

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de L'ingénierat
Département : Electronique
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Electronique
Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Etude et simulation d'un radar de détection

Présenté par : AHMED BIRGA Aboukhamid
BOUMENDJEL Imed Eddine

Encadrant : **TAIBI Mahmoud** Grade Professeur Université : Badji-Mokhtar ANNABA

Jury de Soutenance :

HAMDI Rachid	Prof	Université BADJI-MOKHTAR ANNABA	Président
TAIBI Mahmoud	Prof	Université BADJI-MOKHTAR ANNABA	Encadrant
AMARA Fethi	MCB	Université BADJI-MOKHTAR ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Avant tout nous tenons tout d'abord à rendre grâce à Allah Le Très-Haut et Tout-Puissant de nous avoir donné, la force et le courage, la santé, les moyens afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier particulièrement est notre encadrant Mr TAIBI Mahmoud pour l'orientation, la confiance, la patience, qui ont constitué un apport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr Rachid Hamdi et Mr Amara Fethi pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et respects à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, Nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Tout d'abord je rends grâce à Allah le Tout-Puissant pour m'avoir donné la force et la santé et les moyens pour accomplir ce travail

Tous mes mots ne sauraient exprimer les sentiments de gratitude, de respect, de reconnaissance, et d'amour qui m'animent, et c'est au bout des sacrifices, et en toute modestie que :

Je dédie ce travail à mes très chers parents. A ma très chère mère pour qui aucune phrase ne saurait décrire le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour elle. Merci pour toute cette tendresse et cette affection dont vous m'avez comblé tout au long de ma vie. Puisse Allah vous garder, vous procurer longue vie, et vous récompenser en bien.

A mon très cher père envers qui je témoigne ma profonde gratitude, ma reconnaissance et mon amour. Vous qui m'avez inculqué le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance face aux difficultés de la vie. Vos conseils ont été ma voie vers la réussite. Vos encouragements sont pour moi un soutien indispensable et je ferai toujours de mon mieux afin de ne jamais vous décevoir. Qu'Allah le Tout Puissant vous garde, vous procure longévité, et vous récompense en bien.

A mes frères et sœurs, ainsi que toute ma famille que ce travail soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler à mon égard.

Je dédie ce travail à Mes oncles Kourouzane Aboubacar, et Mohamed Sidi ainsi leurs familles envers qui je témoigne ma profonde gratitude.

Tant de personnes qui me sont chères à qui je dédie tous ce travail.

Je ne saurais terminer ces dédicaces sans penser à mon encadrant Mr TAIBI Mahmoud et le remercier pour tous ses encouragements.

Dédicaces

MES CHERS PARENTS

“Boumendjel Ahmed” et “Boumendjel Ouarda”

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

Mes Frères et sœurs ainsi que toute ma famille

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde pour moi.

Ce projet de fin d'étude est basé sur l'étude et la simulation d'un radar de détection. L'étude s'intéresse d'abord à l'Etat de l'art du radar, puis aux équations du radar, en fin l'application du radar pour la détection. La simulation est réalisée sur le logiciel Matlab, ainsi nous avons pu implémenter les équations du radar qui sont des outils essentiels pour comprendre le fonctionnement du radar et représentent une base pour l'analyse et la conception du système radar. L'application pour la simulation du radar représente un outil qui démontre le scénario de détection par radar en temps réel.

ملخص:

يعتمد مشروع نهاية الدراسة هذا على دراسة ومحاكاة رادار كشف. تبحث الدراسة أولاً في حالة فن الرادار ، ثم في معادلات الرادار ، وأخيراً في تطبيق الرادار للكشف. تتم المحاكاة على برنامج Matlab ، لذلك تمكنا من تنفيذ معادلات الرادار التي تعتبر أدوات أساسية لفهم تشغيل الرادار وتمثل أساساً لتحليل وتصميم نظام الرادار. تطبيق محاكاة الرادار هو أداة توضح سيناريو الكشف عن الرادار في الوقت الحقيقي. الكلمات المفتاحية: الرادار ، برنامج ماتلاب ، محاكاة الرادار ، تصميم النظام ، الكشف .

Abstract:

This end-of-study project is based on the study and simulation of a detection radar. The study looks first at the state of the art of radar, then at radar equations, and finally at the application of radar for detection. The simulation is carried out on the Matlab software, so we were able to implement the radar equations which are essential tools to understand the operation of the radar and represent a basis for the analysis and the design of the radar system. The radar simulation application is a tool that demonstrates the real-time radar detection scenario.

Keywords: Radar, Matlab software, radar simulation, system design, detection.

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé.....	iv
CHAPITRE I ÉTAT DE L'ART DU RADAR.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique	3
I.3 Le RADAR.....	6
I.3.1 Définition	6
I.3.2 Principe du radar	6
I.3.3 Les informations délivrées par le radar.....	7
I.4 Composition d'un système radar	12
I.4.1 L'antenne.....	13
I.4.2 Le duplexeur	14
I.4.3 L'émetteur.....	14
I.4.4 L'étage de puissance	14
I.4.5 Le Modulateur	15
I.4.6 Le récepteur	16
I.4.7 Le traitement et l'exploitation des informations	17
I.4.8 La synchronisation.....	18
I.4.9 Les informations de pointe angulaire.....	18
I.4.10 La liaison duplexeur antenne	18
I.5 Classification des Radars	19
I.5.1 Radars Imageurs / Radars non imageurs.....	19
I.5.2 Le radar primaire	20
I.5.3 Les radars monostatique, bistatique, multistatique	22
I.5.4 Le radar secondaire	23
I.5.5 Le radar Doppler.....	24
I.6 Bandes de fréquences radars	25
I.7 Applications du radar	25
I.8 Conclusion	26
CHAPITRE II : LES ÉQUATIONS RADAR.....	29
II.1 Introduction.....	29
II.2 Antennes radar.....	29
II.2.1 Antenne isotrope.....	29
II.2.2 Le Gain et le diagramme de rayonnement.....	30

II.3	Les Équations radar	32
II.3.1	Définition	32
II.3.2	Établissement de l'équation radar simple.....	32
II.3.3	Signal minimum détectable.....	35
II.4	Le Bruit en réception radar	35
II.4.1	Le rapport signal sur bruit	36
II.4.2	Facteur de Bruit.....	37
II.5	Influence des pertes sur la portée.....	38
II.5.1	Nature des pertes.....	38
II.5.2	Equation de la portée sous l'influence des pertes	38
II.6	Equation de la portée de référence radar.....	39
II.7	Fouillis radar	40
II.7.1	Définition.....	40
II.7.2	Fouillis de surface.....	40
II.7.3	Fouillis de volume.....	40
II.8	Equation du radar bistatique.....	41
II.9	Conclusion	42
CHAPITRE III	: LA DETECTION PAR RADAR.....	44
III.1	Recherche et surveillance radar	44
III.2	Filtrage en réception radar.....	45
III.2.1	Filtrage non optimal	46
III.2.2	Filtrage optimal (filtre adapté)	47
III.3	Détection radar	49
III.3.1	Probabilité d'apparition de faux signal (Fausse alarme)	50
III.3.2	Probabilité de réception du signal réel	51
III.4	Intégration d'impulsion	52
III.4.1	Intégration cohérente	52
III.4.2	Intégration non cohérente	53
III.4.3	Intégration binaire.....	53
III.5	Détection de cibles fluctuantes.....	53
III.6	Taux de fausses alarmes constant (Constant False Alarms Rate : CFAR).....	55
III.7	Détection des cibles mobiles.....	56
III.7.1	Localisation en distance doppler	56
III.7.2	Visualisation des cibles mobiles	56
III.8	Simulation.....	57
III.8.1	Introduction sur Matlab	57

III.8.2	Implémentation des équations radar.....	58
III.8.3	Simulation scénario Radar.....	62
III.9	Conclusion	68
CONCLUSION GENERALE		71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		73

Liste des figures

Figure I. 1 : Radar Freya à membrures.....	4
Figure I. 2 : Radar NEXRAD situé au centre d'opérations radar WSR-88D à Norman, Oklahoma	5
Figure I. 3 : Scénario illustrant le principe du radar.....	7
Figure I. 4 : Scénario des impulsions radar	8
Figure I. 5 : Ambiguïté en distance	9
Figure I. 6 : Palier Azimut.....	9
Figure I. 7 : L'angle de site (ou d'élévation) (Θ_e) et l'azimut (Θ_a).....	10
Figure I. 8 : Effet du mouvement de la cible sur les formes d'onde équiphases réfléchies.....	11
Figure I. 9 : La vitesse radiale est proportionnelle aux angles d'azimut et d'élévation	12
Figure I. 10 : Bloc fonctionnel type d'un radar	13
Figure I. 11 : Synoptique de l'émetteur haut niveau	16
Figure I. 12 : Synoptique de l'émetteur bas niveau.....	16
Figure I. 13 : Écrans de visualisation	18
Figure I. 14 : Organigramme des radars	19
Figure I. 15 : Radar primaire typique à faisceau plat d'un aéroport	20
Figure I. 16 : Radar à impulsion.....	22
Figure II. 1 : Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires.....	31
Figure II. 2 : Valeur approchée de la surface réfléchissante effective d'une cible métallique grande par rapport à la longueur d'onde λ	34
Figure II. 3 : Radar bistatique.....	41
Figure III. 1 : Traitement du signal radar en réception.....	45
Figure III. 2 : Filtre rectangulaire.....	46
Figure III. 3 : Calculs effectués pour un filtre parfaitement rectangulaire	46
Figure III. 4 : Filtre rectangulaire (comportement à l'adaptation $\Delta F=1.4/\tau$).....	47
Figure III. 5 : Filtre rectangulaire (comportement à l'adaptation $\Delta F=2/\tau$).....	47
Figure III. 6 : Principe de détection.....	49
Figure III. 7 : Seuil de détection normalisé par rapport à la probabilité de fausse alarme.	50
Figure III. 8 : Probabilité de détection par rapport SNR à impulsion unique, pour plusieurs valeurs de P_{fa}	51
Figure III. 9 : Intégration binaire.....	53
Figure III. 10 : Types de détection	55
Figure III. 11 : Seuil avec CFAR.....	55
Figure III. 12 : SNR en fonction de la Portée.....	58
Figure III. 13 : SNR en fonction de la Portée, pour deux valeurs différentes de RCS	59
Figure III. 14 : SNR en fonction de la Portée, pour deux valeurs différentes de la puissance de crête	59
Figure III. 15 : Portée en fonction du SNR	60
Figure III. 16 : SNR en fonction de la Portée, pour trois valeurs différentes de la puissance de crête	60
Figure III. 17 : Puissance de crête en fonction de portée Maximale	61
Figure III. 18 : Puissance de crête en fonction de portée Maximale, sans pertes et avec pertes de 3 dB.	61
Figure III. 19 : Largeur d'impulsion par rapport au SNR requis pour trois valeurs de plage de détection différentes.....	62
Figure III. 20 : Organigramme du déroulement de la simulation	63
Figure III. 21 : Ouverture de l'application	64

Figure III. 22 : Lancement de la simulation (Balayage et détection des cibles).....	65
Figure III. 23 : Détection d'une cible particulière.....	66
Figure III. 24 : Échos reçu de la cible détectée	66
Figure III. 25 : Détection avec Visualisation des cibles mobiles	67
Figure III. 26 : Cibles et fouillis (Positions).....	68

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Comparaison de radars à impulsions et à onde continue.....	22
Tableau I. 2 : Les modes de d'interrogation du radar secondaire.....	24
Tableau I. 3 : Classification radar par fréquence de fonctionnement.....	25
Tableau I. 4 : Domaines d'applications du radar.....	26
Tableau III. 1 : Modèles de cibles de Swerling	54

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le RADAR fut l'une des inventions les plus marquantes du vingtième siècle. Il a connu ses premières utilisations massives pendant la deuxième guerre mondiale, et ne cessera pas de connaître ses moments de gloire depuis lors jusqu'à nos jours. C'est un système électromagnétique utilisé pour détecter la présence des cibles dans un volume de couverture tout en transmettant des ondes électromagnétiques.

