3 Le diagramme de la fonction d'ambiguïté :

On appelle diagramme d'ambiguïté le tracé du module de $\chi_{r,u} \tau, fd$. C'est une représentation de la forme du signal à la sortie du récepteur en l'absence de bruit en fonction du temps et de la fréquence [28].

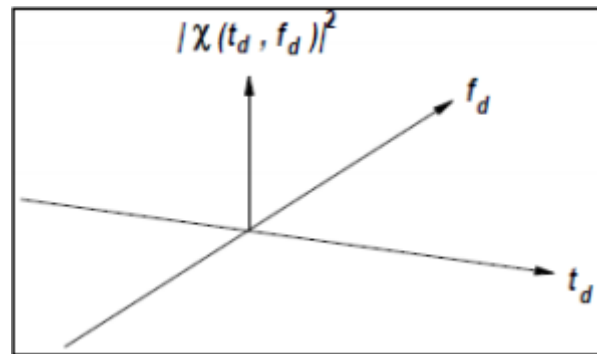


Figure 2-3: Le diagramme de la fonction d'ambiguïté.

Pour faciliter le traitement en vue de la détection, le signal émis possède certaines propriétés qui définissent ce que l'on appelle la forme d'onde. Afin de pouvoir détecter une cible il est nécessaire de pouvoir relier le signal qu'elle réfléchit à la forme d'onde émise. Pour cela il faut connaître, outre la forme d'onde [1].

2.4 Les formes d'onde :

La forme d'onde exprime la forme du graphe qui est utilisé au niveau du radar et influe de façon significative sur ses performances. Elle doit principalement permettre d'assurer une bonne résolution de cibles et de minimiser les lobes secondaires. Pratiquement, elle doit aussi présenter une certaine robustesse aux contraintes du système comme la complexité supportée au niveau de l'émetteur..., pour classier des formes d'ondes nous avons utilisé les paramètres suivant [29-30]:

1. Utilisation de la modulation intra -impulsion.
2. Technique de compression d'impulsion.
3. Type de codage de fréquence.
4. Type de codage de phase.
5. La forme de la forme d'onde.
6. Etat de discrétisation.

2.4.1 Importance de choix des formes d'ondes :

Pour déterminer les caractéristiques et les propriétés du système radar, il est très important de choisir la bonne forme d'onde parce que ce choix doit être adapté à l'application radar. Nous avons distingué les caractéristiques principales du radar qui dépendent de leur la forme d'onde [31]:

2.4.1.1 Performance :

La performance d'un radar peut être définie par la résolution, la détection de cible, la mesure, et la classification.

1. **Résolution :** La résolution angulaire est la possibilité de séparer les cibles à la même portée mais sur des roulements différents.
 - a. **Résolution angulaire :** C'est la possibilité de séparer les cibles à la même portée mais sur des roulements différents
 - b. **Résolution Doppler :** C'est la séparation minimale dans les vitesses radiales de deux cibles détectées que le récepteur radar peut distinguer.
 - c. **Résolution de fréquence :** C'est le pouvoir du récepteur à détecter deux signaux ou plus qui ne diffèrent séparément que sur la fréquence. La résolution est généralement spécifiée comme la largeur de la courbe de fréquence réponse mesurée à -3dB (demi-puissance) sous le lobe de réponse principal.
 - d. **Résolution de la portée :** La résolution de portée d'un système radar est la séparation minimale résoluble, dans la plage, de deux cibles du même palier. Elle dépend de la largeur d'impulsion transmise, la section transversale cible.
2. **Mesure :** La mesure du radar est le processus d'estimation des paramètres cibles, qui sont les coordonnées angulaires, la portée, la vitesse radiale et la section transversale du radar que nous avons bien expliqué dans le chapitre précédent.
3. **Classification :** La classification de la cible est une spécificité nécessaire des radars modernes, qui non seulement peuvent détecter la position cible, mais aussi classer le type de cible.

2.4.1.2 Facteurs de choix des formes d'onde :

Il existe un ensemble de facteurs qui influent sur le choix des formes d'ondes radar. Lorsque vous essayez de choisir une forme d'onde spécifique, ces facteurs doivent être adaptés. Ces facteurs comprennent la couverture, la résolution, la mesure, le coût et la complexité du système. On peut récapituler l'ensemble de ces facteurs en ce qui suit [32]:

1. La couverture de portée.
2. La couverture doppler.
3. Probabilité de détection.
4. La capacité de résolution.

5. La mesure d'erreurs.
6. Rejet des interférences.
7. Modes de fonctionnement améliorés.
8. Complexité et coût de la production et du traitement.

2.4.2 Conception et analyse de la forme d'onde :

Une bonne sélection de la forme d'onde permettra au radar d'obtenir de bonne résolution en retard (portée) et Doppler (vitesse) ; obtenir une énergie de signal élevée tout en utilisant une faible puissance de crête, ce qui peut permettre à plusieurs radars de fonctionner en étroite proximité et peut aider à contrer les contre-mesures électroniques.

La conception, la simulation et l'analyse des systèmes radar sont complexes car l'espace de conception couvre les domaines numérique, analogique et RF. Ces domaines s'étendent sur toute la chaîne du signal, du réseau d'antennes aux algorithmes de traitement du signal radar, en passant par le traitement des données et le contrôle. La complexité qui en résulte au niveau du système entraîne la nécessité de modéliser et de simuler à tous les stades du cycle de développement. Les outils de modélisation et de simulation peuvent améliorer tous les aspects du flux de travail de conception des systèmes radar.

Le bloc générateur de signaux sous Simulink peut produire l'une des quatre formes d'onde suivantes : onde sinusoïdale, onde carrée, onde en dents de scie et onde aléatoire. La valeur par défaut est une onde sinusoïdale. Nous pouvons exprimer les paramètres du signal en Hertz (par défaut) ou en radians par seconde. Dans notre cas en utilisant les valeurs par défaut des paramètres.

➤ L'analyse de la forme d'onde sous Matlab :

Afin d'examiner les propriétés des signaux couramment utilisés dans les systèmes radar, et de produire des graphiques en 2D et des images en 3D pour visualiser les formes d'ondes, on peut les analyser sous Matlab, il nous permet de modifier les paramètres de la forme d'onde et de voir comment les différentes valeurs de paramètres affectent l'apparence et les propriétés de la forme d'onde. Les paramètres de la forme d'onde comprennent la fréquence de répétition des impulsions (PRF), la durée des impulsions et la largeur de bande. L'application affiche les caractéristiques de base de la forme d'onde telles que la résolution de la portée, la résolution Doppler et la portée maximale. Nous pouvons superposer simultanément des tracés de plusieurs formes d'onde comme les suivants :

1. Rectangulaire.
2. Modulation de fréquence linéaire (LFM).
3. Stepped FM.
4. Forme d'onde constante de modulation de fréquence (FMCW).
5. Formes d'onde codées en phase.

2.4.2.1 Forme d'onde rectangulaire :

La forme d'onde la plus simple pour un système de radar est probablement une forme d'onde impulsion rectangulaire. Pour cette forme d'onde la largeur d'impulsion est l'inverse de la bande passante. Ce type de forme d'onde est représenté comme suit :

$$S(t) = s(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (2.5)$$

D'où, $s(t)$ est l'enveloppe complexe du signal, définie comme suit

$$S(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec T est la largeur de l'impulsion.

Sa fonction d'ambiguïté a pour expression :

$$|\chi(\tau, f_d)| = \left| \int_{\tau}^T e^{j2\pi f_d t} dt \right| = \left| \frac{\sin(\pi f_d (T - |\tau|))}{\pi f_d (T - |\tau|)} \right| \cdot \left| \frac{T - |\tau|}{T} \right| \quad (2.7)$$

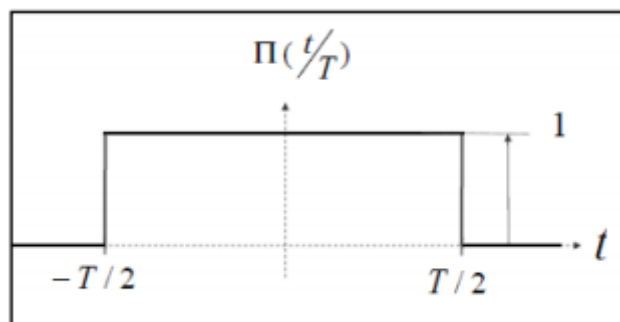
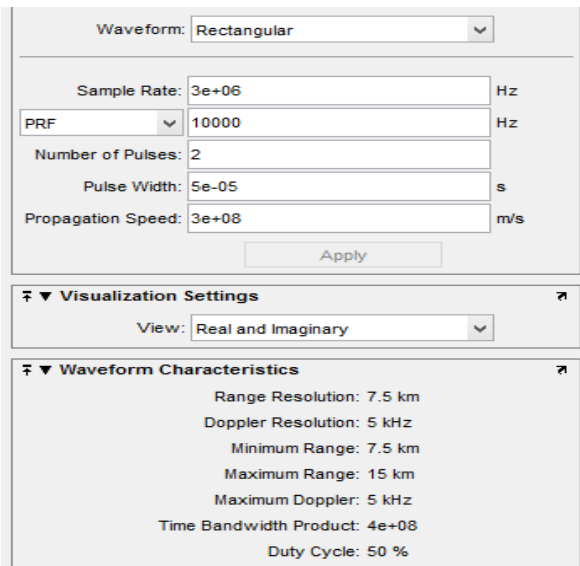
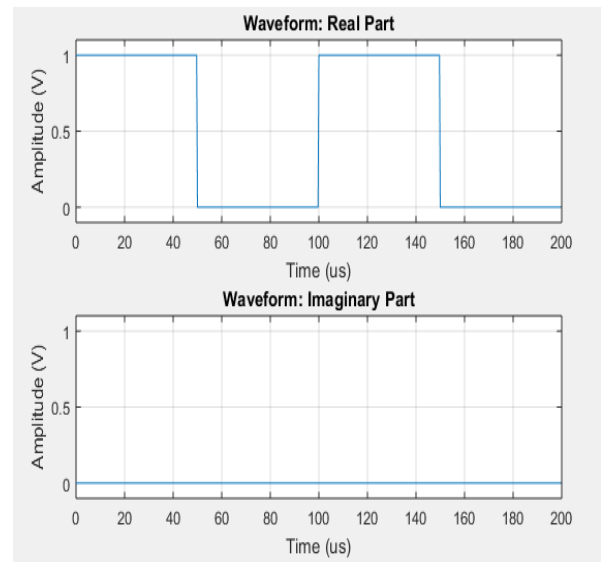


Figure 2-4: Forme d'onde à impulsion rectangulaire.

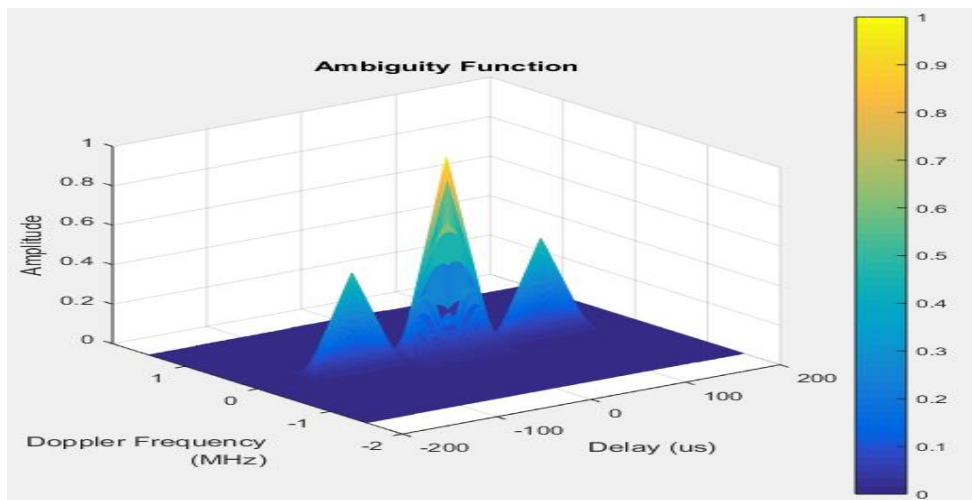
- Une forme d'onde rectangulaire idéale saute instantanément à une valeur constante et y reste pendant un certain temps. Cet exemple représenté dans la figure 2-5 deux impulsions de chaque forme d'onde.



(a)



(b)



(c)

Figure 2-5: Une forme d'onde rectangulaire idéale.

(a) : les caractéristiques d'une forme d'onde rectangulaire.

(b) : Création d'une forme d'onde rectangulaire.

(c) : la fonction d'ambiguïté d'une onde rectangulaire.

La figure (b) décrit le signal produit qui va être émis par le radar après traitement,

L'impulsion est d'une largeur de 50 μs tous les 100 μs, (temps d'émission et temps d'écoute).

○ **le train d'impulsions :**

Le train d'impulsions est composé d'une simple impulsion rectangulaire (montré dans la figure 2-6) se répète à des intervalles réguliers, c'est-à-dire N impulsions uniformes de durée T. Le train d'impulsions est utilisé souvent dans les systèmes de radars modernes par ce qu'il conduit à l'augmentation de la durée du signal ce qui permet ainsi d'améliorer la résolution Doppler. Ce type de forme d'onde est représenté comme suit [32] :

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s(t - nt_1) e^{j2\pi f_0 t} \quad (2.8)$$

La fonction d'ambiguïté de ce type de signaux peut s'écrire ainsi :

$$|\chi(\tau, f_d)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi f_d n t_1} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s(t_2 - (m-n)t_1 - \tau) e^{j2\pi f_d n t_2} dt_2 \right| \quad (2.9)$$

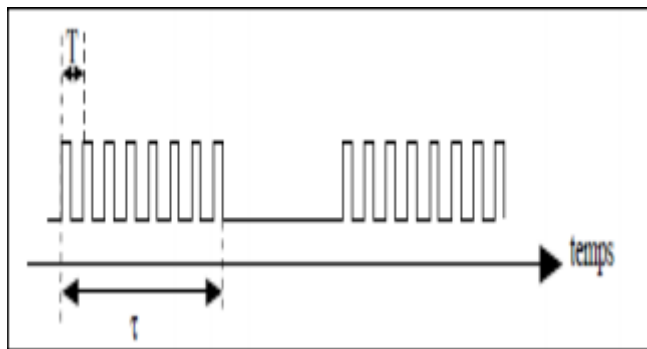


Figure 2-6 : Forme d'onde train d'impulsions.

2.4.2.2 Modulation de fréquence linéaire (LFM) :

L'idée de base de ce type de signaux qu'on désigne sous le nom signal FML (Fréquence Modulée Linéairement) est de balayer la bande de fréquence linéairement pendant la durée de l'impulsion

Ce signal est couramment utilisé pour augmenter la précision dans la mesure de la portée et la résolution lorsque de longues impulsions sont nécessaires pour obtenir des raisonnables rapports signal à bruit ET pour améliorer la résolution de la portée. L'impulsion FML peut être représentée mathématiquement comme [29]:

$$S(t) = s(t)e^{j2\pi(f_0t + \frac{kt^2}{2})} = (s(t)e^{j\pi kt^2}) \cdot e^{j2\pi f_0t} \tag{2.10}$$

avec k est le taux de variation de fréquence en [Hz /s]

Sa fonction d'ambiguïté s'écrit :

$$|\chi(\tau, f_d)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t - \tau) e^{j2\pi(f_d - k\tau)t} dt \right| \left| \frac{\sin(\pi \cdot (f_d + \tau/k) \cdot (T - |\tau|))}{\pi \cdot (f_d + \tau/k) \cdot (T - |\tau|)} \right| \cdot \left| \frac{T - |\tau|}{T} \right| \tag{2.11}$$

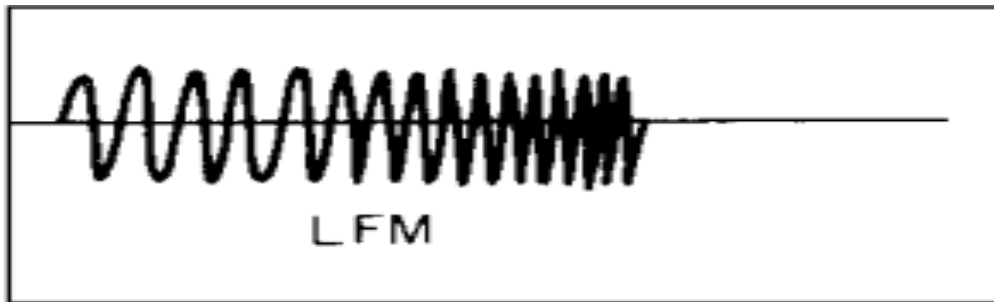
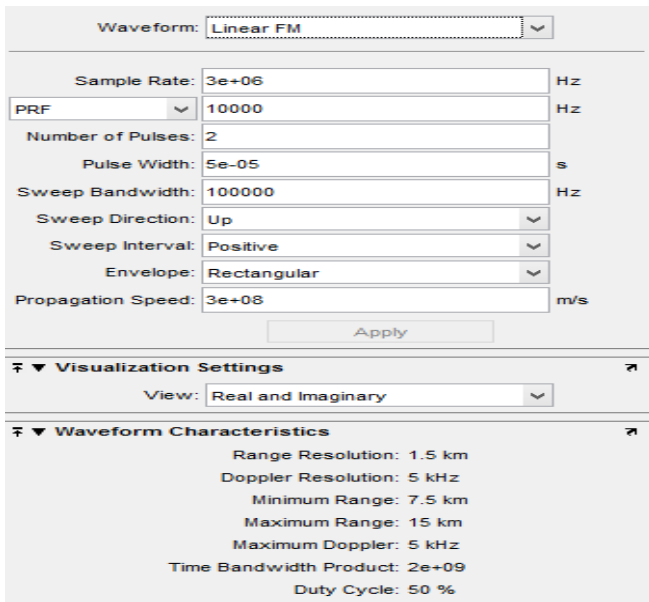
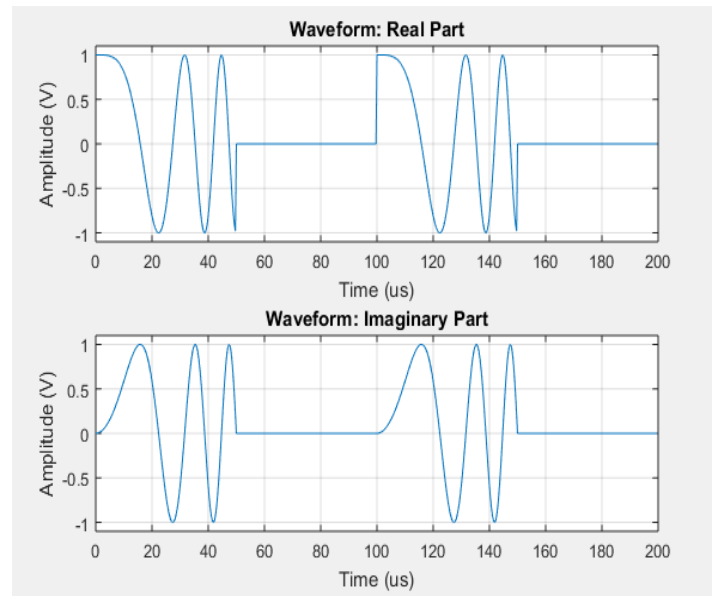


Figure 2-7: Forme d'onde impulsion modulée linéairement en fréquence.

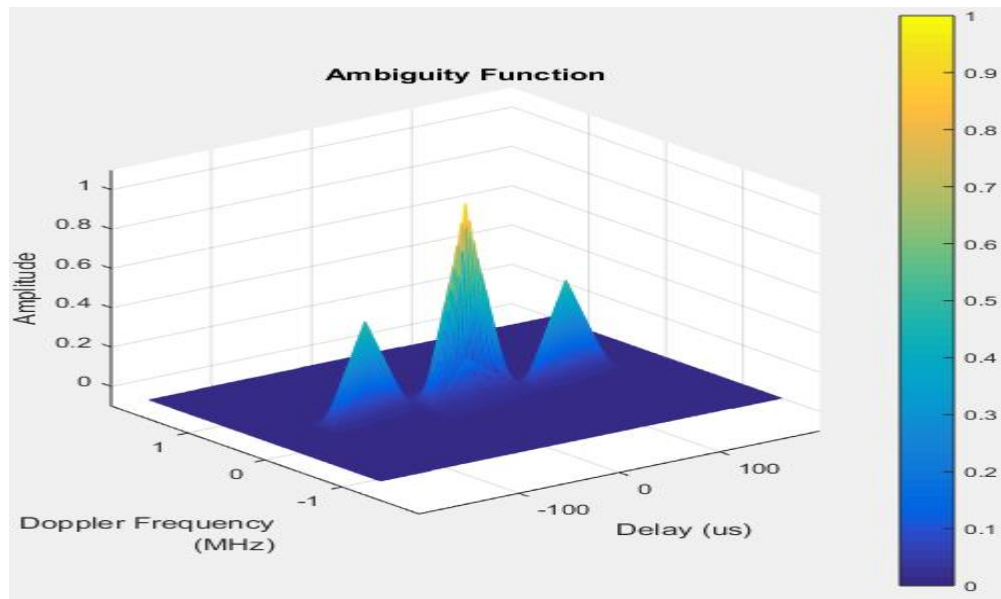
- Dans l'exemple précédent, la résolution en distance de l'impulsion rectangulaire était mauvaise, environ 7,5 km. Nous pouvons améliorer la résolution de la portée en choisissant un signal avec une plus grande largeur de bande. Un bon choix est une impulsion FM linéaire.



(a)



(b)



(c)

Figure 2-8 : Exemple Forme d'onde impulsion modulée linéairement améliorée.

(a) : les caractéristiques d'une forme d'onde LFM.

(b) : Création d'une forme d'onde LFM.

(c) : la fonction d'ambiguïté d'une onde LFM.

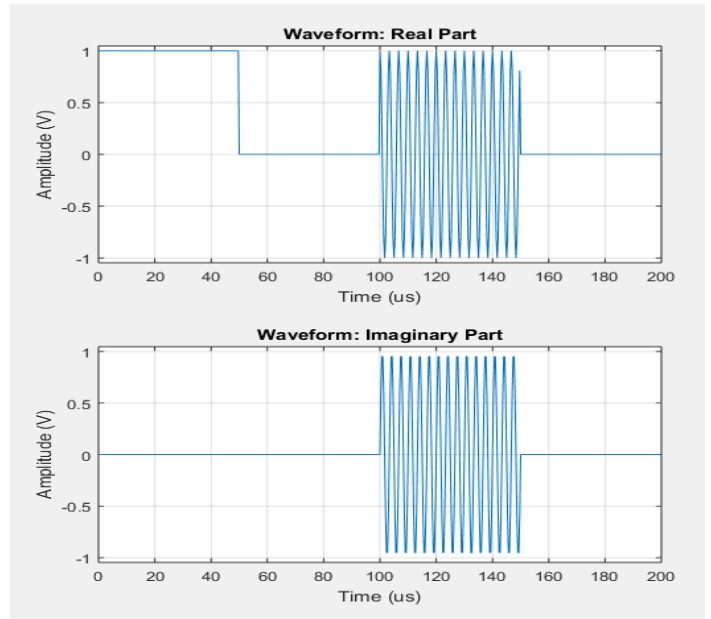
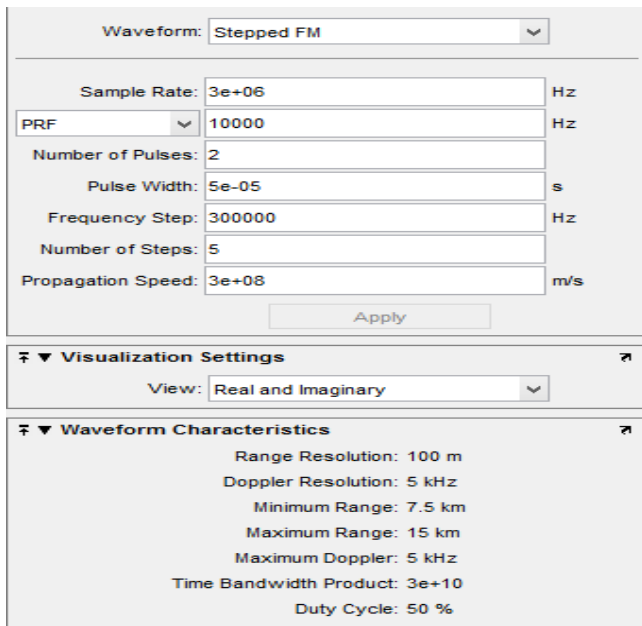
La propriété d'intérêt dans la figure (b) est la bande passante B de la modulation dont la différence entre la fréquence la plus élevée et la fréquence la plus faible dans l'impulsion non compressée.

Afin d'augmenter la puissance émise par le radar, il faut améliorer la portée de celui-ci, on a deux choix : soit augmenter la durée de l'impulsion ou augmenter la puissance de crête de l'émetteur.

2.4.2.3 forme d'onde à impulsion FM échelonnée (Stepped FM) :

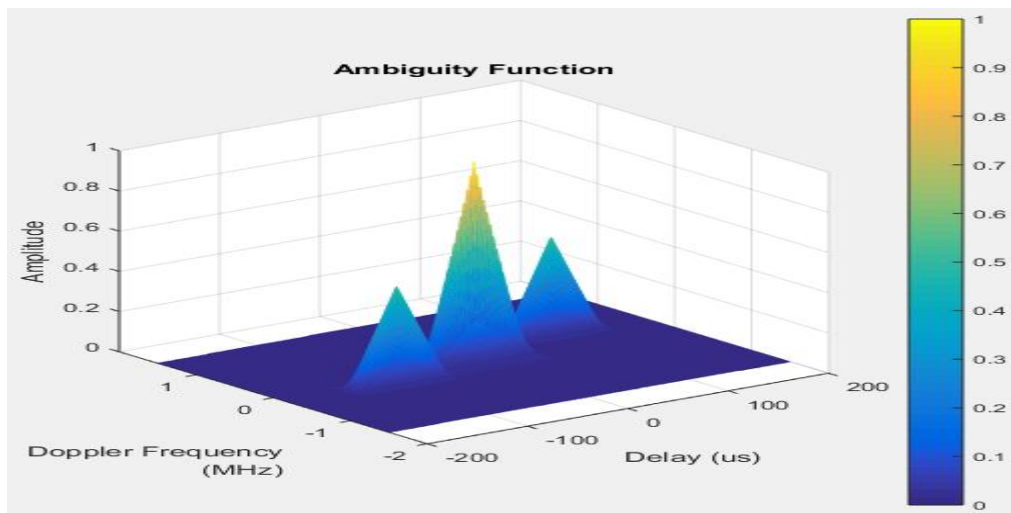
Comme les formes d'onde d'impulsion FM linéaires, les formes d'onde à fréquence échelonnée sont une technique de compression d'impulsion. L'utilisation de cette approche permet d'augmenter la résolution de la portée du radar sans sacrifier la capacité de détection des cibles.

L'exemple utilise la méthode de la largeur de bande pour démontrer que la largeur de bande de la forme d'onde de l'impulsion FM à pas est le produit du pas de fréquence et du nombre



(a)

(b)



(c)

Figure 2-9 : exemple Stepped FM

(a) : Les caractéristiques d'une Forme d'onde FM.

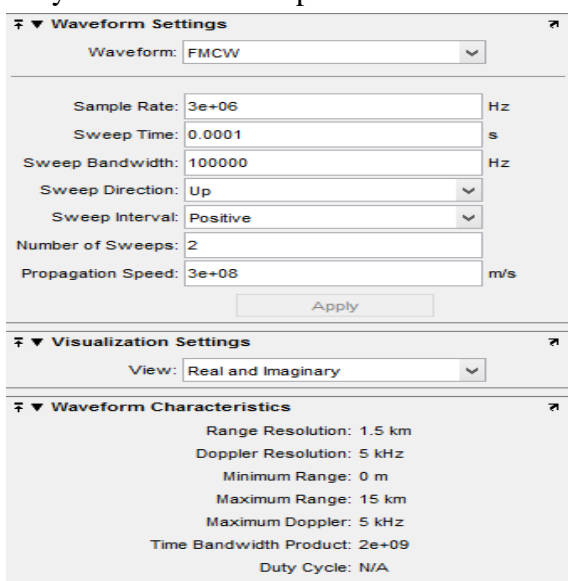
(b) : création d'une onde FM.

(c) : la fonction d'ambiguïté d'une onde FM.

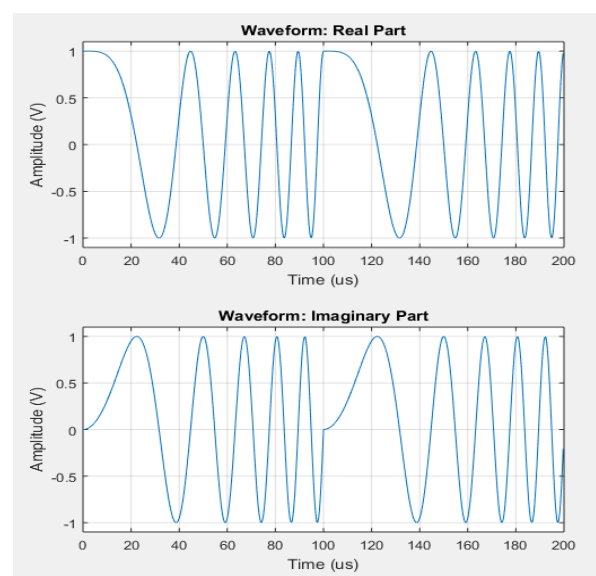
2.4.2.4 Forme d'onde constante de modulation de fréquence (FMCW) :

Les systèmes radar qui utilisent des formes d'onde à modulation de fréquence et à ondes continues (FMCW) sont généralement plus petits et moins coûteux à fabriquer que les systèmes radar à impulsions. Les formes d'onde FMCW peuvent estimer efficacement la distance de la cible, alors que les formes d'onde à ondes continues les plus simples ne le peuvent pas.

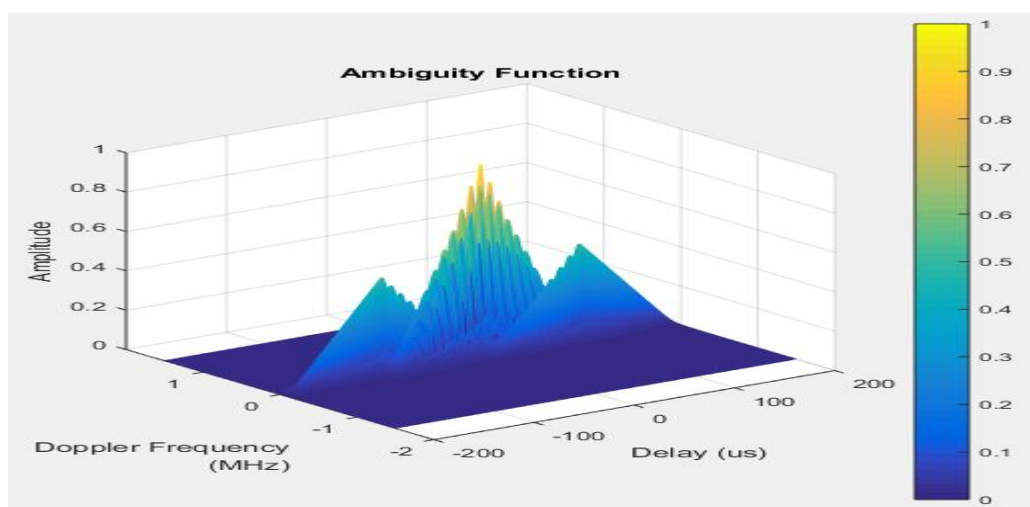
Les formes d'onde FMCW sont courantes dans les systèmes de radar automobile et les systèmes de radar à pénétration du sol.



(a)



(b)



(c)

Figure 2-10 : Forme d'onde constante de modulation de fréquence (FMCW).

(a) : Les caractéristiques d'une Forme d'onde FMCW.

(b) : Création d'une forme d'onde FMCW.

(c) : La fonction d'ambiguïté d'une onde FMCW.