Ce projet de fin d'études intitulé étude et simulation d'un radar de détection, vise à réaliser une étude du radar et sur la base des acquis théoriques, réussir à faire une simulation de la détection par radar à travers le logiciel Matlab.

Le premier chapitre va se focaliser sur l'état de l'art du radar. Cette première partie de notre projet, va comporter l'historique sur l'évolution des systèmes radars de leur avènement jusqu'à nos jours, ensuite définir le radar, donner son principe de fonctionnement ainsi que les actions attendues d'un tel système à savoir les différentes mesures qui lui permettent de réaliser sa tâche la plus précieuse à savoir la détection, puis une classification des systèmes radar, et les applications du radar.

Le second chapitre va se baser sur les équations du radar, relations mathématiques les plus descriptives qui tiennent compte non seulement des effets de chaque paramètre majeur du système radar, mais également de ceux de la cible, de l'arrière-plan de la cible, du chemin de propagation et du milieu, elles sont utiles pour déterminer la distance maximale entre la cible et le radar. Ces équations radar peuvent également servir à la fois d'outils pour comprendre le fonctionnement du radar et de base pour l'analyse et la conception du système radar.

La dernière partie abordera le traitement appliqué au signal radar en réception, puis les hypothèses conditionnelles sur un seuil de détection ainsi que les probabilités relatives au signal reçu pour la détection des types de détections, et pour finir la simulation qui comportera l'implémentation de certaines équations radar (la Portée, le rapport signal sur bruit SNR, et la Puissance de crête transmise) également, la simulation du scénario d'une détection par radar.

L'intérêt de cet axe d'étude et de simulation de détection radar est de nous intéresser de plus près aux radars dont les applications ont connues une grande évolution au cours de ces quarante dernières années, et acquérir des connaissances suffisantes sur la détection radar pour élargir nos compétences, par la suite pour s'intéresser aux autres applications du radar.

CHAPITRE I : ÉTAT DE
L'ART DU RADAR

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART DU RADAR

I.1 Introduction

Les systèmes radar ont énormément évolué depuis leurs débuts lorsque leurs fonctions étaient limitées à la détection et à la détermination de la portée des cibles. En effet, le mot radar était à l'origine un acronyme qui signifiait détection et télémétrie radio. Les radars modernes, cependant, sont des systèmes de transducteurs informatiques sophistiqués qui détectent non seulement les cibles et déterminent la portée de la cible, mais également suivre, identifier, imager et classer les cibles tout en supprimant de fortes interférences indésirables telles que les échos de l'environnement (connus sous le nom de fouillis) et les contre-mesures (brouillage). Les systèmes modernes appliquent ces principales fonctions radar dans un élargissement de la gamme d'applications allant du suivi militaire et civil traditionnel des aéronefs et véhicules à la cartographie bidimensionnelle et tridimensionnelle, à l'évitement des collisions, à la surveillance des ressources de la terre, et bien d'autres.

I.2 Historique

À la fin des années 1880, le physicien allemand Heinrich Hertz a définitivement montré l'existence d'ondes électromagnétiques telles que formulées par James Clerk Maxwell dans ses travaux approfondis sur la théorie de l'électromagnétisme [2].

Au début XXe siècle, le développement de radio TSF (Transmission Sans Fil : qui est un mode de communication fondé sur l'utilisation d'ondes électromagnétiques modulées) a permis de mettre au point les antennes nécessaires à l'utilisation de la radio détection. De là plusieurs inventeurs, scientifiques et ingénieurs ont contribué au développement du radar.

D'abord en 1904, l'allemand Christian Hülsmeyer montre qu'il est possible de détecter la présence de bateaux dans un brouillard très dense à l'aide d'ondes radio.

Ensuite les expériences de détection avec des antennes radio se multiplient dans les années 1920 et 1930. En 1934, la France dépose un brevet sur un système de détection par ondes courtes : les premiers radars à ondes décimétriques équipent le cargo *Oregon* (en 1934) puis le paquebot *Normandie* (en 1935).

En 1935, un brevet est déposé par l'anglais Robert Watson-Watt, qui est généralement considéré comme l'inventeur "officiel" du radar. Les Britanniques mettent alors en place le premier réseau de radars sous le nom de "Chain home".

Parallèlement, des recherches dans ce domaine sont également menées en Hongrie, en Allemagne et aux États-Unis. Des systèmes opérationnels ont ainsi pu être utilisés au cours de la Seconde Guerre mondiale.

Pendant la Seconde Guerre mondiale Le radar fait partie des armes qui ont joué un rôle crucial dans le conflit. Dès 1937, les Allemands ont équipé leur marine, la Luftwaffe et l'Armée de terre de radars servant à corriger le tir.

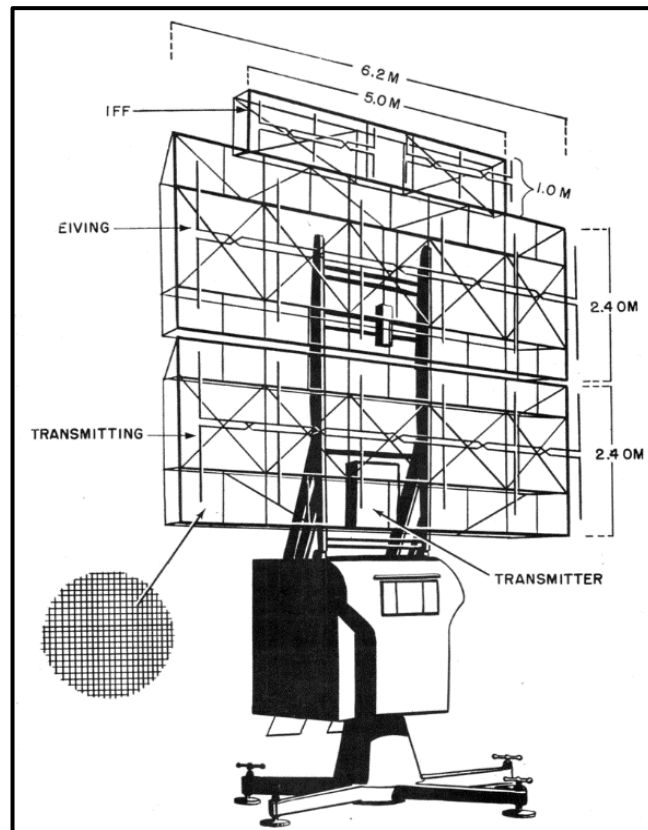


Figure I. 1 : Radar Freya à membrures

La figure ci-dessus est une illustration d'un radar allemand Limber Freya de la Seconde Guerre mondiale de TM E 11-219 "Répertoire de l'équipement radar allemand".

Au cours de ce conflit, l'expérience concrète au combat a poussé les ingénieurs et les scientifiques à apporter de nombreuses améliorations techniques à leur invention. C'est ainsi que les radars aéroportés ont été mis au point pour permettre les bombardements et la chasse de nuit. Cette expérience acquise par les opérateurs des radars pendant la guerre a également permis le développement de nouvelles applications.

En effet, ils avaient aussi remarqué que l'écho des précipitations (pluie, neige) créait du bruit dans les images. Ce constat a donné naissance aux premières techniques de brouillage et aux radars météorologiques.

Les années 1950 ont vu l'émergence de radars de poursuite de haute précision et l'utilisation de l'amplificateur klystron pour les systèmes haute puissance et longue portée.

Au cours des années 80, les améliorations apportées aux systèmes multiéléments, y compris la technologie des circuits à semi-conducteurs et à micro-ondes, ont rendu possible la télédétection des effets environnementaux tels que le cisaillement du vent.

En 1990, un prototype opérationnel du WSR-88D (Weather Surveillance Radar, 1988, Doppler) a été achevé et la première installation de prévision météorologique quotidienne a été achevée à Sterling, Virginie (USA) en 1992. Il s'agissait du premier des systèmes radar de nouvelle génération (NEXRAD), qui est un réseau de 159 radars météorologiques Doppler à haute résolution.



Figure I. 2 : Radar NEXRAD situé au centre d'opérations radar WSR-88D à Norman, Oklahoma

Même si au départ le radar servait pour des opérations militaires, de nos jours l'utilisation du radar est étendue à d'autres domaines que le domaine militaire. On l'utilise dans l'aviation civile, l'astrométrie, le contrôle maritime, la détection météorologique et le contrôle du trafic routier (détecteurs de vitesse sur les routes). Par exemple en météorologie, l'informatique permet désormais de traiter les données radars en temps réel et d'utiliser des algorithmes pour repérer les précipitations dangereuses (orages, pluie diluvienne, rafales) et prévoir leur déplacement.

I.3 Le RADAR

I.3.1 Définition

En fonction du besoin, les capteurs électroniques sont utilisés dans diverses applications dans notre vie moderne. De plus, comme capteur il est vrai que le radar n'est pas assez récent, cependant son utilité courante en tant que capteur électromagnétique lui a valu beaucoup d'intérêt et de considération surtout pour des applications dans le domaine de surveillance et/ou de détection, applications qui au fil des années se sont élargies à plus d'unes.

Le radar consiste à utiliser des ondes électromagnétiques pour détecter la présence d'objets et extraire autant d'informations que possible sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec ces objets. Les ondes radar voyagent à la vitesse de la lumière dans l'espace libre.

Le RADAR est donc un dispositif électromagnétique principalement utilisé pour la détection et la localisation d'objets (cibles) qui sont situés à l'intérieur de son volume de couverture. Le mot RADAR est l'acronyme anglais de RAdio Detection And Ranging pour radiodétection et télémétrie en français.

I.3.2 Principe du radar

Selon les normes IEEE [1], un radar est un dispositif pour transmettre des signaux électromagnétiques et recevoir des échos d'objets d'intérêt (cibles) dans son volume de couverture. La présence d'une cible est révélée par détection de son écho ou de sa réponse par transpondeur. Des informations supplémentaires sur une cible fournies par un radar comprennent un ou plusieurs des éléments suivants: distance (portée), par le temps écoulé entre la transmission du signal et la réception du signal de retour; la direction, en utilisant des diagrammes d'antenne directive; le taux de changement de gamme, par mesure du décalage Doppler; la description ou classification de la cible, par analyse des échos et de leur variation dans le temps.

La détection de cible est la capacité de distinguer la cible au niveau du récepteur. Le signal d'écho radar total au niveau du récepteur se compose de la cible (signal utile), du bruit (signal indésirable, non corrélé), de l'encombrement (échos indésirables mais corrélés provenant de cibles indésirables) et des interférences (non intentionnelles telles que les signaux de radio et de télévision, et / ou des signaux de brouillage intentionnel).

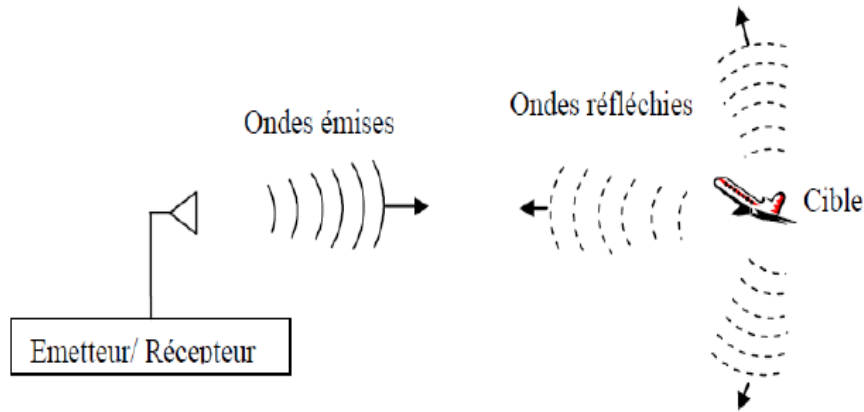


Figure I. 3 : Scénario illustrant le principe du radar

La qualité de la détection dépend non seulement du matériau de la cible, de sa forme, mais aussi de la fréquence du signal émis. Les antennes des radars peuvent être fixes ou tournantes. Les radars eux-mêmes peuvent être mobiles lorsqu'ils sont embarqués sur des véhicules (terrestres, aériens ou maritimes).

I.3.3 Les informations délivrées par le radar

I.3.3.1 La distance

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

La distance, ou la portée, ou même la distance oblique, notée généralement R est la distance de ligne de visée entre le radar et la cible. Cette distance est déterminée en mesurant le temps (Δt) mis par l'impulsion pour se déplacer du radar vers la cible et revenir.

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad 1.1$$

Avec $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ qui est la vitesse de la lumière, et le facteur $\frac{1}{2}$ apparaît dans le dénominateur en raison de la propagation bidirectionnelle du radar. La distance est exprimée en kilomètres ou miles nautiques (1 NM = 1.852 Km).

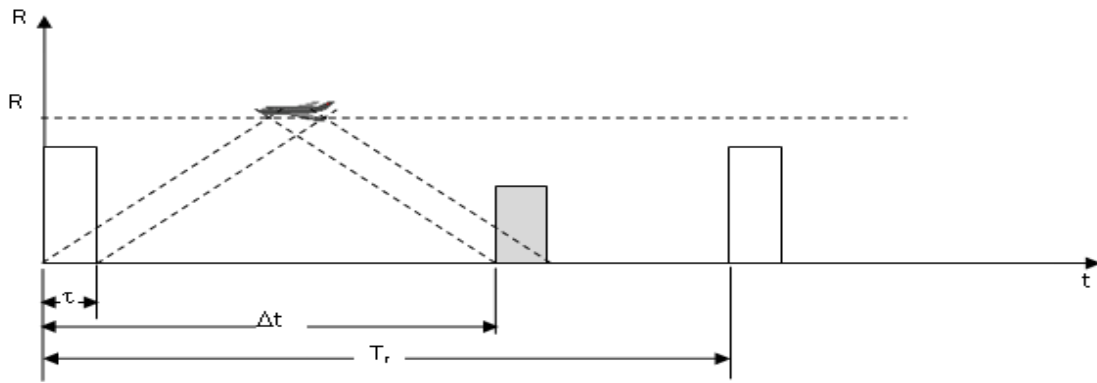


Figure I. 4 : Scénario des impulsions radar

T_r : Période de Répétition des Impulsions PRI

L'inverse de cette période donne la Fréquence de Répétition des Impulsions FRI : $f_r = \frac{1}{T_r}$

τ : Durée des impulsions.

Pendant chaque PRI, le radar émet de l'énergie pendant τ secondes et écoute le retour de cible pour le reste de la PRI. Le facteur de transmission du radar (Duty cycle) d_t est donné par le rapport $d_t = \tau/T_r$. La puissance moyenne émise du radar est :

$$P_{av} = P_t \cdot d_t \quad 1.2$$

Avec P_t : Puissance d'émission maximale du radar.

$$\text{L'énergie d'impulsion est : } E_p = P_t \cdot \tau = P_{av} \cdot T_r = P_{av} / f_r \quad 1.3$$

I.3.3.2 Ambiguïté en distance

L'horloge du radar est remise à zéro à chaque fois qu'une nouvelle impulsion est émise, et ce afin de s'assurer que la mesure de distance s'effectue bien à partir de la dernière impulsion. Les échos reçus dans un délai supérieur à la période de répétition des impulsions génèrent des erreurs de calcul de la distance (échos de nième balayage); on parle alors d'ambiguïté en distance.

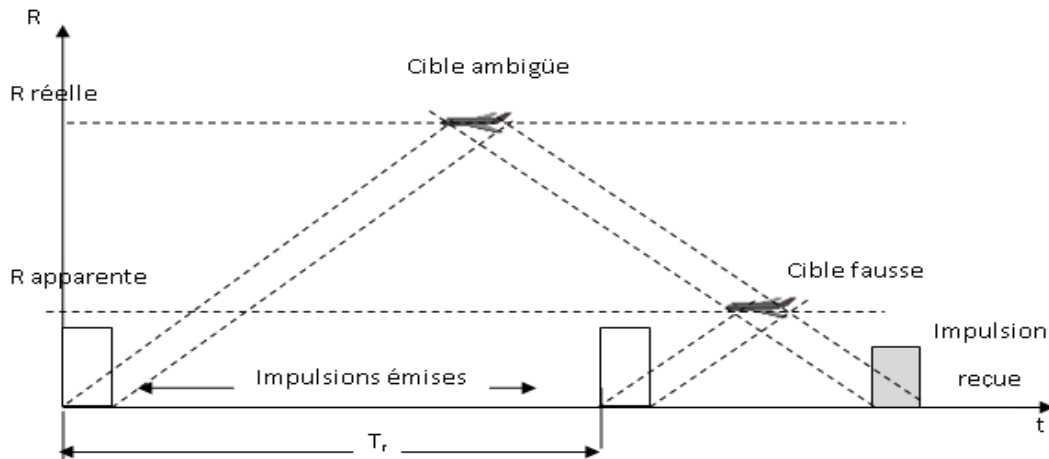


Figure I. 5 : Ambiguïté en distance

Ainsi la formule de la distance maximum sans ambiguïté est :

$$R_{\max} = c \frac{(T_r - \tau)}{2} \quad 1.4$$

I.3.3.3 La direction

L'angle entre la direction du nord et celle de la cible (azimut) est déterminé grâce à la directivité de l'antenne. La directivité, gain direct : est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie transmise dans une direction particulière.

En mesurant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer non seulement l'azimut mais aussi le site de la cible (donc son altitude). La précision de la mesure de ces angles dépend de la directivité de l'antenne. Pour une fréquence émise donnée (ou une longueur d'onde définie), la directivité d'une l'antenne est fonction de ses dimensions propres.

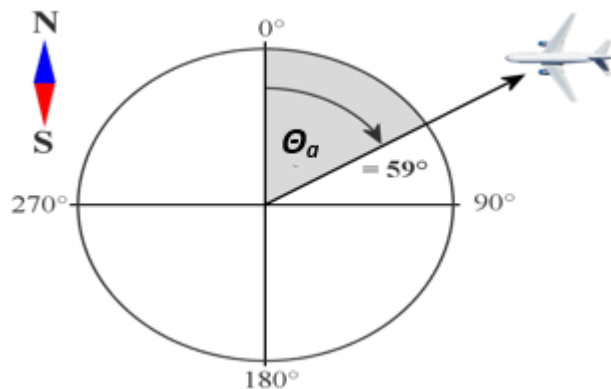


Figure I. 6 : Palier Azimut

I.3.3.4 Mesure de l'angle de site

L'Angle de site est l'angle que forme, avec sa projection sur le plan horizontal, l'axe « antenne radar – cible », mesuré dans le plan vertical. La lettre grecque tetha (Θ_e) désigne l'angle de site (ou d'élévation). L'angle de site est positif lorsqu'il est au-dessus de l'horizon (site 0°), et négatif en dessous.

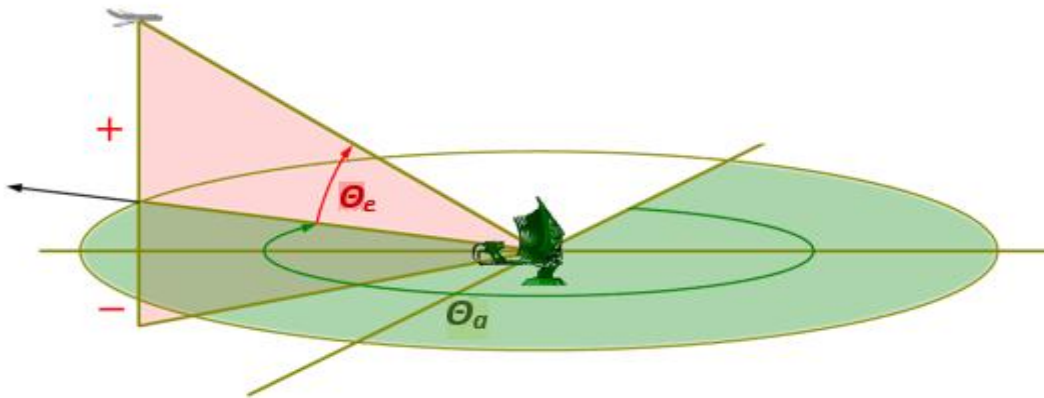


Figure I. 7 : L'angle de site (ou d'élévation) (Θ_e) et l'azimut (Θ_a)

I.3.3.5 Résolution de distance

La résolution de distance, notée ΔR est la capacité d'un système radar à distinguer deux ou plusieurs cibles sur le même relèvement mais à des distances différentes. Le degré de résolution de distance dépend de la largeur de l'impulsion émise, des types et tailles des cibles, de l'efficacité du récepteur et de l'indicateur. La largeur d'impulsion est le principal facteur de résolution.

Les radars sont normalement conçus pour fonctionner entre une portée minimale R_{\min} et une portée maximale R_{\max} . La distance entre R_{\min} et R_{\max} est divisée en M cases de portée, chacune de largeur ΔR .

$$M = (R_{\max} - R_{\min})/\Delta R \quad 1.5$$

Les cibles séparées par au moins ΔR seront complètement résolues. Les cibles situées dans le même intervalle de distance peuvent être résolues en gamme croisées (Azimut) en utilisant des techniques de traitement du signal [4].