2.4.2.5 Formes d'onde codées en phase :

Les situations dans lesquelles vous pourriez utiliser une forme d'onde à codage de phase au lieu d'un autre type de forme d'onde sont les suivantes :

Lorsqu'une impulsion rectangulaire ne peut pas fournir ces deux caractéristiques :

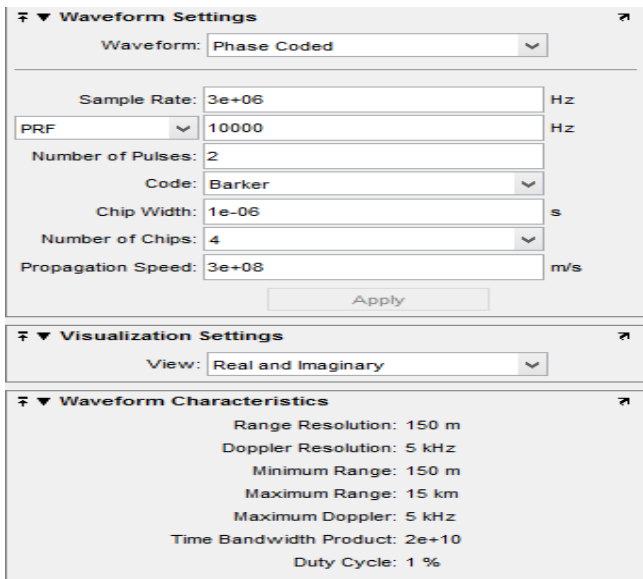
Impulsion suffisamment courte pour une bonne résolution en distance

Une énergie suffisante dans le signal pour détecter l'écho réfléchi au niveau du récepteur

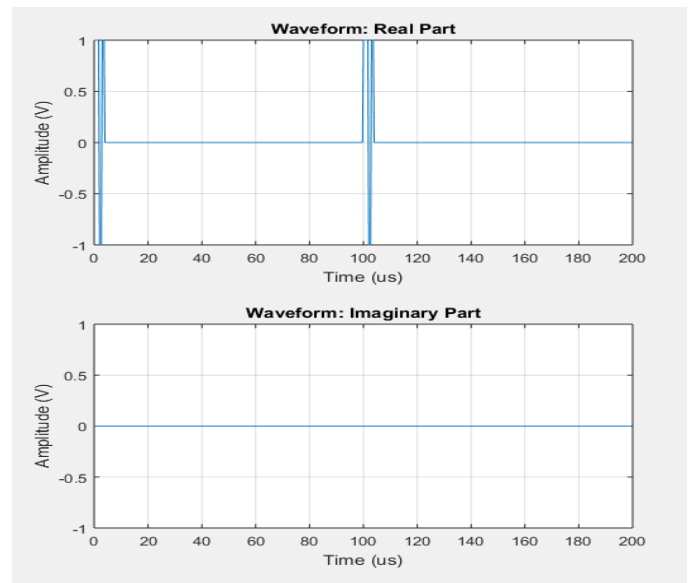
Lorsque deux ou plusieurs systèmes radar sont proches l'un de l'autre et que vous souhaitez réduire les interférences entre eux. Lorsque le traitement numérique suggère d'utiliser une forme d'onde avec un ensemble discret de phases. Par exemple, une forme d'onde codée par Barker est une forme d'onde biphasée.

Inversement, vous pouvez utiliser une autre forme d'onde au lieu d'une forme d'onde codée en phase dans les situations suivantes :

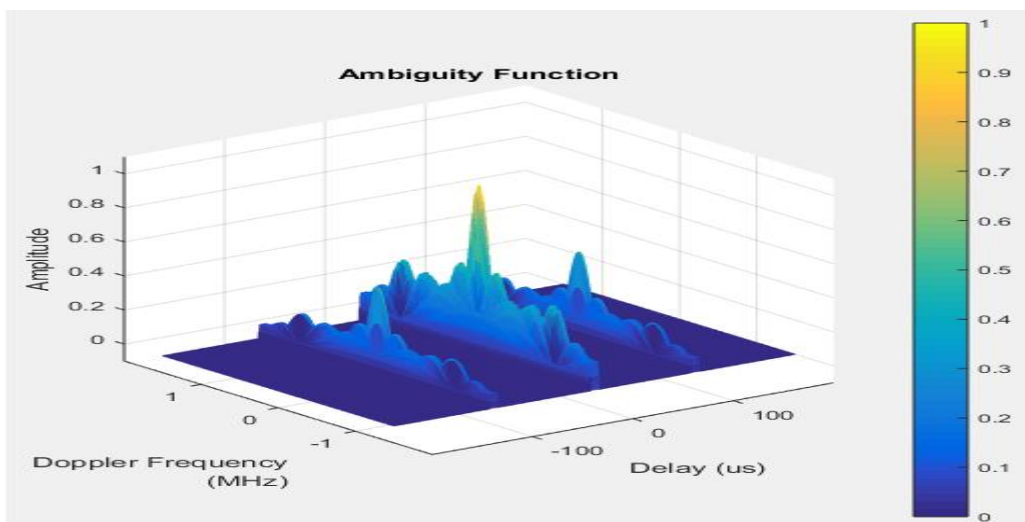
Lorsque vous avez besoin de détecter ou de suivre des cibles à grande vitesse. Les formes d'onde codées en phase ont tendance à être peu performantes lorsque les signaux ont des sont d'un coût prohibitif.



(a)



(b)



(c)

Figure 2-11 : exemple d'une Forme d'onde codées en phase.

(a) : Les caractéristiques d'une Forme d'onde codées en phase.

(b) : Création d'une forme d'onde codées en phase.

(c) : La fonction d'ambiguïté d'une onde codées en phase.

2.4.3 Comparaison des caractéristiques de base :

Le tableau 2-1 , présente une comparaison entre les différentes forme d'onde.

Tableau 2-1 : Comparaison entre les caractéristiques des formes d'ondes.

Type de forme d'ondes	La résolution de la portée (Km)	La résolution Doppler (Khz)	La portée maximale (Km)
Rectangulaire	1,5	10	15
Linear FM	1,5	10	15
FMCW	1,5	10	15
Phase coded	0,15	10	15
Stepped FM	0,1	10	15

Ces résultats ont été obtenus en utilisant le logiciel matlab. La résolution de la portée est améliorée selon le classement de type de forme d'ondes, et la résolution doppler et les portées maximales restent constantes.

*Chapitre 3 : Antenne et réseaux
d'antennes pour système Radar.*

3.1 Introduction :

Le dernier point de sortie d'un système de transmission sans fils et le premier point de réception d'un système de réception est l'antenne. L'antenne est le point où l'énergie électromagnétique quitte le radar et sort dans l'espace libre vers les cibles qui veulent détecter et c'est une partie très importante dans le système radar.

Quel que soit la fréquence de fonctionnement de l'antenne, quel que soit sa structure physique, le rayonnement des antennes est caractérisé par des propriétés communes. Le but de ce chapitre est de présenter ces propriétés, et aussi découvrir : comment une antenne rayonne-t-elle ? Dans quelle(s) direction(s) ? Avec quelle efficacité se fait le transfert d'énergie.

3.2 Définition :

Une antenne isotrope est une antenne théorique qui rayonne de manière égale dans toutes les directions, horizontalement et verticalement, avec la même intensité. L'antenne a un gain de 1 dB dans l'espace sphérique qui l'entoure et a une efficacité de 100 %. Le concept d'antenne isotrope est souvent utilisé comme antenne de référence pour le gain d'antenne.

Cependant, il est nécessaire de supprimer toute distinction entre antenne émettrice et antenne réceptrice, en introduisant

le principe de réciprocité : toute structure qui reçoit une onde électromagnétique peut transmettre une onde électromagnétique. La figure 3-1 présente la structure générale d'une antenne émettrice. (Une antenne réceptrice présente une structure similaire, l'alimentation est remplacée par un récepteur, le sens des flèches indiquant le transfert de puissance est inversé)

Le signal à transmettre peut provenir d'une ou plusieurs sources (amplitude et phase des sources indépendantes). [33]

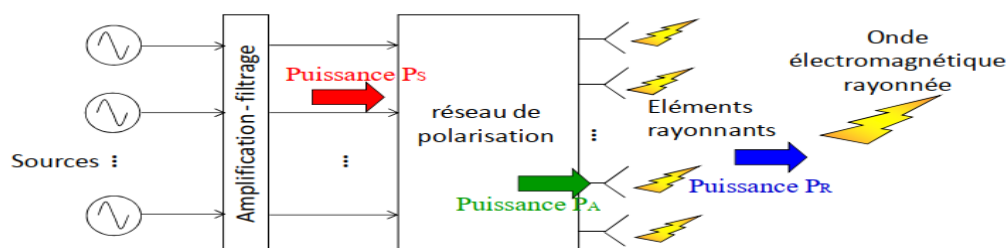


Figure 3-1 : Structure générale d'une antenne.

3.2.1 Caractéristiques électriques des antennes :

Pour quand fait le dimensionnement des systèmes d'émission/ réception on utilise les caractéristiques des antennes. Le fonctionnement normal d'une antenne est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance dans l'espace. Pour qu'o se permette de classifier les antennes on respecte les paramètres ci-dessous :

a) Diagramme de rayonnement :

Le nom de diagramme de rayonnement est une représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne en 2-D ou 3-D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné à grande distance qui est en fonction de θ (angle de Site : plan vertical) et φ (angle d'Azimut : plan horizontal). On le représente dans deux plans perpendiculaires qui sont : le plan E et le plan H. Ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électrique et magnétique atteignent leurs valeurs maximales [34] .

En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions sont privilégiées : ce sont les lobes de rayonnement comme montre la figure3-2.

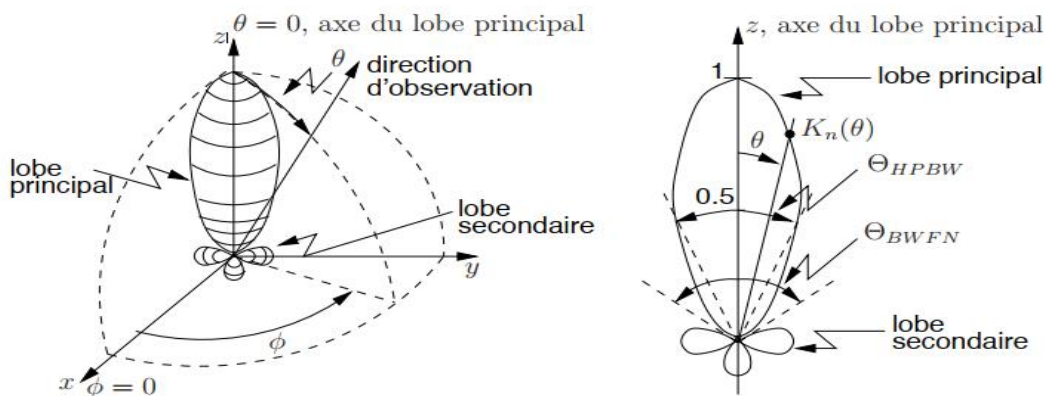


Figure 3-2 : Diagramme de rayonnement d'une antenne.

- Un lobe principal : contient le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- Un angle d'ouverture : L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable.

- Des lobes secondaires : Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- Un lobe arrière (rayonnement arrière) : C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée à 180 degrés du lobe principal.

Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les lobes secondaires [35,36].

b) La directivité :

C'est la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité été définie comme :

le quotient de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par la valeur moyenne de cette intensité de rayonnement pour toutes les directions de l'espace.

Une antenne isotrope rayonne uniformément la même densité de puissance quel que soit la direction.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P} \quad (3.1)$$

Où :

D : est la directivité de l'antenne.

U : est l'intensité de rayonnement de l'antenne.

U_i : est l'intensité de rayonnement d'une source isotrope.

P : est la puissance totale rayonnée.

Parfois, la direction de la directivité n'est pas spécifiée. Dans ce cas, la direction de l'intensité de rayonnement maximale est implicite et la directivité maximale est donnée par [36] :

$$D_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{\max}}{P} \quad (3.2)$$

Où :

D_{max} : est la directivité maximale.

U_{max} : est l'intensité de rayonnement maximal.

La directivité : est une grandeur sans dimension

c) L'impédance d'entrée :

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on assume une antenne en émission.

L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existent un courant I_{in} et une tension V_{in} . Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance Z_{in} (ou mieux encore, Z_a) [37] :

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a \quad (3.3)$$

Comme toute impédance, celle de l'antenne comprend une partie réelle R_a (active) et une partie imaginaire X_a (réactive) telle que :

- la partie réactive (réactance) : est due aux champs d'induction au voisinage de l'antenne ; elle est capacitive pour les antennes électriquement.
- la partie active est reliée aux champs (ou puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules, elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement R_r et une résistance de perte R_l .

La puissance associée à la résistance R_r est la responsable du rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance de perte R_l est perdue en chaleur dans l'antenne [37,38] .

d) Le VSWR : (adaptation) :

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne, Pour qu'une antenne fonctionne efficacement comme illustre la figure 3-3. Ce transfert ne s'effectue pas que s'il y'a adaptation entre l'impédance de l'antenne (Z_{in}) et celle de l'émetteur (Z_s). Selon le théorème de transfert de puissance maximale, cette dernière peut être transférée que si l'impédance de l'émetteur est un conjugué complexe de l'impédance de l'antenne et vice-versa.

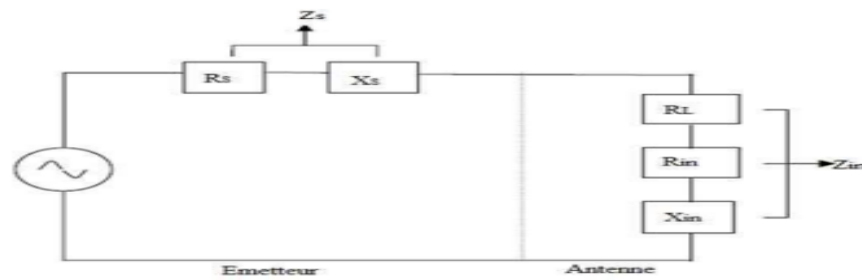


Figure 3-3 : Circuit équivalent d'antenne.

Ainsi, la condition pour la correspondance est la suivante :

$$Z_{in} = Z_S^* \quad (3.4)$$

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (3.5)$$

$$Z_S = R_S + jX_S \quad (3.6)$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchie, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires de tension (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR). Le VSWR est donné par Makarov [36] :

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.7)$$

$$T = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_S}{Z_{in} + Z_S} \quad (3.8)$$

Où :

T : est appelé le coefficient de réflexion.

V_r : est l'amplitude d'onde réfléchie.

V_i : est l'amplitude d'onde incidente.

Le VSWR est essentiellement une mesure de la différence d'impédance entre l'émetteur et l'antenne. Plus le VSWR est grand plus la différence d'impédance est grande [10].

Le VSWR minimale correspond à une adaptation parfaite. Une conception pratique de l'antenne doit avoir une impédance d'entrée égale à 50Ω ou 75Ω , la plupart des équipements radio sont construits pour cette impédance [39-40].

e) Le coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion RL (Return Loss) est un paramètre qui indique la quantité d'énergie perdue à la charge, et qui n'est pas réfléchi. Comme il est expliqué dans le paragraphe précédent, les ondes réfléchies entraînent la formation d'ondes stationnaires, lorsque l'impédance de l'émetteur et de l'antenne ne sont pas égales. Il est fiable pour indiquer la correspondance entre l'émetteur et l'antenne.

Le coefficient de réflexion est donné par [36] que :

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma_j| \quad (3.9)$$

une correspondance parfaite entre l'émetteur et l'antenne, $\Gamma = 0$ et $RL = 1$ signifie qu'il n'y aura aucune énergie réfléchi, tandis qu'un $\Gamma = 0$ a une $RL = 0$ dB, ce qui implique que toute la puissance incidente est réfléchi. Pour les cas pratiques, un VSWR de 2 est acceptable, qui correspond à un RL de -9,54 dB.

f) Le rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation. Elle est exprimée par :

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (3.10)$$

Où :

R_r : Résistance liée à son rayonnement.

R_p : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

g) La polarisation :

Selon la constitution de l'antenne. La polarisation d'une onde est une donnée fondamentale pour l'étude des antennes. La polarisation est définie comme étant l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique. L'antenne ne recevra qu'une certaine

forme de polarisation. La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction du champ électrique E .

Si E garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne (voir la Figure 3-4).

Si la direction varie avec le temps de telle sorte que si, en un point donné, on schématise les positions successives de E , l'extrémité du vecteur représentatif d'écrit un cercle ou une ellipse. On dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique. [38-40]

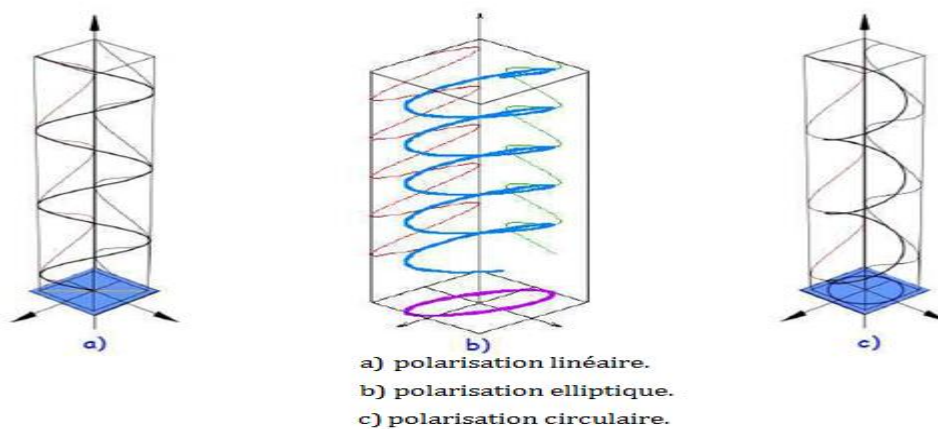


Figure 3-4 : Polarisation du champ électromagnétique.

h) Le gain :

Le gain d'une antenne dans une direction est défini par le rapport de la densité de puissance rayonnée dans cette direction à la densité de puissance S_{ri} qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes, les deux antennes étant alimentées par la même puissance et placées à la même position [41].

$$G(\theta, \phi) = \frac{S_r(\theta, \phi)}{S_{ri}} \quad (3.11)$$

i) La bande passante (BP) :

La bande passante ou La largeur de bande, d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises.

Elle peut être considérée comme la plage de fréquences qui se situent de part et

d'autres d'une fréquence centrale et ou les caractéristiques de l'antenne (Impédance d'entrée, diagramme de rayonnement, angle d'ouverture, polarisation, niveau du lobe mineur, gain, direction du faisceau) sont acceptables par rapport à celles obtenues avec la fréquence centrale (fréquence de référence).

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 [35-42] est donnée par :

$$BP_{LB} = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (3.12)$$

$$BP_{LB}(\%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} * 100 \quad (3.13)$$

Où :

f_{max} : la fréquence maximale.

f_{min} : la fréquence minimale.

f_c : la fréquence centrale.

j) Puissance rayonnée par une antenne :

Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, c'est-à-dire transportée par une onde électromagnétique, qui peut se propager dans toutes les directions de l'espace comme indiquer dans la figure 3.5. Les directions dans lesquelles cette puissance va dépendre des caractéristiques. [33]

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega \cdot R^2} (W / m^2) \quad (3.14)$$

P_A : puissance électrique

Ω : angle solide où la puissance est rayonnée

R : distance entre la surface élémentaire et la source de la puissance

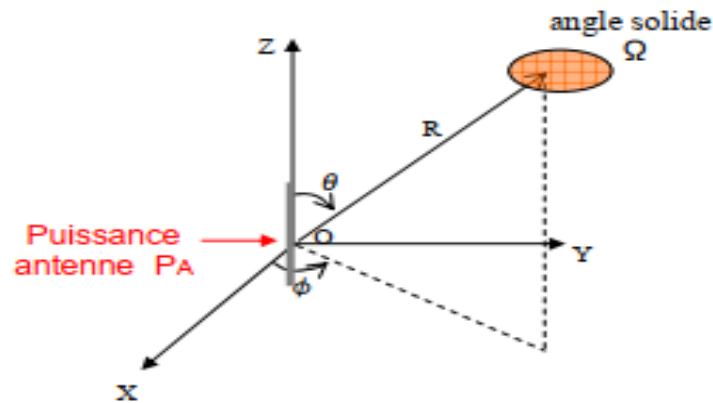


Figure 3-5 : Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace.

3.2.2 Rôles des antennes :

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique.

Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques.

La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes mais nécessaires pour dimensionner un système de transmission sans fils [43].

3.3 Simulations d'une antenne sous Matlab :

Les systèmes de radar sont construits avec différents objets système, pour créer un système radar, tel qu'une antenne, un collecteur, un radiateur, un récepteur, un mouvement de capteur et la forme d'onde. Si aucune information sur un système existant n'est connue, l'exigence de détection est déterminée par les performances souhaitables, telles que la

probabilité de détection et la fausse alerte, la portée maximale sans ambiguïté, le RCS minimal détectable et le nombre d'impulsions à intégrer. Ces exemples sont simulés dans la version R2015a.

On fixe la graine de la génération de bruit dans le récepteur afin de pouvoir reproduire les mêmes résultats. Dans notre cas, cet exemple modélise un système de radar mon-statique, le port de l'émetteur est réglé sur port du sorti afin d'indiquer son état.

Ce signal d'état peut ensuite être utilisé pour activer le récepteur.

3.3.1 Radiateur et collecteur :

Dans un système radar, le signal se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Par conséquent, le signal doit être rayonné et recueilli par l'antenne utilisée dans le système radar. C'est là que le radiateur et le collecteur entrent en jeu.

Dans un système de radar mon-statique, le radiateur et le collecteur partagent la même antenne, donc nous allons d'abord commencer par définir cette antenne. Pour simplifier la conception, nous choisissons une antenne isotrope. Supposons que l'antenne est stationnaire.

3.3.2 Antenne isotrope :

On construit une antenne isotrope qui fonctionne sur une gamme de fréquences allant de 1 GHz à 15 GHz et la fréquence de fonctionnement est de 10 GHz pour tous les exemples qui suivent : la figure 3.6 montre un Tracer la réponse de l'antenne en élévation et en azimuth 0 degré en modèle polaire.

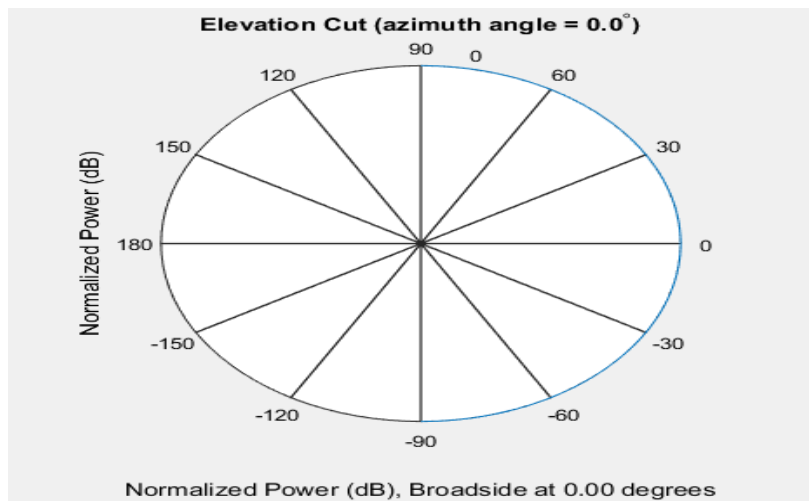


Figure 3-6 : Puissance rayonnée par une antenne dans une direction de l'espace.

3.3.2.1 Polarisation d'antenne isotrope :

Pour visualiser la polarisation d'une antenne, On va Créer un élément d'antenne et on teste la polarisation du notre antenne :

Résultat :

ans = 0.

La valeur 0 montre que l'élément d'antenne ne supporte pas la polarisation.

A partir de la mesure de la puissance rayonnée, on peut déterminer la valeur du champ électrique. En espace libre et en champ lointain est nul, donc on déduit que les champs E et H sont perpendiculaires entre eux.

On sélectionne les angles d'intérêt qui doivent être des angles d'élévation constants à zéro degré. Les sept angles d'azimut sont centrés autour de la visée (zéro degré d'azimut et zéro degré d'élévation) et la fréquence sur 10 GHz.

Calculons la directivité le long de la coupe d'élévation constante :

[-30,-20,-10,0,10,20,30 ; 0,0,0,0,0,0,0]

Nous avons obtenu les résultats suivants :

d =

1.0e-03

0.1102

0.1102

0.1102

0.1102

0.1102

On remarque que les résultats obtenus sont proches à 0 dBi.

Elle devrait donc être entre 0 dB et 1 dB pour une antenne isotrope car elle est utilisée comme référence.

3.3.2.2 Directivité d'un élément d'antenne isotrope :

Calculons la directivité le long de la coupe d'azimut constant figure 3.8, en changeant toutes les angles d'azimut de zéro degré. Tous les angles d'élévation sont centrés autour de la ligne de visée.

```
ang = [0,0,0,0,0; -20,-10,0,10,20];
```

Résultat :

$$d = 5 \times I$$

```
00000
```

Remarquons que Pour une antenne isotrope, la directivité est indépendante de la direction (figure 3.7). Le manuel de MATLAB indique que la directivité est le rapport entre l'intensité dans une direction donnée et l'intensité d'une antenne isotrope de même puissance.

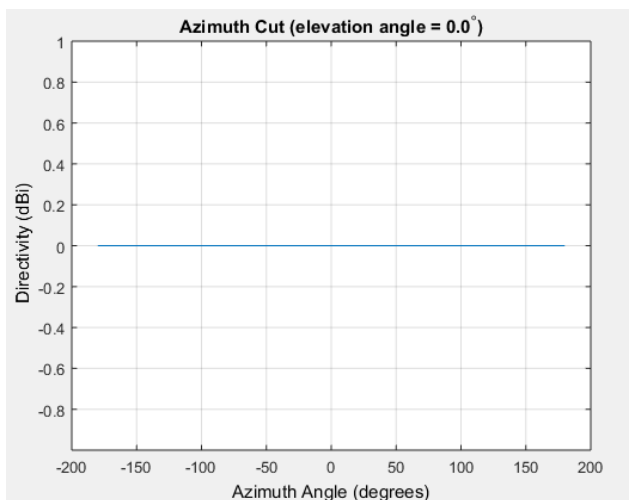


Figure 3-7 : coupe en azimut de la directivité d'antenne.

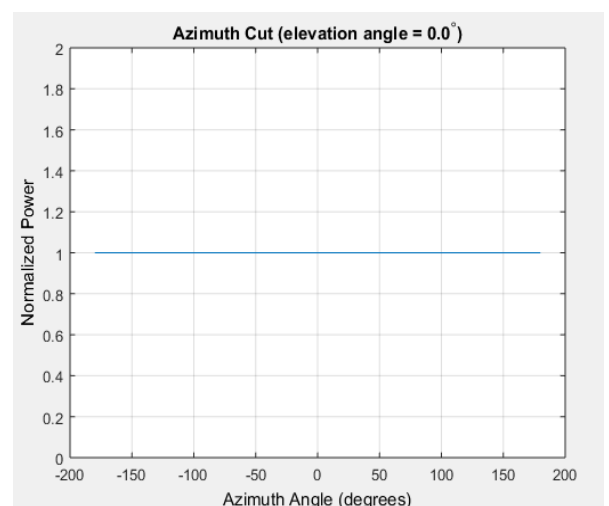


Figure 3-8: coupe en azimut de la puissance d'antenne.

On va tracer le diagramme de magnitude en 3D de l'antenne à 10GHz de -30 à 30 degrés en azimut et en élévation par incréments de 0,1 degré.

La figure 3-9 montre le diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope émettant uniquement en une direction.

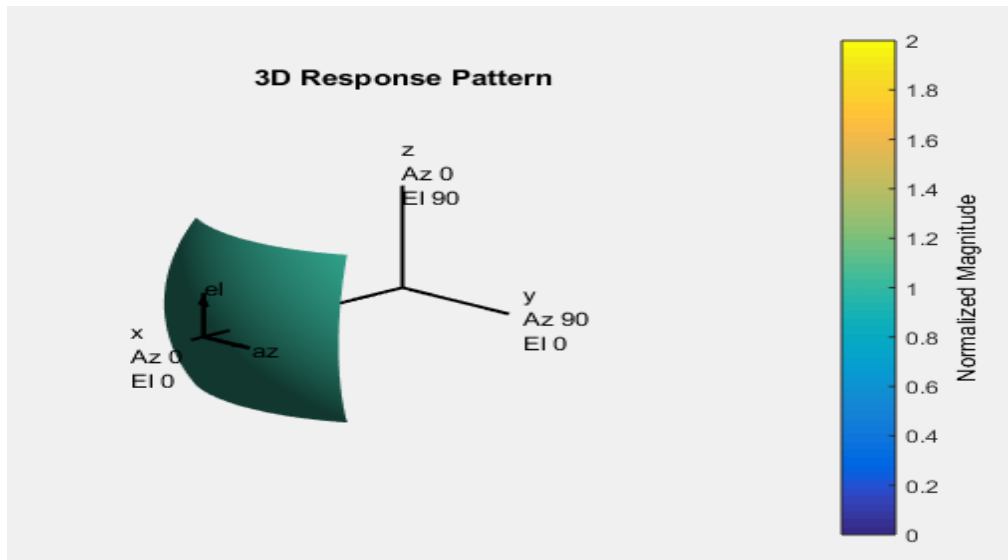


Figure 3-9: Modèle de réponse en 3D.

3.3.2.3 Directivité azimutale restreinte d'un élément d'antenne isotrope :

La figure 3.10 montre un traçons d'une coupe azimutale de la directivité d'un élément d'antenne isotrope à 0 puis à 30 degrés d'élévation.

Et la figure 3.11 est une plage réduite d'angles d'azimut [-20 :20].

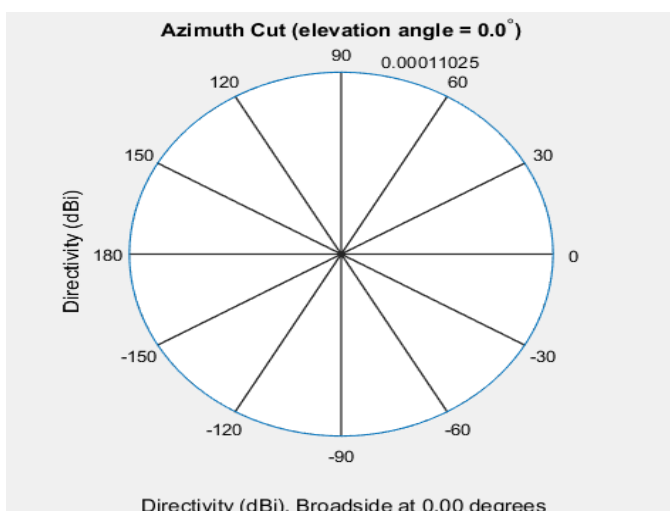


Figure 3-10 : coupe en azimut.

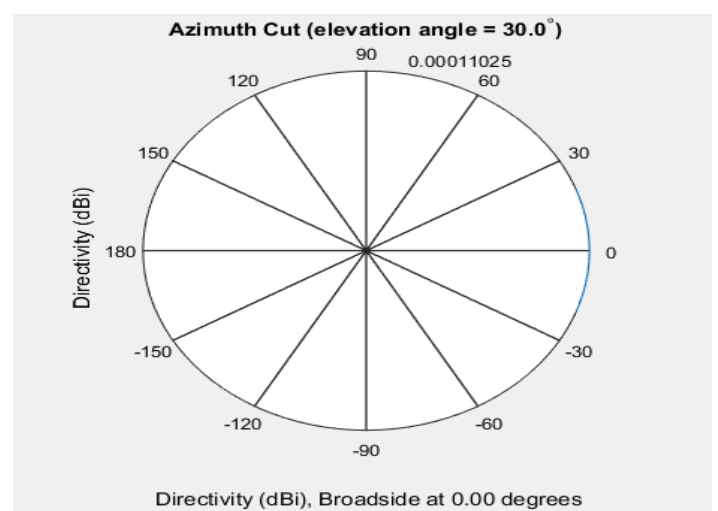


Figure 3-11 : coupe en azimut avec plage réduite.

3.3.2.4 Plate-forme par étapes :

Le système de plateformes par étapes modélise le mouvement de translation d'une ou plusieurs plateformes dans l'espace. Une plateforme peut être une cible telle qu'un véhicule ou un avion, ou un sonar ou un émetteur et récepteur radar. Le modèle suppose que la plateforme subit un mouvement de translation à vitesse constante ou à accélération constante au cours de chaque étape de simulation. Les positions et les vitesses sont toujours définies dans le système de coordonnées global.

Pour modéliser une plate-forme en mouvement il faut :

1. Définisse et configurer notre plate-forme.
2. Appeler à plusieurs reprises la méthode des étapes pour déplacer la plate-forme le long d'un chemin déterminé par les propriétés de la plate-forme.

3.3.2.4.1 Simulation de mouvement d'une plate-forme :

On va créer une plate-forme à l'origine ayant une vitesse de (100 100,0) mètres par seconde. Nous allons Simuler le mouvement de la plate-forme pour deux pas de temps, en supposant que le temps écoulé pour chaque pas est d'une seconde. La position de la plate-forme est mise à jour après chaque étape comme suite :

Au premier appel à l'étape, la position est à sa valeur position initiale à 0.

Au deuxième appel à l'étape, la position change à 100.

Donc pour chaque appel la nouvelle position sera la position précédente+100. A chaque appel la position change. Utilisons la fonction de télémétrie pour déterminer la portée et l'angle entre l'antenne et la cible.

3.3.3 Radiateur à phases :

Le système de radiateur à commande de phase objectTM met en œuvre un radiateur de signal à bande étroite. Un radiateur convertit les signaux en champs d'ondes rayonnés transmis par des réseaux et des éléments de capteurs individuels tels que des antennes, des éléments de microphone et des transducteurs de sonar. La sortie du radiateur représente les champs à une distance de référence d'un mètre du centre de phase de l'élément ou du réseau.