Considérons deux cibles situées à des distances R_1 et R_2 et correspondant à des retards t_1 et t_2 respectivement. La différence entre ces deux places est :

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \frac{c(t_2 - t_1)}{2} = c \frac{\delta t}{2} \quad 1.6$$

Ainsi, ΔR devrait être supérieur ou égal à $c\tau/2$, alors :

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad 1.7$$

τ = temps de largeur d'impulsion.

Afin d'obtenir une résolution de distance fine, il faut minimiser la largeur d'impulsion. Cependant, cela réduira la puissance transmise moyenne et augmentera la bande passante de fonctionnement. Il est possible d'obtenir une résolution de distance fine tout en maintenant une puissance transmise moyenne adéquate en utilisant des techniques de compression d'impulsion.

I.3.3.6 La vitesse radiale

Les radars utilisent la fréquence Doppler pour extraire la vitesse radiale de la cible (fréquence de portée), ainsi que pour faire la distinction entre les cibles mobiles et stationnaires ou des objets tels que le fouillis. Le phénomène Doppler décrit le décalage de la fréquence centrale d'une forme d'onde incidente en raison du mouvement de la cible par rapport à la source de rayonnement. Selon la direction du mouvement de la cible, ce décalage de fréquence peut être positif ou négatif. Une forme d'onde incidente sur une cible se rapprochant fera se rapprocher les fronts d'onde en équiphase réfléchis (longueur d'onde plus petite). En variante, une cible qui s'ouvre ou qui recule (s'éloignant du radar) provoquera l'expansion des fronts d'onde en équiphase réfléchis (longueur d'onde plus grande), comme illustré sur la figure ci-dessous [4].



Figure I. 8 : Effet du mouvement de la cible sur les formes d'onde équiphases réfléchies

La vitesse radiale est proportionnelle aux angles d'azimut et d'élévation. L'écart de fréquence entre la fréquence émise et la fréquence réfléchiée est appelé fréquence doppler f_d . Elle est reliée à la vitesse radiale V_r par la relation :

$$f_d \approx \frac{2V_r}{\lambda} \quad 1.8$$

La vitesse radiale cible par rapport au radar est égale à V_r mais ce n'est pas toujours le cas. En fait, la quantité de fréquence Doppler dépend de la composante de vitesse cible dans la direction du radar (vitesse radiale). Ainsi, une expression plus générale pour f_d qui tient compte de l'angle total entre le radar et la cible est :

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \cos\theta \quad 1.9$$

Et pour une cible qui s'éloigne du radar on a :

$$f_d = \frac{-2V_r}{\lambda} \cos\theta \quad 1.10$$

Où $\cos\theta = \cos\theta_e \cos\theta_a$. Les angles θ_e et θ_a sont respectivement les angles d'élévation et d'azimut.

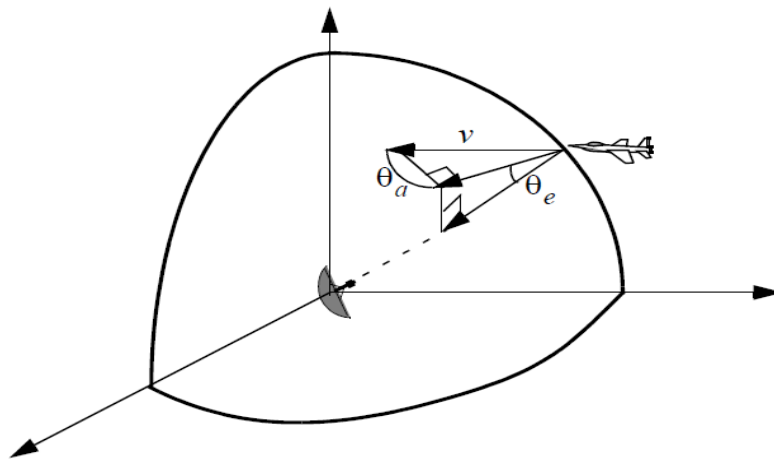


Figure I. 9 : La vitesse radiale est proportionnelle aux angles d'azimut et d'élévation

I.4 Composition d'un système radar

De tout ce qui précède, nous pouvons dire que le radar peut fournir à l'utilisateur les informations suivantes :

- ❖ Existence d'un corps étranger dans l'atmosphère (avion, bateau, obstacle naturel, etc).
- ❖ Position et vitesse de ce corps étranger.

Ces deux informations, peuvent être complétées suivant le cas, par d'autres informations sur la vitesse, l'étendue, voire la nature de ce corps détecté par le radar. Le bloc fonctionnel type d'un radar est donné ci-après [7].

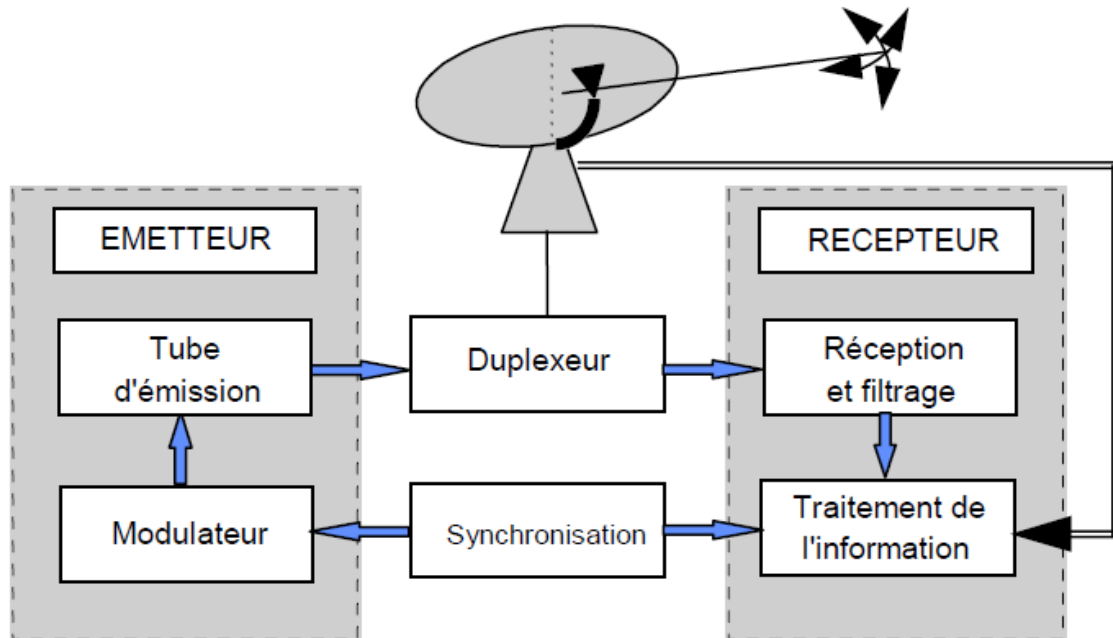


Figure I. 10 : Bloc fonctionnel type d'un radar

I.4.1 L'antenne

C'est l'élément le plus visible du radar et également le plus connu du profane. Son rôle est de concentrer l'énergie émise par le radar dans un angle solide déterminé. Cet angle solide est défini par la nature de l'antenne utilisée. La direction vers laquelle il est dirigé est également liée à l'antenne, une action (mécanique ou électronique) sur cette antenne permettra de modifier cette direction et donc de provoquer une exploration du domaine entourant le radar. L'antenne peut être double afin de permettre indépendamment les fonctions d'émission et de réception. Dans ce cas, il est nécessaire que les deux aériens (antennes) élémentaires soient orientés à chaque instant dans la même direction. Ils doivent donc être solidaires entre eux ou synchronisés.

En outre, leur interférence radioélectrique doit être la plus faible possible afin qu'au moment de l'émission, le signal émis qui est de très grande puissance ne vienne pas perturber le fonctionnement du récepteur.

L'ensemble des raisons qui précèdent vient augmenter le prix de l'antenne double, aussi, dans la majorité des cas, on lui a préféré la solution de l'antenne unique, utilisé à l'émission et à la réception, associé à un duplexeur.

I.4.2 Le duplexeur

C'est un aiguilleur électronique qui permet, d'une part au signal émis d'être dirigé vers l'antenne avec une perte minimale tout en isolant convenablement le récepteur, d'autre part au signal reçu d'être dirigé en totalité vers le récepteur, sans dérivation vers l'émetteur et toujours avec une perte minimale.

La complexité du duplexeur dépend du niveau de puissance du signal émis (de quelques kilowatts à 20 MW dans les radars de moyenne et grande portée). Elle est liée à la limitation des fuites vers le récepteur, (qui ne peut supporter sans détérioration des signaux supérieurs à 100 mW environ) [7].

I.4.3 L'émetteur

L'émetteur se compose de deux parties principales :

- ❖ L'étage de puissance dans lequel est engendré ou amplifié le signal émis ;
- ❖ Le modulateur qui fournit à l'étage de puissance l'énergie électrique et les signaux de commande.

Les paramètres caractéristiques de l'émetteur sont les suivants :

- Puissance crête et puissance moyenne émise
- Largeur de bande de travail
- Fréquence de travail
- Stabilité à court et à long terme (bruit de phase)
- Spectre du signal émis
- Forme des impulsions

I.4.4 L'étage de puissance

Sa partie active est le tube d'émission dans lequel est engendrée l'impulsion hyperfréquence à la fréquence et à la puissance désirées.

Il peut être du type oscillateur de puissance, le tube utilisé est alors un magnétron, une triode oscillatrice ou tout autre tube oscillateur. C'est avec le magnétron que les plus hauts niveaux de puissance sont obtenus.

La chaîne d'amplification est un autre type d'étage de puissance, dans lequel le signal est amplifié par étapes successives, d'un niveau de l'ordre du watt à la puissance finale de sortie qui varie selon le tube utilisé et la longueur d'onde.

Les tubes d'amplification radar sont :

- les klystrons ;
- les tubes à ondes progressives (TOP) ;
- les tubes à champs croisés ;

(Pour les niveaux de puissance élevés.)

- amplificateurs à état solide (diodes, transistors) aux basses puissances, ou pour la fourniture de « modules » de puissance.

Cet étage comprend, en outre, des dispositifs annexes :

- refroidissement d'alimentation ;
- circuits de mise en route et de contrôle...

Son rendement global est de l'ordre de 10 à 30 %.

I.4.5 Le Modulateur

Le modulateur fournit la puissance nécessaire à la partie active de l'émetteur. Il permet de stocker l'énergie pendant les périodes séparant deux émissions successives, et de la restituer pendant le temps (très bref) de l'émission radar.

Les puissances crête délivrées par le modulateur sont très importantes (3 MW par exemple, pour une puissance crête émise de 1 MW). Il y correspond des courants de plusieurs dizaines d'ampères sous des tensions de plusieurs dizaines de milliers de Volts.

La qualité des signaux délivrés par le modulateur doit être contrôlée pour permettre d'éviter des effets parasites sur le signal émis [22].

Deux types de structure sont utilisés :

- ❖ Dans la modulation haut niveau le signal radar est généré à grande puissance par un oscillateur de puissance hyperfréquence.