-modéliser les signaux électromagnétiques rayonnés comme des champs polarisés ou non polarisés selon que l'élément ou le réseau supporte la polarisation et la valeur de la propriété de polarisation. En utilisant la polarisation, Nous pouvons transmettre un signal comme un champ électromagnétique polarisé, ou transmettre deux signaux indépendants en utilisant des polarisations doubles.

-modéliser les champs acoustiques rayonnés en utilisant des éléments non polarisés du réseau de microphones et de transducteurs de sonar et en réglant la polarisation sur "Aucune". Nous devons également régler la vitesse de propagation sur une valeur appropriée au milieu.

3.3.4 Collecteur progressif (Phased.collector) :

Le système phased.Collector object™ met en œuvre un collecteur de signaux à bande étroite. Un collecteur convertit les champs d'ondes à bande étroite incidents arrivant de directions spécifiques en signaux à traiter ultérieurement. Les champs d'ondes sont incidents sur les éléments d'antenne et de microphone, les réseaux de capteurs ou les sous-réseaux. L'objet collecte les signaux de l'une des deux manières contrôlées.

Nous pouvons utiliser cet objet pour :

- modéliser les signaux arrivants sous forme de champs polarisés ou non polarisés selon que l'élément ou le réseau supporte la polarisation et la valeur de la propriété de polarisation.
- modéliser les champs acoustiques entrants en utilisant des éléments non polarisés du réseau.

Nous devons également régler la vitesse de propagation sur une valeur appropriée au milieu.

3.4 Réseau d'antenne :

Un réseau d'antenne par définition est l'association régulière d'antennes identiques pour créer un rayonnement de forme particulière. La puissance rayonnée est donc plus grande puisqu'on multiplie le nombre d'éléments rayonnants. Le rayonnement résulte de l'addition en phase des champs provenant de chaque élément [44].

3.4.1 Principe :

Un réseau d'antennes est constitué de plusieurs éléments qui dans la plupart des cas sont similaires (filaire, planaire, à ouverture...) disposés selon une géométrie particulière. Un réseau d'antenne est appelé :

- Uniforme : s'il est constitué de N éléments identiques possédant N amplitudes d'excitation égales mais chacun a une phase progressive d'excitation fixe nommée β .
- À balayage : s'il permet de diriger le maximum du faisceau dans plusieurs directions afin de balayer une zone désirée et ceci uniquement en contrôlant la différence de phase d'excitation entre les éléments [45].

On désire 2 types de balayage :

- **Balayage Mécanique :**

Dans le balayage mécanique du faisceau d'une antenne, rien ne change sur l'antenne pendant le balayage. L'antenne possède une position du faisceau principal fixe et on déplace la position de l'antenne mécaniquement à l'aide d'un système d'entraînement automatisé pour déplacer la position du faisceau comme on le désire

- **Balayage Électronique :**

Le balayage électronique du faisceau principal d'une antenne consiste à changer la direction de ce dernier sans avoir à bouger la position de l'antenne. Il existe plusieurs techniques pour effectuer le balayage électronique du faisceau principal d'une antenne.

Les grandeurs électriques (signaux) injectées ou collectées (voir figure 3.12) sur l'accès de chacune de ces sources sont pondérées en amplitude et (ou) en phase avant d'être sommées entre elles. Un répartiteur de faisceaux permet de réaliser les sommations cohérentes et pondérées des signaux collectés par un système en réception, ce même répartiteur réalisera les signaux pondérés qui seront injectés sur chaque source de l'antenne d'émission.

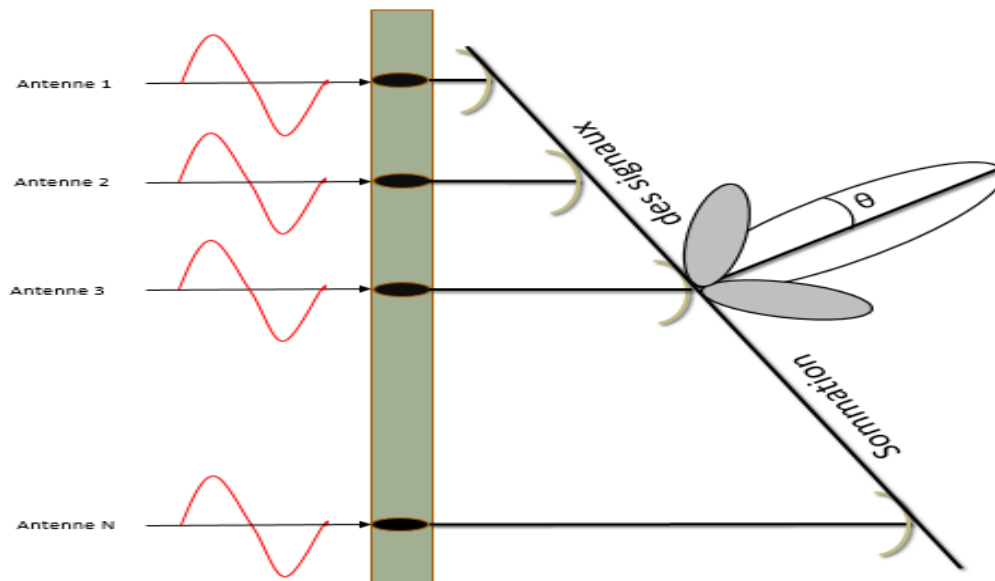


Figure 3-12 : schéma électrique représentant la formation de faisceau d'un réseau d'antenne.

3.4.2 Alimentation d'un réseau d'antennes :

L'alimentation d'un réseau d'antennes s'effectue à travers un réseau d'alimentation qui assure la répartition d'énergie sur différentes antennes élémentaires. Selon le besoin, le réseau d'excitation peut avoir des architectures différentes. Nous montrons sur la figure deux types d'alimentations d'un réseau d'antennes :

- **Alimentation série :** les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée
- **Alimentation parallèle :** le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément [46].

3.4.3 Réseaux d'antennes uniformes :

Le réseau d'antennes uniforme est un réseau dont les éléments ont la même amplitude d'excitation et sont espacés par la même distance « d ».

On modifie le nombre d'éléments et l'espacement et on observe la géométrie du réseau. Les éléments sont positionnés sur l'axe des x et sont numérotés de gauche à droite comme montre la figure 3.13

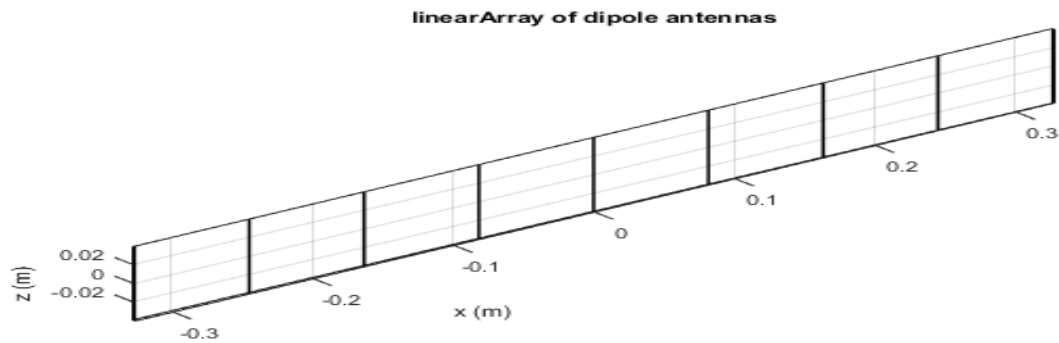


Figure 3-13 : réseau linéaire d'un dipôle d'antenne.

3.4.4 Réseau d'antennes linéaire ULA :

Un réseau linéaire est un ensemble de N sources élémentaires disposées selon un axe donné et excitées par un même système d'alimentation à une entrée et N sorties. Dans le cas des antennes multifaisceaux, le système d'alimentation à M entrées et N sorties, mais il peut être vu, au niveau du rayonnement, comme la superposition linéaire de M sous-systèmes à une entrée, ce qui nous ramène au cas élémentaire que nous détaillons ici. Les sources élémentaires sont espacées deux à deux de la distance d , appelée pas du réseau (voir figure 3.14) [47].

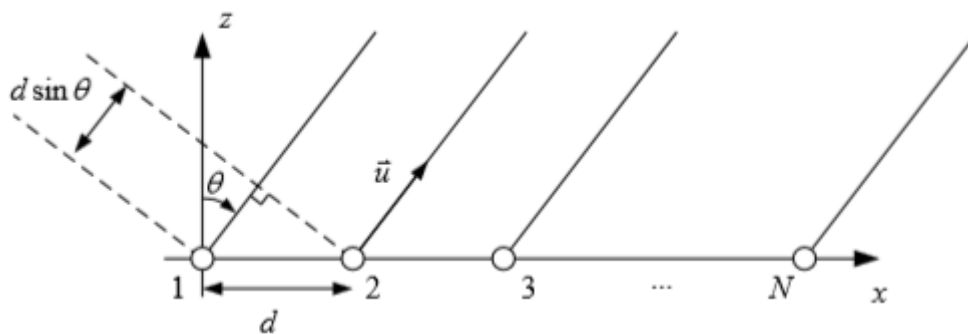


Figure 3-14 : Géométrie d'un réseau linéaire uniforme.

La figure 3.15 représente La géométrie sous Matlab d'un réseau d'antennes ULA composé de 7 espacés de **0.5m**.

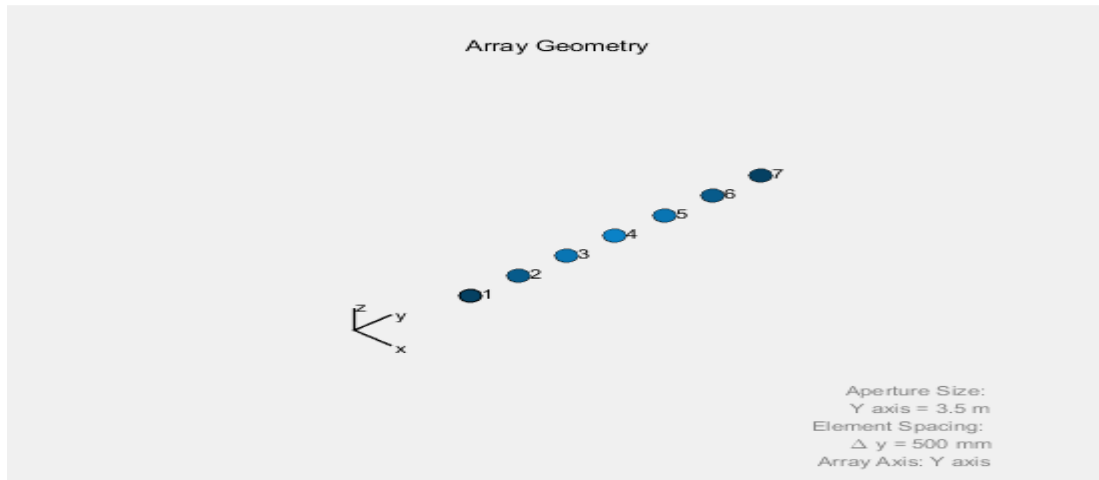


Figure 3-15 : Géométrie d'un réseau d'antennes ULA à 7 éléments espacés de 0.5 m.

3.5 Simulations des réseaux d'antennes sous Matlab :

3.5.1 Réseaux d'antennes linéaire :

En utilisant un réseau d'antennes il est possible de modifier la position du faisceau principal. Effectivement, si le déphasage entre les éléments d'un réseau d'antennes varie linéairement d'un élément à l'autre, alors il en suivra un déplacement du faisceau principal

[48-49]. Ce type de réseau est très souvent appelé réseau d'antenne à commande de phase (« phasedarray ») [50-56].

- Tracer un modèle de réseau 3D :

La figure 3.16 illustre une visualisation d'un motif pour un réseau linéaire dans l'espace 3D et en polaire 2D à la fréquence de conception qui correspond à l'angle d'élévation zéro.

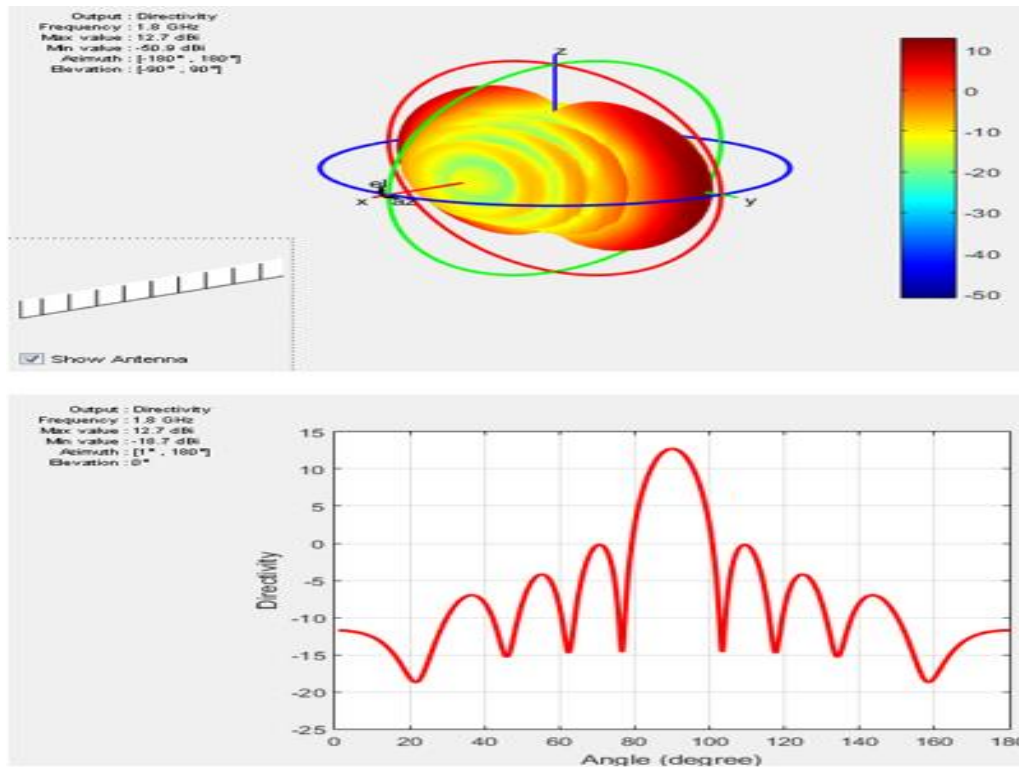


Figure 3-16 : Le modèle 3D du réseau montre le maximum du faisceau à un angle azimutal de 90 degrés, Tracer un diagramme de rayonnement en 2D.

directivité de pointe de 12,83 dBi, et les premiers lobes latéraux de chaque côté de la crête sont d'environ 13 dB vers le bas. Cela s'explique par le fait que le réseau présente une conicité d'amplitude uniforme, tous les éléments étant alimentés à 1V. Le niveau des lobes latéraux peut être contrôlé en utilisant différents cônes d'amplitude sur les éléments du réseau.

3.5.2 Réseaux d'antennes à commande de phase (Phasedarray) :

Pour introduire le décalage de phase entre les éléments dans un système Phased Array, des déphaseurs sont utilisés. Ces déphaseurs peuvent être analogiques [52-53] (meilleure précision, faible coût et de faibles pertes), numériques [10-13][54-55] (meilleure rapidité, facilité de fabrication) ou encore mixtes [56]. Concevoir des réseaux d'antenne à commande de phase pouvant balayer le faisceau dans n'importe quelle direction possible et à une vitesse remarquable (360 degrés de balayage en quelques secondes seulement).

Le choix d'un ensemble de déphasages nous permet de balayer le faisceau sous un angle spécifique. Cette configuration de réseau linéaire permet un balayage dans le plan azimutal (plan x-y), qui correspond à l'angle d'élévation zéro. La figure 3.17 montre un

balayage du faisceau s'effectue à 30 degrés en dehors de la largeur (angle azimutal de 120 degrés).