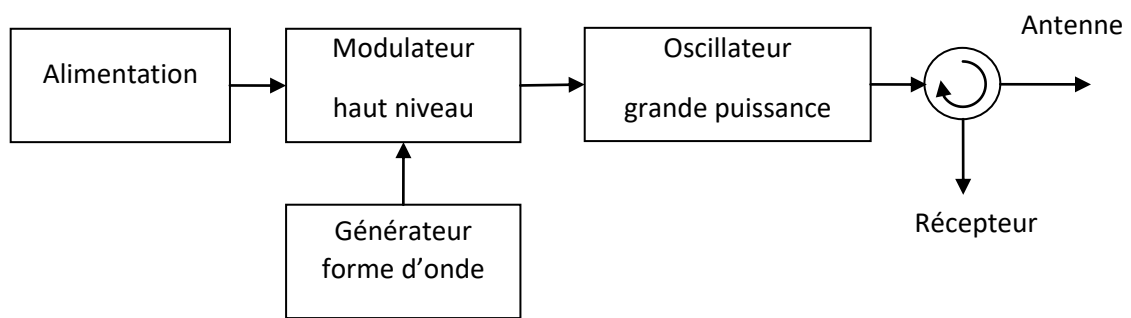


Figure I. 11 : Synoptique de l'émetteur haut niveau

- ❖ Le second type Le signal radar est généré par un générateur de forme d'onde à bas niveau puis amplifié par un amplificateur de puissance hyperfréquence.

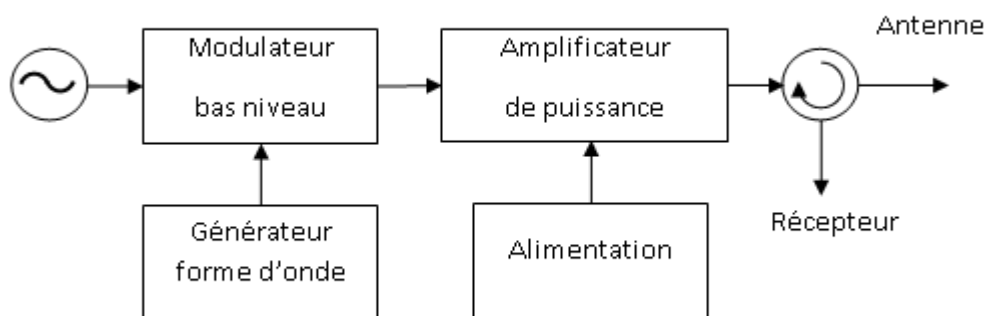


Figure I. 12 : Synoptique de l'émetteur bas niveau

I.4.6 Le récepteur

C'est l'élément le plus délicat, et souvent le plus complexe du radar. Il assure l'amplification, le filtrage et le traitement du signal radar.

Sa sensibilité doit être très grande (jusqu'à 10^{-15} Watts). Il amplifie les signaux dans de très grandes proportions (10^{10} à 10^{14}). Il doit en outre effectuer le filtrage du signal et tous autres traitements adaptés à l'information à obtenir (par exemple vitesse, position angulaire...), sa réalisation doit être particulièrement soignée pour réduire au minimum toute distorsion involontaire du signal traité et réduire les perturbations dues au bruit qui accompagne le signal radar [7].

Le récepteur radar est du type superhétérodyne, il est précédé le plus souvent par un amplificateur hyperfréquence. Son circuit de sortie peut être un simple détecteur d'amplitude ou un système plus complexe. Après traitement, le signal est amplifié par un amplificateur vidéo (en abrégé ampli vidéo) qui l'amène au niveau désiré pour son exploitation (quelques volts).

I.4.7 Le traitement et l'exploitation des informations

Le traitement des informations radar est fait à partir des éléments suivants :

- ❖ Signal vidéo délivré par le récepteur,
- ❖ Signaux de synchronisation,
- ❖ Information de position angulaire du faisceau d'antenne,
- ❖ Eventuellement autres informations en provenance d'un traitement spécial ou de sources extérieures.

Il permet de délivrer les « plots radar » qui seront pris en compte par le système d'exploitation. Ces informations sont présentées à un opérateur sous forme d'une image radar adaptée à la situation à analyser. L'opérateur a alors à sa charge d'interpréter les informations qui sont ainsi visualisées et d'effectuer les opérations nécessaires (identification, guidage, anticollision...). Le travail de l'opérateur est facilité par l'emploi d'une "exploitation automatique" assurée par des moyens numériques, l'information étant délivrée à l'opérateur par l'intermédiaire de consoles de visualisation.

Ces consoles, qui s'utilisent au maximum les possibilités de la visualisation sont de véritables systèmes pouvant recevoir les informations brutes du radar et les informations "synthétiques" issues de l'exploitation. Elles permettent en outre un dialogue entre les opérateurs et le calculateur chargé de l'élaboration de l'information synthétique.

Les moyens de visualisation les plus courants sont l'oscilloscope cathodique dit « à balayage cavalier » et les écrans de télévision haute définition, qui présentent la situation générale. Ils peuvent être complétés par des visualisations auxiliaires sur écran de télévision et des projections sur grand écran.

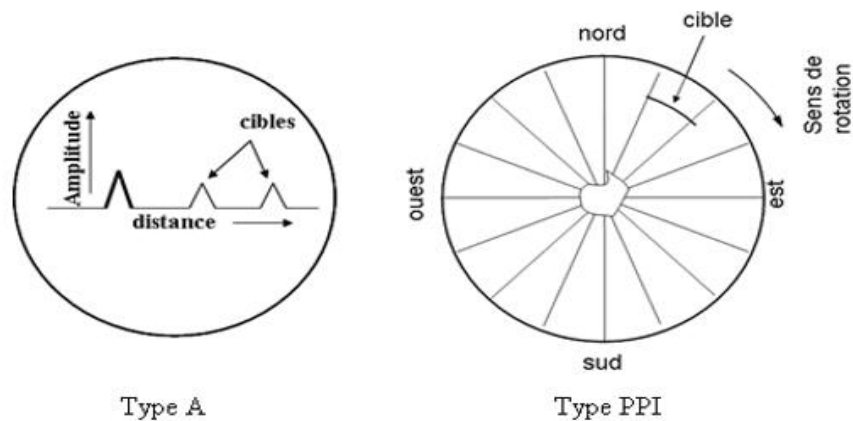


Figure I. 13 : Écrans de visualisation

I.4.8 La synchronisation

Le « synchronisateur » est le cœur du système radar. Il délivre les signaux de base qui définissent les instants d'émission et divers signaux annexes nécessaires à des opérations en temps réel. Son élément de base est une horloge de très grande stabilité (10^{-4} à 10^{-6}) 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.

I.4.9 Les informations de pointe angulaire

Dans les antennes classiques, la position angulaire du faisceau est liée à la position mécanique de l'antenne. Celle-ci doit donc être recopiée et transmise au système d'exploitation des informations. Dans les antennes à balayage mécanique, les systèmes de copie utilisés peuvent être du type analogique ou numérique (codeurs). Dans les antennes à balayage électronique, cette information est engendrée et transmise par le calculateur "pointeur" d'antenne.

I.4.10 La liaison duplexeur antenne

Cette liaison doit permettre le passage des signaux hyperfréquences pour diverses positions de l'antenne. Elle comporte des conduits hyperfréquence (coaxial et guide d'onde) et des éléments plus complexes permettant le mouvement de l'antenne (joint tournant). Au niveau de l'antenne, elle peut se terminer par des circuits hyperfréquences divers (diviseur de puissance, coupleurs, circulateurs, déphaseurs, etc...) [7].

I.5 Classification des Radars

Les radars peuvent être classés comme basés au sol, aéroportés, spatiaux et ceux basés sur des navires. Ils peuvent également être classés en de nombreuses catégories en fonction des caractéristiques spécifiques du radar, telles que : la bande de fréquences, le type et formes d'onde utilisées, et l'antenne.

Une autre classification concerne la mission et/ou la fonctionnalité du radar. Cela comprend: la météo, l'acquisition et recherche, suivi, suivi en cours de balayage, contrôle de tir, alerte précoce, plus les radars d'horizon, de suivi du terrain et d'évitement de terrain.

Mais d'une manière générale la figure ci-dessous présente un organigramme des systèmes radar :

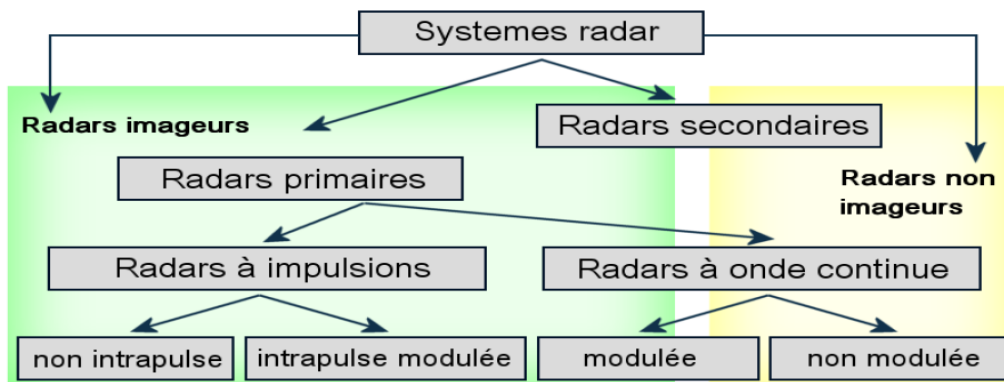


Figure I. 14 : Organigramme des radars

I.5.1 Radars Imageurs / Radars non imageurs

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet (ou de la zone) observé. Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la Terre, les autres planètes, les astéroïdes et les autres objets célestes. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles.

Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars (les petits, sur le bord de la route...) et les radios altimètres. Ce type de radar est également appelé diffusomètre puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé. Les applications des radars secondaires non imageurs sont par exemple les dispositifs d'immobilisation antivols installés sur certains véhicules privés récents [24].

I.5.2 Le radar primaire

Un radar primaire appelé aussi radar de veille (Primary Surveillance Radar en anglais) est un capteur radar classique qui illumine une large portion d'espace avec des signaux hyperfréquences et qui reçoit en retour les ondes réfléchies par les cibles se trouvant dans cet espace. Le terme désigne donc un système radar utilisé pour détecter et localiser des cibles potentiellement non-coopératives. Il est spécifique au domaine du contrôle aérien où on l'oppose au radar secondaire qui reçoit des informations supplémentaires du transpondeur de la cible.

Ce type de radar utilise une antenne à faible résolution verticale mais à bonne résolution horizontale. Il balaye rapidement sur 360 degrés autour du site sur un seul angle d'élévation. Il peut donc donner la distance et la vitesse radiale de la cible avec une bonne précision mais nécessite un ou des radars supplémentaires pour obtenir la position verticale et la vitesse réelle.

Les avantages du radar primaire sont donc qu'aucun équipement embarqué dans l'avion n'est nécessaire pour la détection de la cible et il peut être utilisé pour la surveillance des mouvements des véhicules au sol. Ses inconvénients sont que les cibles et leur altitude ne peuvent pas être identifiées directement. En plus, il nécessite des émissions puissantes ce qui limite sa portée [23].



Figure I. 15 : Radar primaire typique à faisceau plat d'un aéroport

I.5.2.1 Les radars à ondes continues

Les radars à onde continue génèrent un signal hyperfréquence continu. Le signal réfléchi est reçu et traité, mais le récepteur (qui dispose de sa propre antenne) n'est pas tenu d'être au même emplacement que l'émetteur. Tout émetteur de station radio civile peut être simultanément utilisé comme un émetteur radar, pour peu qu'un récepteur relié à distance puisse comparer les temps de propagation du signal direct et du signal réfléchi. Des essais ont montré que la localisation d'un avion était possible par la comparaison et le traitement des signaux provenant de trois différentes stations émettrices de télévision.

a) Les radars à onde continue non modulée

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue ne permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse sur les routes (cinémomètres radars). Des équipements plus récents (LIDAR) fonctionnent dans la bande de fréquence des lasers et permettent d'autres mesures que celle de la vitesse.

b) Les radars à onde continue modulée

Le signal émis est constant en amplitude mais modulé en fréquence. Cette modulation rend à nouveau possible le principe de la mesure du temps de propagation. Un autre avantage non négligeable de ce type d'équipement est que, la réception n'étant jamais interrompue, les mesures s'effectuent en permanence. Ces radars sont utilisés lorsque les distances à mesurer ne sont pas trop grandes et qu'il est nécessaire d'effectuer des mesures ininterrompues (par exemple une mesure d'altitude pour un avion ou un profil de vents par un radar météorologique).

Un principe similaire est utilisé par des radars à impulsions qui génèrent des impulsions trop longues pour bénéficier d'une bonne résolution en distance. Ces équipements modulent souvent le signal contenu dans l'impulsion afin d'améliorer leur résolution en distance. On parle alors de compression d'impulsion.

I.5.2.2 Les radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance. Chaque impulsion est suivie d'un temps de silence plus long que l'impulsion elle-même, temps durant lequel les échos de cette impulsion peuvent être reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. Direction, distance et parfois, si cela est nécessaire, hauteur

ou altitude de la cible, peuvent être déterminées à partir des mesures de la position de l'antenne et du temps de propagation de l'impulsion émise.

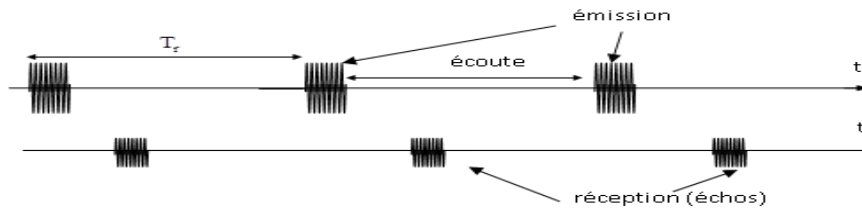


Figure I. 16 : Radar à impulsion

Dans cette catégorie, les systèmes radar peuvent être classés sur la base de la fréquence de répétition des impulsions désigné par l'acronyme **PRF** en anglais (PRF : Pulse Repetition Frequency), en tant que radars à **PRF faible**, **PRF moyenne** et **PRF élevée**.

Les radars à faible PRF sont principalement utilisés pour la télémétrie là où la vitesse cible (Doppler shift) ne présente aucun intérêt.

Les radars à haute PRF sont principalement utilisés pour mesurer rapidité de la cible.

Les radars à ondes continues ainsi que les radars à impulsions peuvent mesurer à la fois la portée de la cible et la vitesse radiale en utilisant différents schémas de modulation [4].

Le tableau suivant illustre une comparaison entre les radars à impulsions et les radars à onde continue.

Tableau I. 1 : Comparaison de radars à impulsions et à onde continue

Paramètres	Radars à impulsion	Radars à onde continue
Type de signal	Modulé	Modulé et non modulé
Antenne	Duplexeur	Antennes séparées
Puissance à réception	Elevée	Faible
Domaines d'application	Plusieurs	Moins

I.5.3 Les radars monostatique, bistatique, multistatique

Dans la plupart des cas, l'émetteur et le récepteur du radar partagent une électronique et une antenne commune. On parle alors de radar monostatique. Rien n'empêche cependant de considérer un système radar où l'émetteur et le récepteur sont séparés on parle alors de radar bistatique, ou même de configuration multistatique, si l'on a un émetteur et plusieurs récepteurs distincts ou plusieurs émetteurs et un récepteur distinct.

I.5.4 Le radar secondaire

I.5.4.1 Définition

Le radar SSR (Secondary Surveillance Radar) ou IFF (Identification Friend Foe) est un système destiné à faciliter l'identification d'une cible mobile. Le système se compose :
au sol, d'un interrogateur associé au radar primaire (antennes liées mécaniquement, synchronisation des émissions) ;
à bord, d'une antenne omnidirectionnelle associée à un répondeur.

Interrogé sur un mode déterminé, le répondeur IFF de bord (ou transpondeur en aviation civile) répond par une suite d'impulsion HF qui forment un code. Ce train d'impulsions est reçu dans le récepteur associé à l'interrogateur, où il sera décodé délivrant ainsi l'information d'identification [7].

Le radar secondaire permet de déterminer, comme tous les radars, la position de l'avion à l'aide d'un gisement et d'une distance relatifs à l'antenne. Le radar secondaire a plusieurs avantages qui lui sont propres. Comme un transpondeur est nécessaire pour être détecté par un radar secondaire, seuls les plots pertinents seront visualisés, et les obstacles ou les oiseaux n'apparaîtront pas, évitant ainsi une « pollution visuelle » de l'écran de l'opérateur du radar. Un autre avantage est le fait que des données peuvent être transmises au système radar. Les données dépendent du mode du transpondeur utilisé par l'avion, et des capacités de l'antenne radar.

I.5.4.2 Les modes d'interrogation

Le radar secondaire émet deux ou trois impulsions pour interroger les aéronefs volant dans le secteur de contrôle aérien. La séparation temporelle entre deux impulsions détermine le mode utilisé et la question posée. Le transpondeur des appareils répond par une série d'impulsions codées. Les modes militaires et civils (A, C et S) sont couramment utilisés, alors que les modes B et D sont définis mais non utilisés [18].

Tableau I. 2 : Les modes de d'interrogation du radar secondaire

Modes	Temps P1-P3	Interprétation
1	3 μ s	Identification Militaire Mission
2	5 μ s	Identification Militaire
3 & A	8 μ s	Identification
C	21 μ s	Altitude
D	25 μ s	Non défini
S	Trois impulsions avec séparation variable	Usage Multiple

I.5.5 Le radar Doppler

I.5.5.1 L'effet doppler

L'effet Doppler, ou effet Doppler-Fizeau, est le décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps [25].

I.5.5.2 Radar doppler

Dès le début du radar, on s'est rendu compte que la vitesse de la cible pouvait également être déterminée en utilisant l'effet Doppler, qui, comme nous l'avons vu, qui est un décalage de fréquence apparent d'une onde réfléchie résultant de la vitesse de la cible. Cependant, ce développement a dû attendre le développement d'oscillateurs capables de générer une puissance suffisante à très haute fréquence avec une bonne stabilité de fréquence. La stabilité de fréquence de l'oscillateur est importante car le décalage de fréquence Doppler n'est pas important de sorte que l'effet Doppler serait obscurci par une fréquence d'oscillateur errant.

Le radar Doppler sert à la mesure de la vitesse, notamment de véhicules dans le cadre de contrôles de police. La précision des mesures est maintenant très généralement acceptée, même par les automobilistes directement concernés. Le principe même de la mesure donne une relation exacte, dont les éléments sont mesurables avec grande précision.

I.6 Bandes de fréquences radars

La classification des systèmes radar par la bande de fréquences, a émergé pendant la Seconde Guerre mondiale (par exemple, les radars en bande L sont utilisés pour les études sur la turbulence de l'air) et fut la première à être utilisée.

Le tableau donne la désignation du radar IEEE pour les bandes de fréquences couramment utilisées dans les systèmes radar et une description des types d'applications pour chaque bande [2].

Tableau I. 3 : Classification radar par fréquence de fonctionnement

Plage de fréquences	Désignation	Applications
3 à 30 MHz	HF	Radars côtiers et systèmes au-dessus de l'horizon
30 à 300 MHz	VHF	Systèmes à très longue portée et pénétrant dans le sol
0.3 à 1 GHz	UHF	Systèmes à très longue portée et pénétrant le feuillage
1 à 2 GHz	L	Contrôle et surveillance du trafic aérien à longue distance
2 à 4 GHz	S	Surveillance à moyenne portée, météo à longue portée et systèmes marins
4 à 8 GHz	C	Suivi à longue portée, surveillance à moyenne portée et profils de vent
8 à 12 GHz	X	Guidage de missile, radar marin et cartographie à moyenne résolution
12 à 18 GHz	Ku	Imagerie haute résolution et applications marines
18 à 27 GHz	K	Détection des nuages et pistolets radar de police
27 à 40 GHz	Ka	Cartographie haute résolution et surveillance à courte portée

I.7 Applications du radar

Le radar a été utilisé au sol, dans les airs, sur la mer et dans l'espace. Le radar au sol a été appliqué principalement à la détection, à la localisation et au suivi d'aéronefs ou de cibles spatiales. Le radar de bord est utilisé comme aide à la navigation et dispositif de sécurité pour localiser les bouées, le rivage lignes et autres navires, ainsi que pour l'observation des aéronefs. Le radar aéroporté peut être utilisé pour détecter d'autres aéronefs, navires ou véhicules terrestres, ou il peut être utilisé pour la cartographie des terres, l'évitement des

tempêtes, l'évitement du terrain et la navigation. Dans l'espace, le radar a aidé au guidage des engins spatiaux et à la télédétection de la terre et de la mer [5].

Le principal utilisateur du radar, et contributeur du coût de la quasi-totalité de son développement, a été l'armée: bien qu'il y ait eu des applications civiles de plus en plus importantes, principalement pour la navigation maritime et aérienne. Les domaines d'application civils et militaires du radar, le tableau ci-dessous [1].

Tableau I. 4 : Domaines d'applications du radar

Application civile	Application militaire
Contrôle du trafic aérien et gestion des vols	Surveillance terrestre, océanique et aérienne
Systèmes intelligents de gestion du trafic	Détection et suivi
Approche et atterrissage de précision	Classification et identification balistique
Gestion du trafic des navires (ports, voies navigables, détroits)	Défense antimissile
Navigation et évitement des collisions	Alerte précoce aéroportée
Radar météo et surveillance des océans	Contrôle de tir et guidage des missiles
Chercher et sauver	Emplacement du mortier et de l'artillerie
Surveillance au sol et alarmes anti-intrusion	Opérations de recherche et de sauvetage
Sondage au sol et imagerie souterraine	Sondage au sol et sous la surface
Capteurs de vitesse et altimètres du véhicule	Simulation et modélisation de détection
Surveillance étendue	Multifonction
Multifonction	

I.8 Conclusion

Le radar est donc un appareil opérationnel qui émet et reçoit des signaux électromagnétiques et qui présente de nos jours un grand nombre d'applications, servant à la détection des objets d'intérêt (cibles) tout en prenant en compte les objets n'ayant pas d'intérêt (fouillis, interférences, brouilleurs). Les informations sont extraites du signal d'écho initialement par cette détection. Les informations sur la cible comprennent, mais sans s'y limiter, la portée, la fréquence de portée (vitesse), la direction, la description, etc. L'indicateur

doit en permanence mettre à la disposition de l'utilisateur une représentation graphique facilement interprétable de la position relative des cibles détectées par le radar d'où le traitement de l'information.