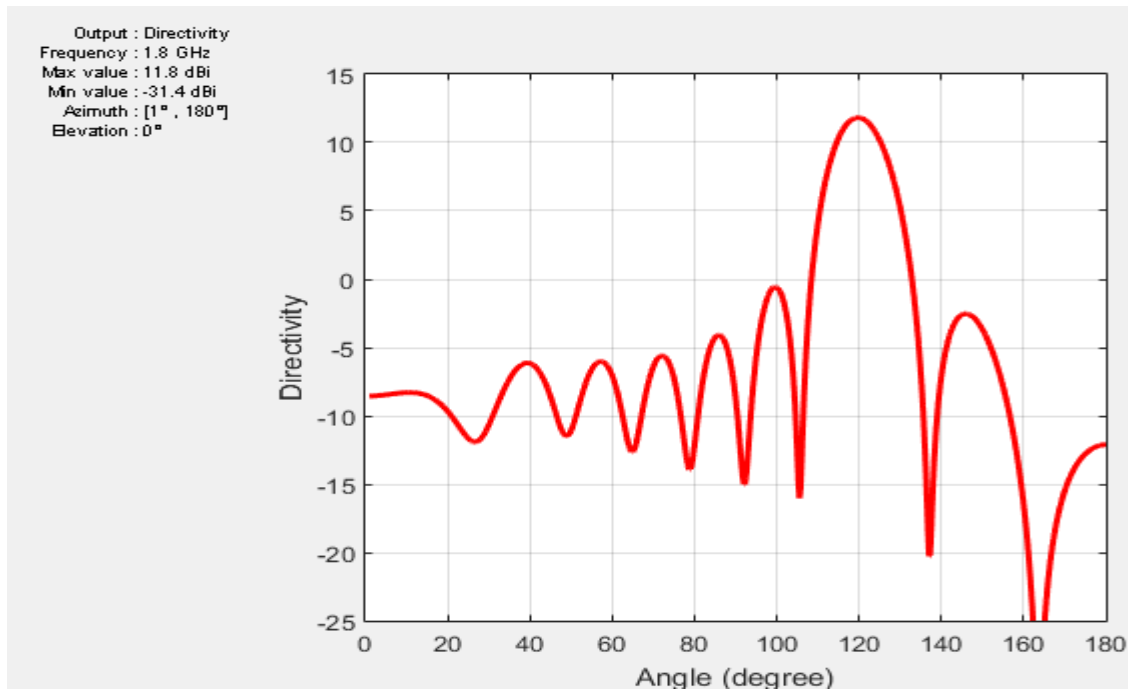


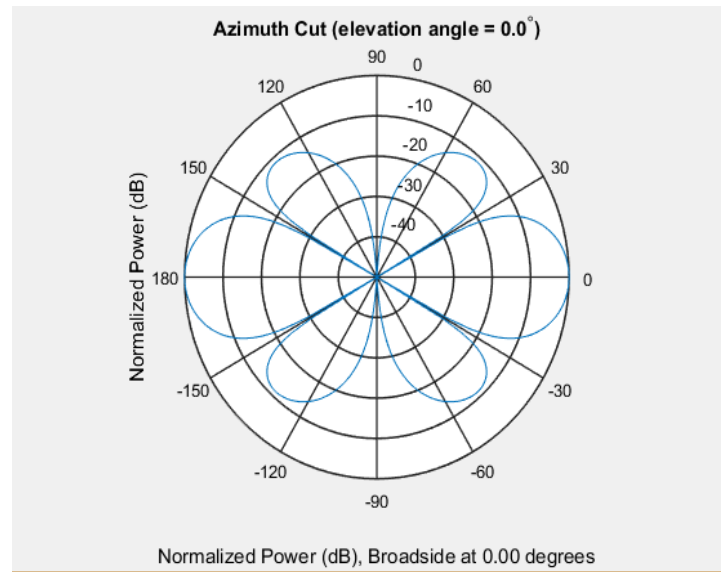
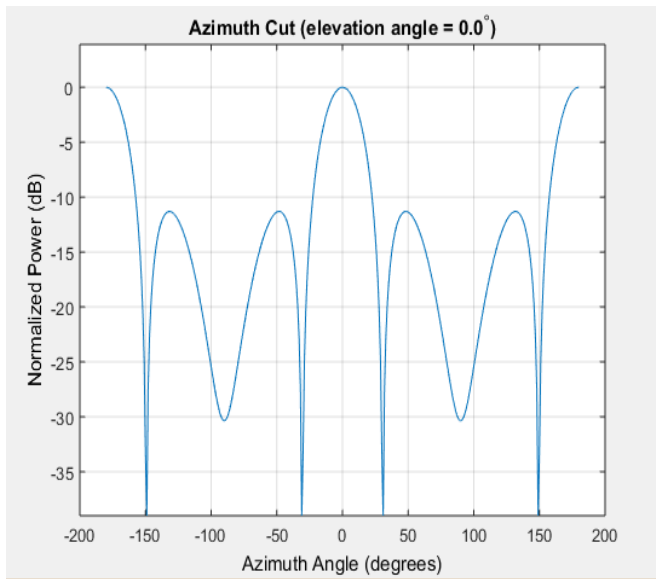
Figure 3-17 : un balayage du faisceau s'effectue à 30 degrés.

Le pic du faisceau principal est maintenant à 30 degrés du pic initial (azimut = 90 degrés). On remarque que la baisse de directivité d'environ 0,9 dB. Pour les réseaux infinis, cette baisse augmente avec l'augmentation de l'angle de balayage selon une loi cosinusoidale [57].

3.5.3 Réponse azimutale d'un réseau d'antennes linéaire ULA :

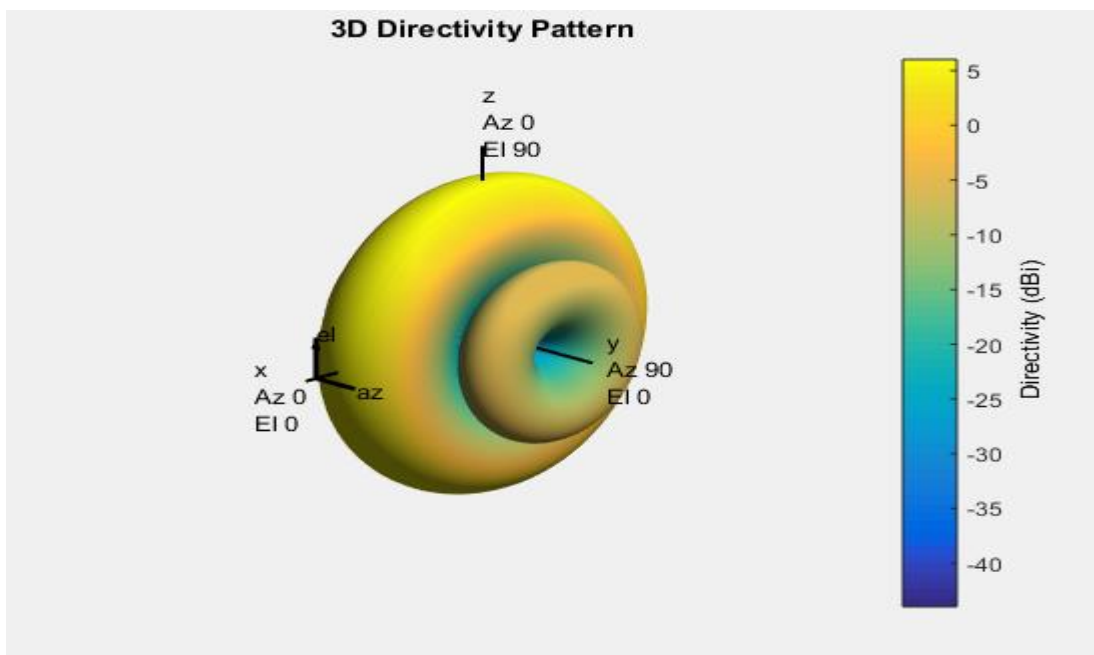
Nous avons visualisé quelques exemples sous Matlab de réponse azimutale d'un réseau linéaire :

Exemple 1 : un réseau linéaire de **4 éléments** espacés de **$d = 0.5 \lambda$** avec une fréquence de **10 GHz**.



(a)

(b)



(c)

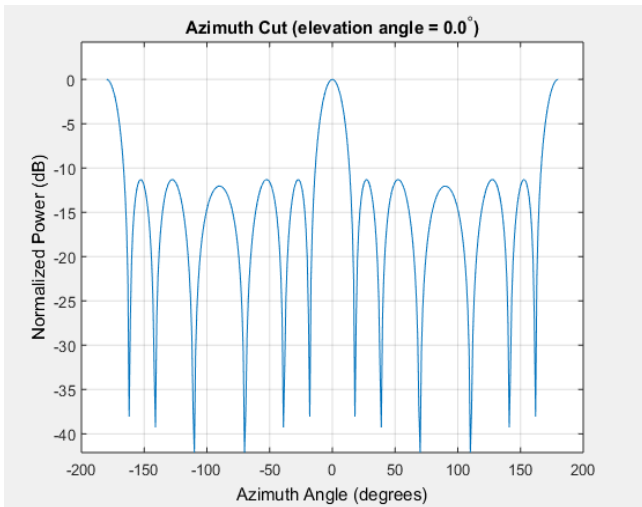
Figure 3-18 : un réseau linéaire de 6 éléments espacés de 0.5 lambda.

(a) : Réponse en cartésienne .

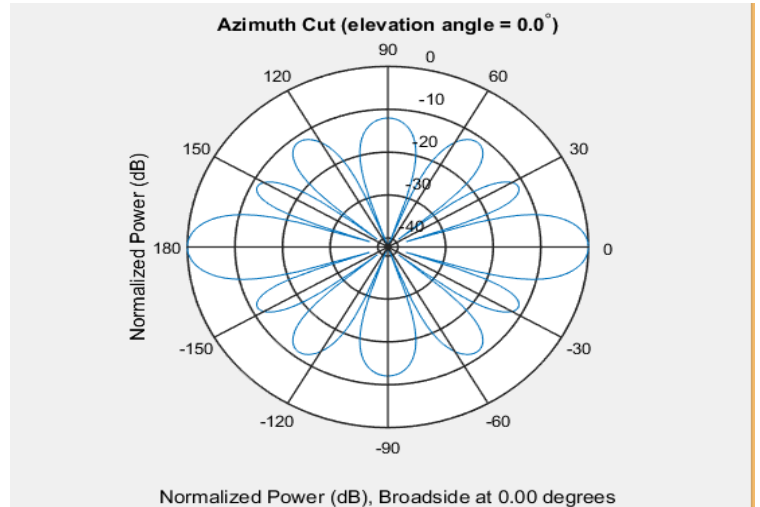
(b) : Réponse en polaire.

(c) : Réponse en 3D.

Exemple 2 : un réseau linéaire de **4 éléments** espacés de **$dx = 0.8 \lambda$** avec une fréquence de **10GHz**.



(a)



(b)

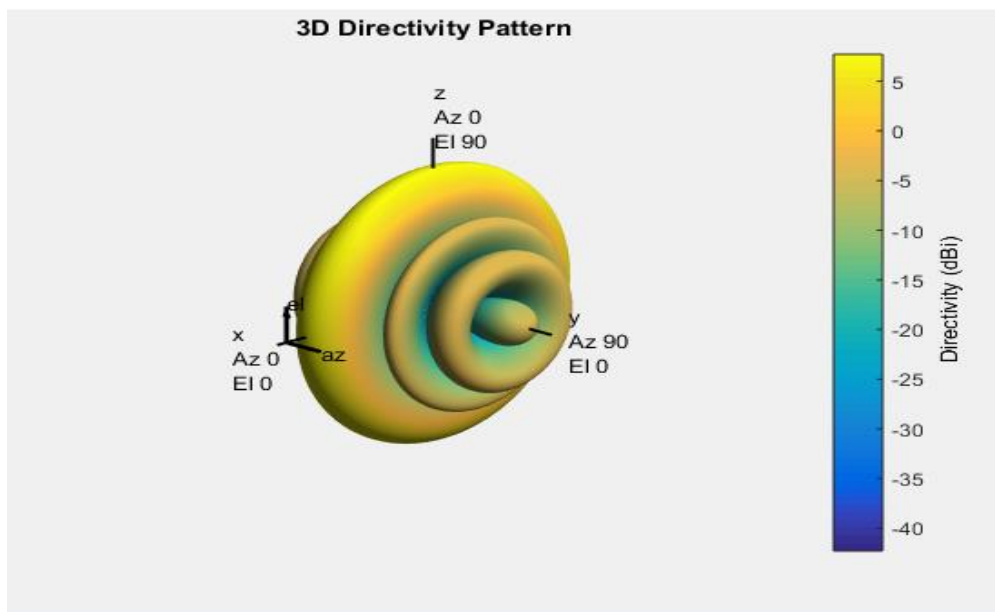


Figure 3-19 : un réseau linéaire de 6 éléments espacés de 0.8 lambda.

- (a) : Réponse en cartésienne ;
- (b) : Réponse en polaire ;
- (c) : Réponse en 3D.

Chapitre 4 : Analyse d'un Système Radar
Monostatique

4.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de d'écrire comment modéliser et simuler un code Matlab d'un système radar à impulsions monostatique avec un réseau d'antennes, dans le but de détecter l'emplacement et la localisation des cibles avec un maximum de précisions, en utilisant l'outil Matlab b2015a. Le modèle général d'un système radar est composé d'un générateur de formes d'ondes, un émetteur et récepteur coure dans un environnement comprenant une cible de propagation et des interférences modélise un récepteur frontal et des algorithmes de traitement de signal de réseau, tel que les formateurs de faisceau (Un formateur de faisceau : est un système qui exécute le traitement de signaux avec un réseau d'émetteurs ou récepteurs.) et estimation de direction d'arrivée.

Ce chapitre, se concentre sur un ensemble de spécifications de conception de ce système radar à impulsions monostatique. Il décrit les étapes permettant de traduire les spécifications de conception, telles que la probabilité de détection et la résolution de la portée, la probabilité de fausse alarme en paramètres du système radar, tels que la puissance d'émission et la largeur d'impulsion. Il modélise également l'environnement et les cibles pour synthétiser le signal reçu. Enfin, des techniques de traitement du signal sont appliquées au signal reçu pour détecter la portée des cibles.

4.2 Les spécifications de conception :

L'objectif de ce système est de détecter des cibles non fluctuantes (la position de la cible est stable). Un radar à impulsions mono-statique est un type de radar dans lequel l'émetteur et le récepteur sont situés au même endroit. Il utilise la même antenne pour émettre et recevoir les signaux d'écho.

Notre travail se concentre sur la conception des radars à impulsions monostatiques utilisant la bande ultra-large. Dans cette conception, l'émetteur envoie une impulsion qui frappe la cible et le récepteur qui reçoit le signal d'écho où il peut estimer la distance de la cible. Le radar monostatique est conçu de telle sorte qu'il peut suivre une cible de 3 à 5 km sans aucune fausse alerte. L'enjeu de notre travail est d'améliorer la probabilité de détection en utilisant la bande de fréquence de 10 GHz. La gamme du spectre de la bande ultra-large (UWB) est de 10 GHz, on va donc défini la gamme de fréquences de l'antenne à 5-15 GHz. Cet exemple suppose un environnement en espace libre. Les résultats de la simulation seront montrés par la suite.

Il y a deux types de la détection à distance :

- **La détection cohérente** : qui nécessite des informations sur les phases de l'impulsion transmise [2]. Donc, il est difficile d'être de manière traditionnelle moins chers.
- **La détection non cohérente** : ne nécessite pas beaucoup les techniques de calcul utilisées pour la détection cohérente [3].

4.3 Déclaration des principaux paramètres :

- Une section transversale d'au moins un mètre carré (RCS).
- Une distance allant jusqu'à 5000 mètres du radar.
- Une résolution de portée de 50 mètres.
- Une probabilité de détection (P_d) de 0,9.
- Une probabilité de fausse alarme (P_{fa}) inférieure à $1e-6$.

4.4 Configuration du radar mono-statique :

4.4.1 L'étape de configuration des paramètres du radar :

Nous devons définir plusieurs caractéristiques du système radar telles que La forme d'onde, le récepteur, l'émetteur et l'antenne utilisée pour émettre et collecter le signal.

4.4.1.1 Génération de la Forme d'onde :

Dans notre cas, nous choisissons une forme d'onde rectangulaire. La résolution de la portée souhaitée détermine la largeur de bande de la forme d'onde, et dans le cas d'une forme d'onde rectangulaire, elle détermine la largeur de l'impulsion. Le paramètre important d'une forme d'onde d'impulsion est la fréquence de répétition des impulsions (PRF). Elle est déterminée par la gamme maximale sans ambiguïté. Et nous avons fixé le taux d'échantillonnage à deux fois la largeur de bande.

4.4.1.2 Les Caractéristiques du bruit du récepteur :

Nous supposons que le seul bruit présent au niveau du récepteur est le bruit thermique. Ce bruit est lié à la largeur de bande du récepteur, et elle est définie comme étant la même la largeur de bande de la forme d'onde. Nous posons que le récepteur a un gain de 20 dB et un bruit de 0 dB.

4.4.1.3 Emetteur :

Le paramètre le plus critique d'un émetteur est la puissance d'émission de crête. Parmi eux le SNR requis au niveau du récepteur qui est déterminé par l'objectif de conception de Pd et Pfa. Donc on va générer un graphique qui indique la relation entre Pfa et Pd appelé Receiver operating Curve (ROC).