LES ÉQUATIONS RADAR

CHAPITRE II : LES ÉQUATIONS RADAR

II.1 Introduction

Le traitement du signal radar comprend les tâches de détection et d'estimation de la position (distance, Doppler, angle) des cibles, ce qui amène à l'utilisation des équations radar qui sont un bilan des puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise par un radar. Celles-ci dépendent des caractéristiques du radar (antenne, circuits électroniques, guide d'onde, pertes de signal, etc.), de celles de la cible et du milieu traversé le long du trajet. Les premières sont constantes alors que les deuxièmes et troisièmes varient dans le temps et l'espace. La tâche de détection est celle qui requiert le plus gros effort, l'estimation de la position n'étant réalisée que pour les cibles détectées.

Le but final du traitement du signal radar est d'assurer une bonne probabilité de détection (PD) tout en maintenant une très faible probabilité de fausse alarme (PFA). Ce dernier point est à la fois le plus important et le plus critique à assurer. Aussi cela permettrait aussi de définir par la suite des techniques de détection radar.

II.2 Antennes radar

L'antenne est la partie visible d'un système radioélectrique qui sert à la transmission et la réception du signal dans l'espace libre. Elle sert à concentrer le signal produit par l'émetteur vers l'espace libre et/ou à percevoir les faibles signaux venant de l'extérieur pour les diriger vers le récepteur.

II.2.1 Antenne isotrope

L'antenne isotrope, qui est source ponctuelle théorique qui émet et reçoit l'énergie de manière égale dans toutes les directions. Cette antenne fictive est une référence importante pour décrire les propriétés de rayonnement de toutes les autres antennes et servira de point de départ [16].

L'antenne isotrope rayonne dans toutes les directions, elle n'a donc pas de sélectivité angulaire. L'intensité de rayonnement (watts / stéradian) d'une antenne isotrope peut être écrite comme suit :

$$I = \frac{P_t}{4\pi} \quad 2.1$$

Où P_t est la puissance totale rayonnée par l'antenne et 4π est la zone stéradienne de la sphère entourant l'antenne. La densité de puissance Q_t en W/m^2 mesurée à une distance R de l'antenne isotrope est :

$$Q_t = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad 2.2$$

II.2.2 Le Gain et le diagramme de rayonnement

Une antenne est caractérisée par son gain et son diagramme de rayonnement.

Le gain est le rapport entre l'énergie irradiée dans une direction particulière et l'énergie totale émise par l'antenne dans toutes les directions. Il s'agit donc du taux de concentration de l'énergie dans une direction donnée par rapport celui d'une antenne isotrope. Plus l'antenne est directionnelle, plus le gain est grand. Le gain s'applique également à la réception et a la même valeur.

La section efficace d'ouverture d'une antenne A_e est la surface en coupe que représente l'antenne en émission ou en réception. C'est un paramètre important qui gouverne les performances de l'antenne. Elle est reliée au gain G par :

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad 2.3$$

Avec : $A_e = \rho A$

A : Surface réelle de l'antenne,

ρ : Efficacité de l'ouverture. En général : $0.6 < \rho < 0.7$

Le Gain est relié aux ouvertures en azimut et en élévation par :

$$G = k \frac{4\pi}{\theta_e \theta_a} \quad \text{avec } k \leq 1 \quad 2.4$$

La plupart des systèmes radiants ont des directions privilégiées d'émission, ils sont anisotropes. Il est habituel de mesurer le rayonnement autour d'une antenne c'est ce qui s'appelle le diagramme de rayonnement.

Il s'agit donc d'un diagramme d'énergie versus l'angle d'azimut ou d'élévation qui peut être affiché sur différents type de graphiques. La façon la plus courante est d'utiliser un graphique en coordonnées polaires. L'intensité est normalisée, c'est-à-dire que l'énergie pointée dans une direction donnée est le rapport de l'énergie dans cette direction à celle dans la direction d'émission maximale, appelée axe du lobe principal [19].

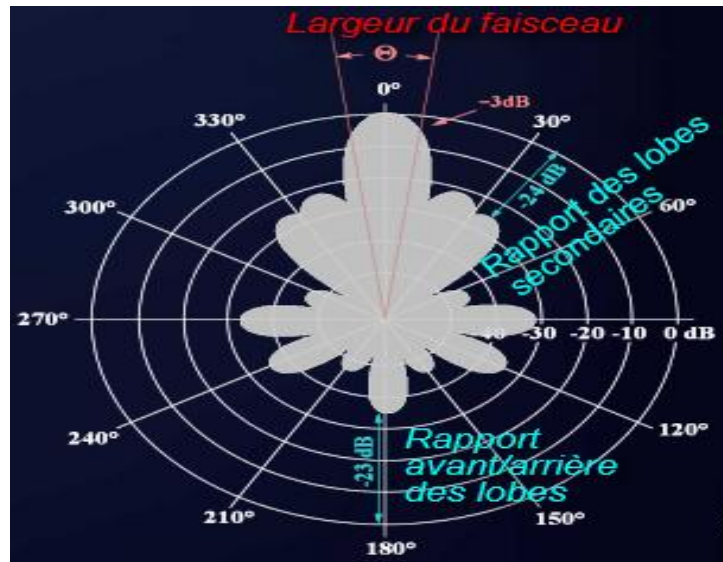


Figure II. 1 : Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires

- Lobe principal et lobes secondaires

Le diagramme de la précédente figure comporte plusieurs pics appelés lobes. L'énergie émise dans un de ces lobes est très supérieure à celle dans les autres directions. Il s'agit du **lobe principal**. Les autres sont appelés les **lobes secondaires** ou lobes mineurs. Certaines antennes ont plusieurs lobes principaux, par exemple les antennes pour la télévision qui sont conçues pour émettre vers les zones plus peuplées d'une région. D'autres antennes n'ont qu'un seul lobe principal, c'est le cas des antennes radar qui sont hautement directionnelles.

Les **lobes secondaires** sont des pics d'émission dans des directions différentes de l'axe du faisceau principal. Habituellement, ceux-ci sont indésirables puisqu'ils utilisent une partie de l'énergie émise en pure perte. Il est impossible de les éliminer complètement mais ils peuvent être minimisés. L'intensité de ces lobes secondaires est une des caractéristiques importantes d'une antenne et elle est exprimée en décibels. Le lobe arrière est particulièrement important car il indique l'énergie transmise ou reçue de la direction opposée à l'axe du faisceau principal.

- Largeur du faisceau

La largeur du faisceau est définie comme la région angulaire de chaque côté de l'axe du lobe principal où l'énergie radiée est supérieure à la moitié de l'intensité dans l'axe maximal, ou -3 dB en terme relatif. Cet angle est aussi appelé l'angle d'ouverture. Sur la figure, il est situé entre les lignes rouges. Comme on peut le voir, l'énergie émise n'est pas nulle quand on continue de chaque côté du lobe principal mais elle décroît rapidement.

La largeur du faisceau est mesuré tant selon l'azimut θ_a que l'élévation θ_e .

- Rapport avant/arrière

Le rapport avant/arrière des lobes d'une antenne est le rapport entre l'énergie émise dans le lobe principal et la direction diamétralement opposée. Une grande valeur de ce rapport est désirable puisqu'elle indique qu'un minimum d'énergie est irradié vers l'arrière de l'antenne [19].

II.3 Les Équations radar

II.3.1 Définition

L'équation de portée radar, ou simplement l'équation radar, est la relation mathématique la plus descriptive qui tient compte non seulement des effets de chaque paramètre majeur du système radar, mais également de ceux de la cible, de l'arrière-plan de la cible, du chemin de propagation et du milieu, elle est utile pour déterminer la distance maximale entre la cible et le radar. Cette équation radar peut également servir à la fois d'outil pour comprendre le fonctionnement du radar et de base pour l'analyse et la conception du système radar.

Dans la pratique, cependant, la connaissance des paramètres du radar et de la cible et du facteur de propagation n'est pas parfaite; et de nombreux facteurs de perte sont inclus pour aligner les résultats sur les performances réelles. Le calcul ou l'estimation de ces termes de perte est une étape importante dans l'évaluation du radar pratique [10].

II.3.2 Établissement de l'équation radar simple

Un radar avec une antenne omnidirectionnelle (une qui rayonne l'énergie de manière égale dans toutes les directions). Étant donné que ces types d'antennes ont un diagramme de rayonnement sphérique, nous pouvons définir la densité de puissance de crête (puissance par unité de surface) en tout point de l'espace comme égale à :

$$P_D = \frac{\text{Puissance de crête transmise}}{\text{Surface d'une sphère}} \quad 2.5$$

La densité de puissance ou puissance reçue par unité de surface à une distance R de la source (en supposant un milieu de propagation sans perte) est :

$$P_D = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad 2.6$$

Mais l'antenne radar répartit généralement la puissance rayonnée à l'intérieur d'un diagramme directif particulier. Le gain max G de l'antenne directive traduit précisément pour

la direction de rayonnement maximal le rapport de la puissance émise P' par une source isotrope à la puissance émise P par la source directive. On note : $G = \frac{P'}{P}$

La densité de puissance à une distance R d'un radar utilisant une antenne directive de gain G est alors donnée par :

$$P_D = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad 2.7$$

Lorsque l'énergie rayonnée du radar frappe une cible, les courants de surface induits sur cette cible rayonnent de l'énergie électromagnétique dans toutes les directions. La quantité d'énergie rayonnée est proportionnelle à la taille, à l'orientation, à la forme physique et au matériau de la cible, qui sont tous regroupés dans un paramètre spécifique à la cible appelé la section transversale radar ou Surface effective réfléchissante (SER, ou RCS, Radar Cross Section) désignée par σ [4].

II.3.2.1 Surface réfléchissante effective (SER, ou RCS, Radar Cross Section)

Un obstacle est caractérisé par sa *surface effective réfléchissante* σ , définie comme étant le quotient de la puissance réfléchi vers le radar par la densité de puissance incidente.

$$\sigma = \frac{P_r}{P_D} \quad \text{en (m}^2\text{)} \quad 2.8$$

Où P_r est la puissance réfléchi par la cible.

Ces constatations restent valables pour des cibles ayant d'autres formes. Les valeurs limites présentées pour plusieurs géométries à la figure ci-dessous, peuvent être employées en première approximation pour des objets grands par rapport à la longueur d'onde.