Au premier lieu, les courbes ROC montrent une valeur de SNR assez élevée environ 13dB, pour rendre le système de radar plus flexible, nous utilisons une technique d'intégration impulsion (10 impulsions) pour réduire le SNR requis à environ 5 dB. Il est souvent souhaitable de calculer la valeur du SNR requise en utilisant le modèle de l'équation d'Albersheim.

Lorsqu' on obtient 5 dB de SNR au niveau du récepteur, la puissance de crête sera calculée en fournissant le RCS requis, et en supposant que le gain de l'émetteur est de 20 dB et en fixant la fréquence de fonctionnement à 10 GHz, et la longueur d'onde de la bande ultra-large.

4.4.1.4 Radiateur et collecteur :

Dans un système radar, le signal se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Par conséquent, le signal doit être rayonné et recueilli par l'antenne utilisée dans le système radar. C'est là où le radiateur et le collecteur entrent en jeu. Le système radar monostatique, le radiateur et le collecteur se partagent la même antenne, nous allons donc d'abord définir l'antenne. Pour simplifier la conception, nous choisissons une antenne isotrope qui rayonne une énergie de -180 à +180 degrés et de -90 à +90 degrés en azimut et en élévation respectivement. Nous fixons la fréquence de fonctionnement du système (10 GHz) et la gamme de fréquences de l'antenne (5-15 GHz).

4.4.1.5 Le traitement après configuration :

Après la configuration des paramètres, ce modèle radar est mis en œuvre comme suit :

- Fixer le temps de pas entre les impulsions,
- Positionnement de l'antenne,
- Calcul de la distance et génération l'impulsion nécessaire,
- Transmettre l'impulsion,
- Collecte et réception de l'écho par l'antenne,

- Traçage de la puissance par rapport à la portée,
- Evaluation de la performance du système.

4.4.2 L'étape de simulation du système :

4.4.2.1 Cibles :

Pour tester la capacité de notre radar à détecter des cibles, nous devons définir les cibles d'abord. Supposons qu'il y'a 3 cibles flottantes non stationnaires dans l'espace.

4.4.2.2 Environnement de propagation :

Nous utilisons le modèle d'environnement d'espace libre pour toutes les cibles. Pour simuler le signal, nous devons également définir le canal de propagation entre le système radar et chaque cible. Comme notre exemple utilise un système de radar monostatique, les canaux sont réglés pour simuler des délais de propagation dans les deux sens.

4.4.2.3 Synthèse des signaux :

Le signal synthétisé est une matrice de données avec le temps rapide (temps à l'intérieur de chaque impulsion) le long de chaque colonne et le temps lent (temps entre les impulsions) le long de chaque ligne. Pour visualiser le signal, il est utile de définir à la fois la grille de temps rapide et la grille de temps lent.

A l'aide d'une boucle pour simuler 10 impulsions du signal reçu. Nous mettons à jour la position de l'antenne et la position de la cible pour chaque cible, et nous fixons le bruit dans le récepteur afin de pouvoir.

4.4.2.4 Détection de la portée :

- **Seuil de détection :**

La détection est une partie importante d'un système radar ou sonar. Le détecteur compare la puissance du signal à un seuil donné. Dans le radar, le seuil est souvent choisi de manière à ce que le Pfa soit inférieur à un certain niveau. Dans ce cas, nous supposons que le bruit est blanc gaussien et la détection est non cohérente.

- **Filtre adapté :**

Pour améliorer la détection du radar, on ajoute au bloc récepteur un filtre adapté (Matched filter) qui va offrir au traitement un gain qui améliore le seuil de détection. Par conséquent, nous devons spécifier la forme d'onde transmise lors de la création de notre filtre adapté. Les impulsions reçues sont d'abord passées à travers un filtre adapté pour améliorer le rapport signal/bruit avant de procéder à l'intégration des impulsions, à la détection du seuil. Le filtre apparié introduit un retard de filtrage intrinsèque de sorte que les emplacements du pic (l'échantillon de sortie du SNR maximum) ne sont plus alignés avec les véritables emplacements de la cible.

4.5 L'équation d'Albersheim :

L'équation d'Albersheim est une formule simple pour le rapport signal/bruit (SNR) en décibels qui est requis pour atteindre un niveau de performance donné pour la détection des enveloppes d'un signal non fluctuant (sinusoïdal) en bande étroite le bruit [1].

Dans la théorie de la détection radar, la probabilité de détection P_d , la probabilité de fausse alarme P_{fa} , le nombre d'échantillons N intégrés de manière non cohérente pour un seul test de détection, et le rapport moyen signal/bruit (SNR) d'un seul échantillon χ sont étroitement liés. L'équation d'Albersheim met en relation la P_d , la P_{fa} , N et le SNR à échantillon unique en décibels χ_{db} . Comme on le présente habituellement [2][3] :

$$A = \ln \left(\frac{0.62}{P_{FA}} \right) \quad (4.1)$$

$$B = \ln \left(\frac{P_D}{1 - P_D} \right) \quad (4.2)$$

$$\chi_{db} = -5 \log_{10} N + \left(6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{N + 0.44}} \right) \log_{10} (A + 0.12AB + 1.7B) \quad (4.3)$$

4.6 Résultats d'exécution du programme Radar Mono-Statique :

4.6.1 Génération de la courbe ROC :

La figure 4.1 montre un graphique qui indique La relation entre P_d , P_{fa} et le SNR

qui est représentée par une courbe des caractéristiques de fonctionnement du récepteur appelé Receiver operating Curve(ROC). Nous pouvons alors déterminer la puissance nécessaire pour répondre à cette exigence

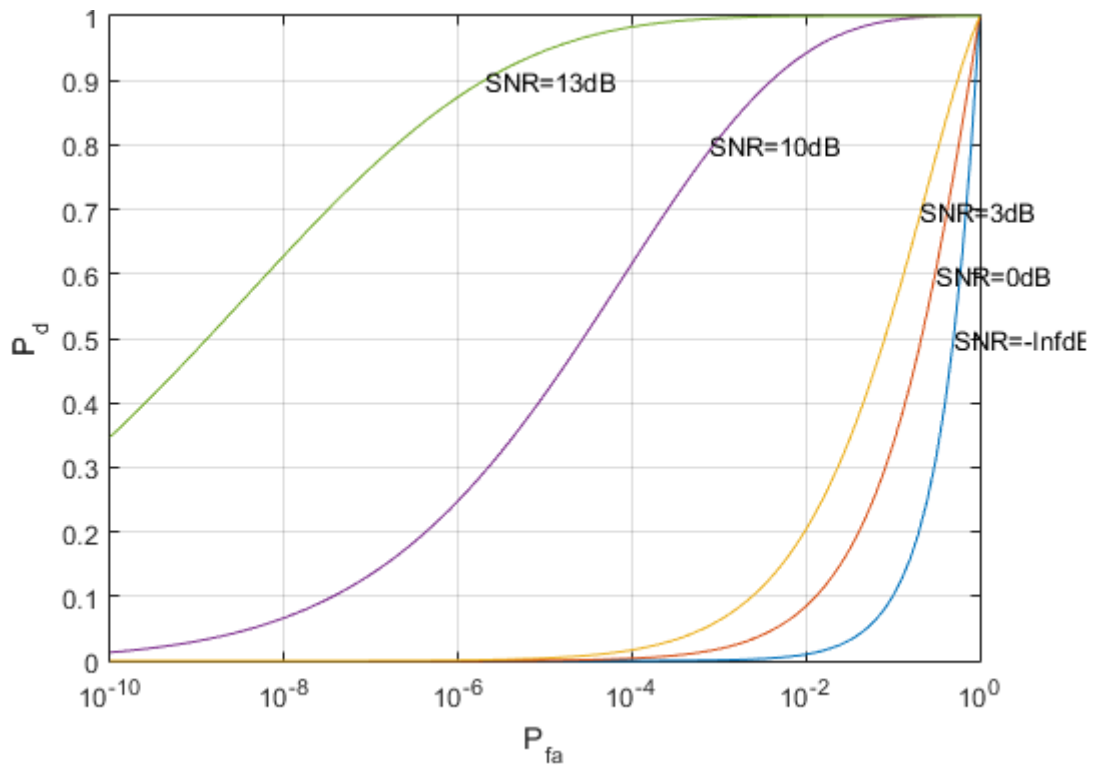


Figure 4-1: les courbes des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) Non fluctuante.

Les courbes ROC montrent que pour satisfaire aux objectifs de conception de $P_{fa} = 1e-6$ et $P_d = 0,9$, le SNR du signal reçu doit dépasser 13 dB. Cette exigence est assez élevée et n'est pas très pratique. Pour rendre le système radar plus réalisable, nous utilisons la technique d'intégration d'impulsions pour réduire le SNR requis. Le résultat est présenté dans la figure suivante :

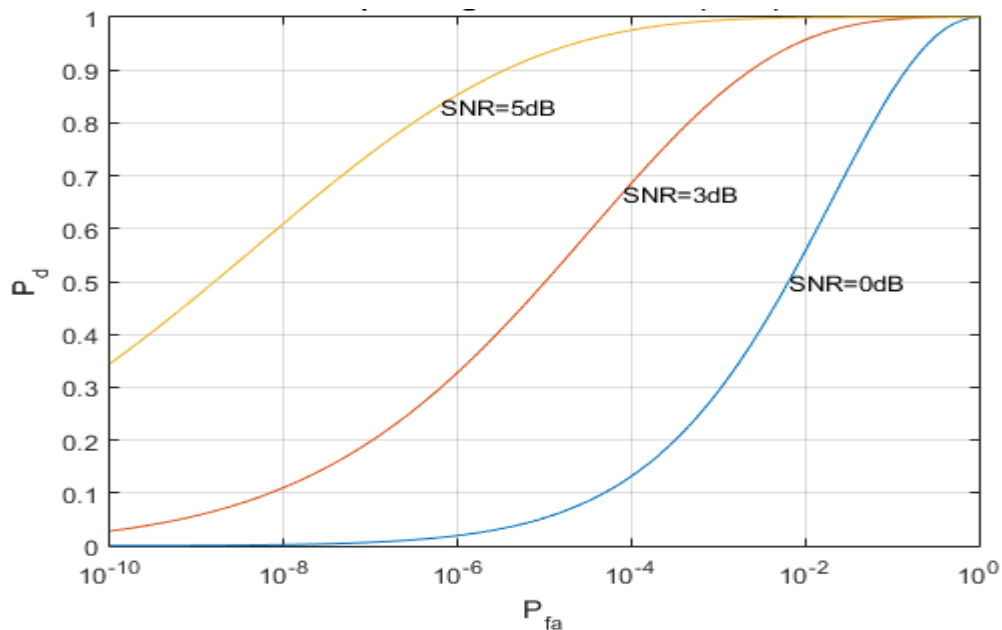


Figure 4-2: les courbes des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) après intégration de 10 impulsions.

On peut voir que la puissance requise est tombée à environ 5 dB. Une réduction supplémentaire du SNR peut être obtenue en intégrant davantage d'impulsions, mais le nombre d'impulsions disponibles pour l'intégration est normalement limité en raison du mouvement de la cible ou de l'hétérogénéité de l'environnement.

On remarque sur la figure (4.2) que plus le SNR augmente plus la probabilité de détection est importante et vice versa si le SNR diminue la probabilité de fausse alarme devient importante, et cela, dégrade la capacité de radar. Cette courbe ROC permet de concevoir le récepteur en déterminant le rapport SNR idéal, et à partir de ce SNR on détermine le filtre adapté.

4.6.2 La détection des cibles :

4.6.2.1 Seuil de détection :

La figure 4.3 nous montre La réception de la première impulsion indique que le seuil de détection calculé est d'environ -126 dBw. Et il y'a une cible bien détectée par contre les deux autres cibles sont à la limite du seuil et ne sont pas détectées, à cause de l'éloignement par rapport au radar.

On observe que la puissance reçue dépend de la portée et que la valeur seuil ne peut être fixée à des cibles situées à différentes portées.

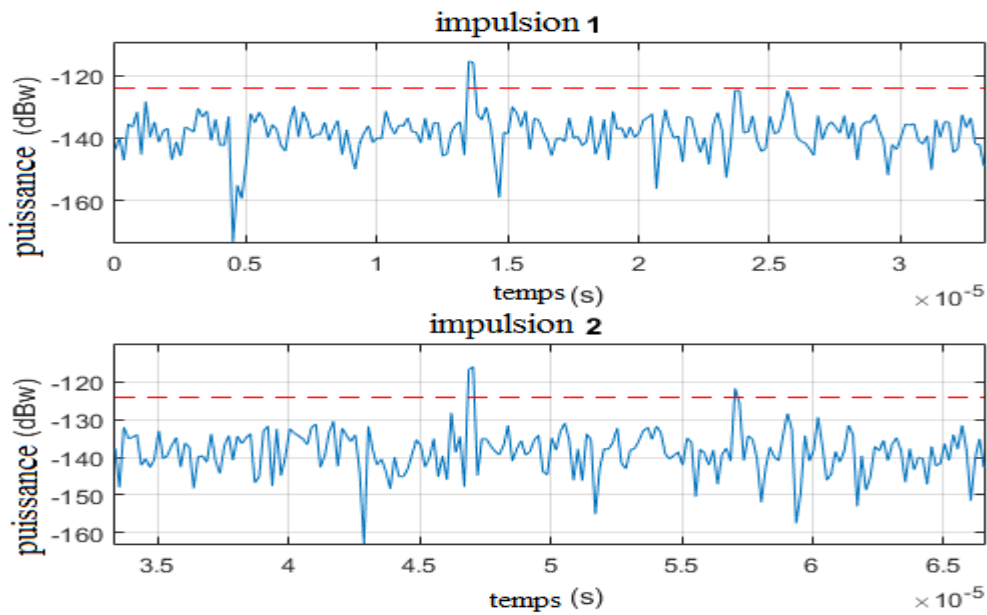


Figure 4-3 : Les impulsions reçues avec seuil.

4.6.2.2 Filtre adapté :

Comme la figure ci-dessous le montre, après l'étape du filtre adapté, le SNR est amélioré. On remarque que le seuil de détection est faiblement amélioré. Mais la troisième cible reste toujours noyée dans le bruit et n'est pas détectée.

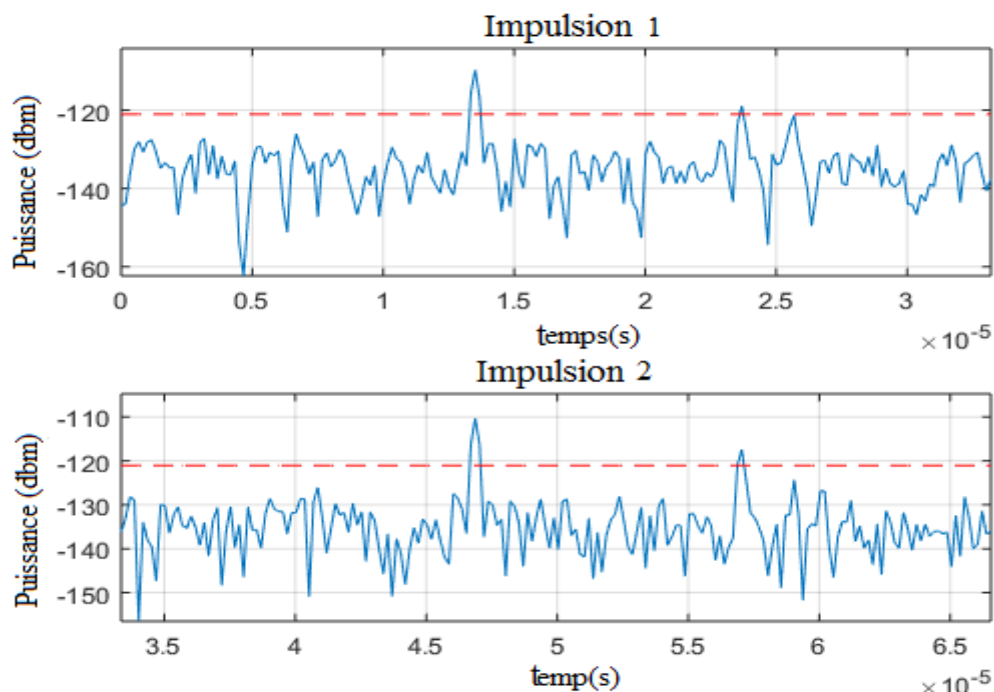


Figure 4-4 : Représentation des deux impulsions avec filtre adapté.

4.6.2.3 Amélioration de la détection en utilisant un gain variant dans le temps :

Nous pouvons utiliser un gain variant dans le temps pour compenser la perte de l'écho reçu qui dépend de la gamme, qui est illustré dans la figure 4.5. On remarque dans ce niveau que le seuil est supérieur au niveau de puissance maximale contenu dans chaque impulsion. Donc, rien ne peut encore être détecté à ce niveau.

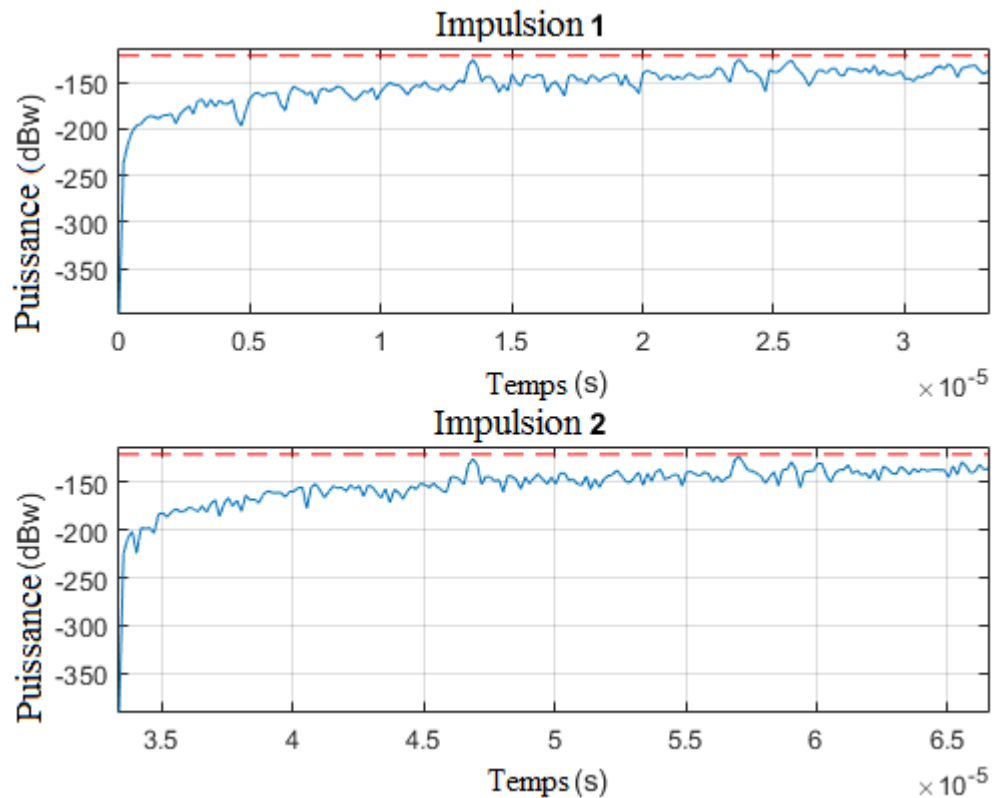


Figure 4-5 : Présentation des deux mêmes impulsions après la normalisation de la portée.

4.6.2.4 Intégration des impulsions non cohérente :

Tant que rien n'a changé dans l'étape précédente, Nous devons procéder à l'intégration des impulsions pour que la puissance des échos renvoyés par les cibles puisse dépasser le seuil tout en laissant le plancher de bruit sous la barre comme le montre la figure 4.6. Ceci est attendu puisque c'est l'intégration des impulsions qui nous permet d'utiliser le train d'impulsions de plus faible puissance. On observe simplement que la détection des trois cibles est atteinte, après l'utilisation des impulsions intégrées non cohérentes.

4.6.2.5 La détection :

L'approximation des distances réelles et les distances détectées des cibles est faite en fonction du calcul de la puissance. Les résultats sont montrés dans le tableau 4.1 suivant :

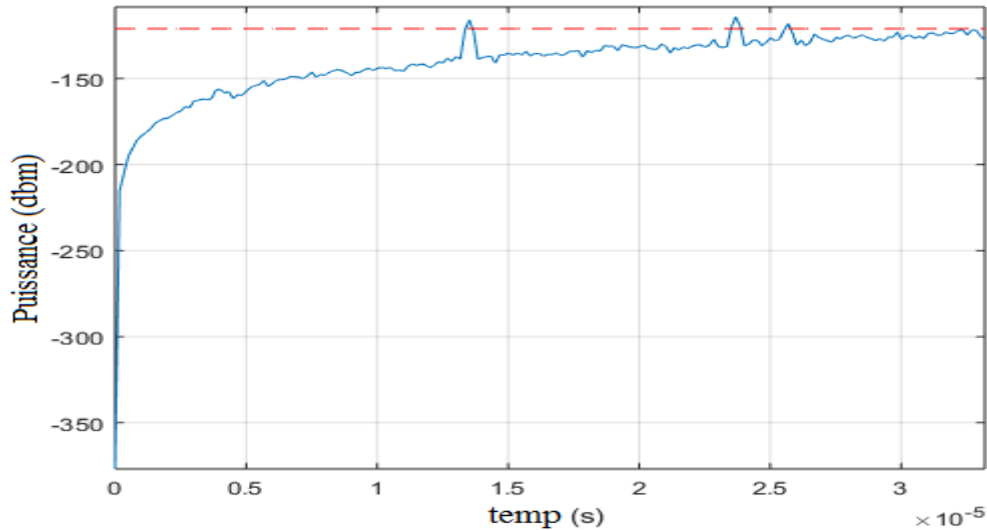


Figure 4-6 : Intégration des deux impulsions de manière non cohérente.

On remarque que les résultats sont pratiquement identiques d'où l'efficacité des fonctions intégrées.

Tableau 4-1: Comparaison entre distance estimée et distance réelle.

	Cible 1	Cible 2	Cible 3
Distance estimée.	2025	3550	3850
Distance réelle.	2001	3533	3845

Remarque : ces estimations de distance ne sont précises que jusqu'à la résolution de distance (50 m) qui peut être atteinte par le système radar.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, et à travers les chapitres qui ont été présentés, nous avons met les points sur différentes blocs et fonctions de la chaine de transmission des radars, et sur les différentes formes d'ondes radars qui amènent à aboutir les meilleures performances.

Dans notre manuscrit et étude, le premier chapitre est consacré à des généralités sur le radar à travers lesquelles on trouve le principe de ce système et ses différents types. L'utilisation de ces types est variable selon le domaine d'applications et les bandes des fréquences attribuées ainsi que l'équation radar.

Nous avons dédié le deuxième chapitre à la composition du système radar tout en décrivant le rôle de chaque élément composant. Dans ce cadre, nous avons donné une présentation générale sur la fonction d'ambiguïté (définition, propriétés...) et les différentes formes d'onde utilisées à l'émission du radar. Le chapitre contient, en même temps, des formalismes mathématiques.

Dans le 3eme chapitres, on s'est focalisé sur les principes de base du réseau d'antennes, qui est le cœur battant de tout système radar ; en décrivant le diagramme de rayonnement, le principe de multiplication de diagramme pour les différents types de réseau d'antennes ; en particulier le réseau ULA (réseau d'antenne uniformes). Ou, nous avons simulé en Matlab ces différentes types des réseaux d'antennes et représenter leurs diagrammes de rayonnements en coordonnées cartésiennes, polaires et en 3D pour faciliter la compréhension de cette problématique.

A la fin de ce travail, on est arrivé à étudier et simuler un radar mono-statique sous MATLAB, où on a pu analyser les performances de notre système radar.

Comme perspective et suite à notre travail consiste à développer toute la chaine de transmission RADAR monostatique sous Simulink/Matlab.

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'enrichir nos connaissances dans le domaine des systèmes de télécommunication sans fil et surtout sur les systèmes RADAR.

Références bibliographiques

- [1] CHABBI Souâd, détection adaptative cfar a censure automatique basée sur les statistiques d'ordre en milieux non Gaussiens, Promotion 2008.
- [2] Sean Victor Hum, S 2018, Course Note: ECE422 Radio and Microwave Wireless Systems, University of Toronto, 2018. viii, 21, 22
- [3] projet, E. I. *Radar à impulsions* (récupéré le 16/04/2020). à partir de <https://hackaday.com/2014/02/24/guest-post-try-radar-for-your-next-project/>
- [4] CHIOUKH, lydia Nouveau radar harmonique à diversité de fréquence pour la détection des signes, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2015
- [5] V. Issakov, *Microwave Circuits for 24 GHz Automotive Radar in Silicon-based Technologies*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010 viii, 22, 23.
- [6] J. D. Taylor, "Ultra-Wideband Radar Technology", 2001, CRC Press.
- [7] IMBS Y, Etude de systÈmes de détection radar large bande en rÈgime transitoire, 213 p Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 1999, N° 41-1999.
- [8] TAYLOR J D, Introduction to ultra-wideband radar systems CRC Press, Boca Raton, Ed: Nunally W C, Edwards R N, Giri D V, 1995 Chap 6: Direct Radiating Systems, p 287.
- [9] Daniels DJ, Royaume-Uni (2004). Radar de pénétration au sol 2e édition, IEE, ISBN 0 86341 360 9 DiFranco.
- [10] Jain, Vipul & Heydari, Payam. *Automotive Radar Sensors in Silicon Technologies*. Springer, 2013, ISBN: 978-1-4419-6774-9 20.
- [11] White paper, Introduction to Radar System and Component Tests. 2013
- [12] La portée maximal, récupéré le 17/04/2020., à partir de <https://www.radartutorial.eu>.
- [13] SADLI, Rahmad. Study and Development of an Ultra-Wide-Band Radar for Vulnerable Road Users Identification. 2019. Paris.
- [14] Bassem R. Mahafza, P. (2000). *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Boca Raton London New York Washington, D.C.
- [15] Julien DELPRATO, Analyse de la stabilité d'impulsion à impulsion des amplificateurs de puissance HEMT GaN pour applications radar en bande S, le 8 Septembre 2016.
- [16] Ioan Nicolaescu, 19-21 September 2001, NiS, Yugoslavia.
- [17] J. Darricau, « physique et théorie du radar », 3eme edition 1984.
- [18] B. Atrouz, « Les Systems radar », Mémoire de Fin d'Étude, Ecole militaire polytechnique , 2016.

- [19] Jean-Claude Souyris, CNES, « Service Altimétrie et Radarm », Janvier 2011.
- [20] Achbi Med, Abdou Abadli, A/Moutaleb, « Analyse des performances des détecteurs ca, os et ml-cardans un clutter de distribution », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique, Université Mohamed khaidar-Biskra, Promotion 2007.
- [21] Geoffroy Mangin, « Etude d'un radar cohérent fonctionnant en mode pulsé : application à la surveillance maritime », Thèse doctorat d'Électronique, Université Montpellier2, 8 Mars 2013.
- [22] Jean-François récoché, Dossier thématique n°5 – Radars et effet Doppler.
- [23] Merrill I. Skolnik, « introduction to radar système », Second Edition, 1980.
- [24] *Mr S. Meguelati*, « Cours Radar », *Université De Blida, 5ème Année Ingénieur, Département Aéronautique (Option : Installation), Année :2009/2010.*
- [25] B. R. Mahafza, A. Elsherbeni, « MATLAB simulations for radar systems design », CRC press, 2003.
- [26] B. Chen, J. Wu, « Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR): A Novel Multi-frequency MIMO Radar», 2014.
- [27] Laurent Déjean, « Détection de petites cibles marines en milieu côtier par radar naéroporté », Thèse doctorat de Telecom Bretagne, 10 novembre 2009.
- [28] Merrill I. Skolnik, « introduction to radar système », Second Edition 1980, p. 413.
- [29] N. Touati, « Optimisation des formes d'ondes d'un radar d'aide à la conduite automobile, robustes vis-à-vis d'environnements électromagnétiques dégradés », thèse électronique, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2015.
- [30] D. K, Barton, S. A, « Leonov, Radar Technology Encyclopedia », Artech House, 1998, page 472.
- [31] Jalal Al-Roomym, Akram Abu- Raidam, « waveformgeneration », January 2010.
- [32] Vishal Riché, « Etude et realisation d'un systeme d'imagerie SAR exploitant des signaux et congurations de communication numerique », Thèse doctorat electronique, l'université Européenne de Bretagne, 25 avril 2013.
- [33] Alexandre Boyer, Antennes, institut national des sciences appliquées de Toulouse ,5ème Année Réseau et Télécom,2011.
- [34] Ulaby, F.T, Fundamentals of Applied Electromagnetics, Prentice Hall, 1999.
- [35] M. Gujral, J.L.W. Li,T. Yuan, and C. W. Qiu, Bandwidth improvement of Microstrip antenna array using dummy ebg pattern on feedline", National University of Singapore, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 127, pp79-92, 2012.

- [36] Makarov, S.N, Antenna and EM Modeling with MATLAB, John Wiley and Sons, Inc, 2002.
- [37] Alireza Kazemipour, Contribution à l'étude du couplage entre antennes, application à la compatibilité électromagnétique et à la conception d'antennes et de réseaux d'antennes, Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, Spécialité : Communications et Electronique, juin 2002.
- [38] Yu-Ming Lee, Shuming T. Wang, Hsien-Chiao Teng, and Shen Cherng, A Functional Microstrip Circuit Module For Annular Slot Antenna, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 136, pp255-267, 2013
- [39] Daihua Wang, Linli Song, Hanchang Zhou, Zhijie Zhang, A Compact Annular Ring Microstrip Antenna for WSN Applications, pp 8663-8674 Sensors 2012 ;
- [40] Vaudon Patrick, Les antennes imprimées, Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques, IRCOM- Université de Limoges, 2004.
- [41] Odile Picon et Coll, « Les ANTENNES Théorie, Conception et Application », DUNOD, 2011
- [42] Md. Maruf Ahamed, Kishore Bhowmik, Md. Shahidulla, Md. Shihabul Islam, Md. Abdur Rahman, " Rectangular Microstrip Patch Antenna at 2GHZ on Different Dielectric Constant for Pervasive Wireless Communication", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol.2, No.3, pp. 417 - 424, June 2012.
- [43] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl and A Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", London, Artech House. 2001.
- [44] <https://fr.scribd.com/document/353880363/Reseaux-d-antennes-2-pdf>
- [45] Mohamed Lamine Abdelghani, « Conception et réalisation d'un système réseau d'antennes ultra large bande à formation de faisceaux basé sur la matrice de Butler » Université du Québec, INRS Énergie Matériaux Télécommunications
- [46] T.A. Milligan *Modern Antenna Desing, second edition* John Wiley & Sons, Inc, 2005
- [47] J.P. HARDANGE, P. LACOMBE, J.C. MARCHAIS, « Radars aéroportés et spatiaux », Edition Masson, 1990
- [48] Warren L., Stutzman, Gary A. Thiele, Antenna Theory and Design, 2nd ed., New-York ; Toronto : John Wiley & Sons, c1998.
- [49] Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2005

- [50] R.J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, Boston, 1994.
- [52] McDonald, G.; Willson, C. "High power ferrite phase shifters for phased array radars," *Active and Passive Components for Phased Array Systems, IEE Colloquium*, vol., no., pp.2/1-2/7, 24 Apr 1992
- [53] Zhao, Z.; Wang, X.; Choi, K.; Lugo, C.; Hunt, A. T; «Ferroelectric Phase Shifters at 20 and 30 GHz," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, vol.55, no.2, pp.430-437, Feb. 2007
- [54] White, J.F.; «Diode Phase Shifters for Array Antennas," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, vol.22, no.6, pp. 658- 674, Jun 1974
- [55] Garver, R.V., "Broad-Band Diode Phase Shifters," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, vol.20, no.5, pp. 314- 323, May 1972
- [56] Itoh, Y.; Murata, T. "An L-band SiGe HBT differential variable phase shifter with a combination of analog and digital phase control," *Microwave Conference, 2009. APMC 2009. Asia Pacific*, vol., no., pp.1589-1592, 7-10 Dec. 2009.
- [57] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, p. 307, Wiley, 3rd Edition, 2013.
- [58] Jae-Hyoung Cho, Sang-Wook Kim, Jong-Gwan Yook, Se-Yun Kim“Considerations of The Blind Region For Single-Borehole Bistatic And Monostatic Pulse Radars”, *Ground Penetrating Radar Conference*, Vol. 2,pp 892-896, South Korea, 2012.
- [59] Non Ambiguous Range,
Page:http://www.alphalpha.org/radar/intro_e.html#Portata%20non%20ambigua, Accessed February 21, 2016.
- [60] Freund, J.E. (1962) *Mathematical Statistics*.Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1962.
- [61] D. W. Tufts and A. J. Cann, “On Albersheim's Detection Equation, *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*, vol. AES-19, no. 4, pp. 644-646, July 1983.
- [62] M. A. Richards, “Noncoherent Integration Gain, and its Approximation”, technical memorandum, June 9, 2010, revised May 6, 2013. Available at www.radarsp.com