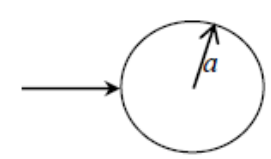

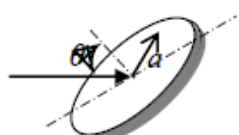
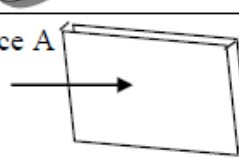
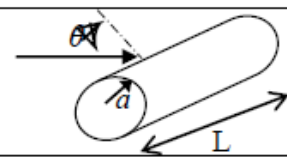
Cible		Surface réfléchissante effective σ (limite optique)
Sphère		πa^2
Cône (Incidence axiale)		$\frac{\lambda^2 \text{tg}^2 \theta}{4\pi}$
Disque		$\pi a^2 \cot g \theta^2 \left(\frac{4\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)$
Surface plane de grande dimension (incidence normale)	Surface A 	$\frac{4\pi A^2}{\lambda^2}$
Cylindre circulaire		$\frac{a\lambda}{2\pi} \frac{\cos \theta \sin^2 \left(\frac{2\pi L}{\lambda^2} \sin \theta \right)}{\sin^2 \theta}$

Figure II. 2 : Valeur approchée de la surface réfléchissante effective d'une cible métallique grande par rapport à la longueur d'onde λ

Ainsi, la puissance totale fournie au processeur de signal radar par l'antenne est :

$$P_{Dr} = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} A_e \quad 2.9$$

Nous savons par ailleurs que la surface équivalente A_e présentée par l'aérien commun à l'émission et à la réception se retrouve dans l'expression classique du gain de l'aérien.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad 2.3$$

Finalement la puissance reçue au niveau de l'antenne pour une surface équivalente sera :

$$A_e = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \quad 2.10$$

En remplaçant la valeur de A_e de l'équation (2.1) dans l'équation (2.11) on aura :

$$P_{Dr} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad 2.11$$

II.3.3 Signal minimum détectable

La capacité d'un récepteur radar à détecter un signal d'écho faible est limité par l'énergie du bruit qui occupe la même partie du spectre de fréquences que l'énergie du signal. Le signal le plus faible que le récepteur peut détecter est appelé le signal détectable minimum. La spécification du signal minimum détectable est parfois difficile en raison de sa nature statistique et parce que le critère pour décider si une cible est présente ou non ne peut pas être trop bien défini [5].

En supposant que cette puissance reçue corresponde au signal minimal perceptible ou détectable, la distance radar correspondante sera, par définition, la portée maximale du radar :

$$\text{Soit } S_{min} \text{ la puissance minimale du signal détectable : } S_{min} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{max}^4} \quad 2.12$$

Il s'ensuit que la portée maximale du radar R_{max} est :

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \right)^{1/4} \quad 2.13$$

Remarque : Cette définition du signal minimal amène la remarque suivante pour la suite de notre propos : la portée calculée à partir de la relation (2.8) précédente n'est en fait qu'une portée limite inexploitable puisqu'elle suppose une détection d'un signal au niveau du bruit.

Nous allons aborder la théorie pour calculer un signal minimal utilisable ou plus précisément comment calculer un certain rapport signal sur bruit en fonction des conditions ou autres exigences que l'on s'impose pour rendre le signal exploitable.

Nous verrons également par la suite, comment nous devons tenir compte des exigences techniques et technologiques (pertes diverses) dans l'équation.

II.4 Le Bruit en réception radar

En pratique, les signaux renvoyés reçus par le radar seront corrompus par du bruit, ce qui introduit des tensions indésirables à toutes les fréquences radar. Le bruit est de nature aléatoire et peut être décrit par sa fonction de densité spectrale de puissance (DSP). La puissance de bruit N est fonction de la bande passante de fonctionnement du radar, qu'on peut noter B . Plus précisément on a :

$$N = DSP \text{ Bruit} \times B \quad 2.14$$

Il est impossible, en effet, de tenir compte de tous les bruits extérieurs entrant par l'antenne, bruits atmosphériques, cosmiques ou d'origines industrielle et accidentelle, ou de brouillages divers, ou en provenance d'un autre radar par exemple. Ces bruits parasites quand ils ne sont pas supprimés restent généralement d'importance bien moindre que le bruit thermique.

Le bruit interne d'un récepteur peut être d'origine purement thermique ou comprendre d'autres facteurs. La plupart des autres sources ont un spectre de fréquence particulier similaire à celui du bruit thermique. Le tout peut donc être exprimé comme du bruit thermique.

Le bruit dans un système peut également être exprimé en température équivalente T_e . Il est dû au mouvement brownien des atomes dans les conducteurs et dépend du type de circuit.

Le signal minimal que peut capter une antenne faisant face à un corps noir est équivalent à la température de celui-ci (soit $290\text{ K} = 17^\circ\text{C} = 62^\circ\text{F}$ à la température de la pièce), plus le bruit interne du circuit électronique.

Et donc la puissance de bruit d'entrée d'une antenne sans perte est :

$$N_i = k \cdot T_e \cdot B \quad 2.15$$

Avec :

$k = 1.38 \times 10^{-23}$, qui est la constante de Boltzmann.

T_e : est la température de bruit effective en degrés Kelvin ($^\circ\text{K}$).

II.4.1 Le rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit, parfois dit SNR de l'anglais Signal-to-Noise Ratio, indique la qualité de la transmission d'une information. C'est un concept issu de l'électronique, dans laquelle il désigne le rapport des puissances entre :

- Le signal électrique d'amplitude maximale pour laquelle la distorsion à la sortie reste inférieure à une valeur limite ;
- le bruit de fond : signal qu'on ne peut transformer en information, qui correspond souvent à la modulation présente à la sortie du dispositif en l'absence d'un signal à l'entrée.

Il s'exprime dans ce cadre généralement en décibels (dB). Le concept de rapport signal sur bruit se généralise à l'ensemble des disciplines [20].

II.4.2 Facteur de Bruit

Le facteur de bruit (noise figure ou noise factor en anglais) d'un dispositif électronique quelconque, actif ou passif, quantifie la dégradation relative du rapport signal sur bruit entre sa sortie et son entrée, et ce en prenant comme hypothèse que la température ambiante est de 290 °K, donc que le bruit de fond en entrée est un bruit thermique correspondant à cette température de référence de 290 °K. Autrement dit, le facteur de bruit est défini comme le quotient des rapports signal sur bruit en entrée et en sortie de ce même dispositif quand le bruit en entrée est un bruit thermique à la température normalisée $T_e = 290$ °K, et ce facteur de bruit décrit la fidélité d'un récepteur radar [21].

Le facteur de bruit est généralement noté F .

$$F = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad 2.16$$

Où $(SNR)_i$ et $(SNR)_o$ sont respectivement les rapports signal sur bruit en entrée et en sortie. S_i est la puissance du signal en entrée et N_i le bruit d'entrée. De même S_o et N_o sont, respectivement, le signal de sortie et la puissance de bruit.

Si nous tirons S_i de la relation précédente on aura :

$$S_i = F \cdot (SNR)_o \cdot N_i \quad \text{Or on a : } N_i = k \cdot T_e \cdot B$$

$$\text{Donc il va en résulter : } S_i = k \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_o \quad 2.17$$

Notons qu'il est toujours préférable que le signal détectable minimum S_{min} soit supérieur à la puissance de bruit.

$$\text{Alors : } S_{min} = k \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_{o_{min}} \quad 2.18$$

La détection est basée sur l'établissement d'un niveau de seuil à la sortie du récepteur. Si la sortie du récepteur dépasse le seuil, un signal est supposé être présent. C'est ce qu'on appelle la détection de seuil [5].

Le seuil de détection radar est égal au SNR de sortie minimum, $(SNR)_{o_{min}}$. Si nous remplaçons l'équation (2.12) dans l'équation (2.8) on aura :

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F (SNR)_{o_{min}}} \right)^{1/4} \quad 2.19$$

Et de manière équivalente :

$$(SNR)_{o_{min}} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F R_{max}^4} \quad 2.20$$

Bien qu'elle puisse prendre de nombreuses formes différentes, l'équation (2.20) est ce qui est largement connu sous le nom **d'équation radar**. Il est courant d'effectuer des calculs associés à l'équation radar en utilisant l'arithmétique en décibels (dB), des calculs que nous serons amenés à effectuer plus loin pour la simulation.

II.5 Influence des pertes sur la portée

Lors de l'élaboration de l'équation du radar, on a considéré des conditions de propagations idéales, libres de toute perturbation. Cependant, dans la pratique, la propagation est affectée par de nombreuses pertes qui peuvent considérablement réduire l'efficacité du radar.

II.5.1 Nature des pertes

Les pertes qui se produisent dans tout le système radar sont généralement appelées pertes du système. Les pertes réduisent le SNR à la sortie du récepteur. Une perte de système est associée à chaque étape du traitement du signal dans les parties d'émission et de réception du système radar. En plus des pertes dues au traitement du signal, l'énergie électromagnétique en voyageant à travers l'atmosphère subit une autre perte connue sous le nom d'atténuation atmosphérique. Les autres pertes causées par l'utilisation sur le terrain du système radar et les pertes d'affichage sont de nature qualitative. Ces facteurs de perte sont généralement estimés sur la base de l'expérience passée et des observations expérimentales du concepteur du radar.

Les facteurs de perte ne sont pas statistiques au vrai sens du terme. Certains d'entre eux peuvent être très difficiles à déterminer avec précision. Bien que la perte associée à un facteur donné puisse être faible, il existe de nombreux mécanismes de perte possibles et leurs contributions totales aux pertes du système peuvent être importantes. Tous ces facteurs de perte peuvent être globalement classés en trois catégories telles que les pertes de conception, les pertes d'exploitation et les pertes de propagation [10].

II.5.2 Equation de la portée sous l'influence des pertes

On introduit une pondération par un facteur de pertes L avec ($L > 1$) dans l'équation de la portée définie précédemment en tenant compte de ces pertes devient :

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F L (SNR)_{o_{min}}} \right)^{1/4} \quad 2.21$$

Ce facteur regroupe diverses pertes dont les suivantes :

- atténuations internes dans les circuits de l'émetteur et du récepteur. Typiquement, elles sont de l'ordre de 1 à 2 dB,
- pertes dues aux fluctuations de la surface équivalente,
- Pertes dues au faisceau : dans l'équation du radar, on a supposé le gain de l'antenne constant, or ce gain varie pendant le balayage dont il faut tenir compte.

Il est important de noter qu'en général, les pertes radar désignées réduisent le SNR global.

$$\text{On a aussi : } (SNR)_{\text{min}} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F L R_{\text{max}}^4} \quad 2.22$$

Ainsi pour atteindre un certain SNR pour une plage de détection donnée, l'équation radar peut être modifiée pour calculer la largeur d'impulsion requise. Dans ce cas, l'équation radar peut s'écrire :

$$\tau = \frac{(4\pi)^3 k T_e B F L R^4 SNR}{P_t G^2 \lambda^2 \sigma} \quad 2.23$$

II.6 Equation de la portée de référence radar

Lors de la conception, de nombreux problèmes peuvent être dérivés ou calculés sur la base de la portée de référence radar qui est souvent fournie par l'utilisateur final du radar. Cette portée décrit simplement la plage à laquelle une certaine valeur SNR , appelée SNR_{ref} , doit être obtenue en utilisant une largeur d'impulsion de référence spécifique τ_{ref} , pour une section efficace cible prédéterminée σ_{ref} [4].

Les calculs des plages de référence radar supposent, que la cible se trouve sur la ligne de visée radar définie par le gain d'antenne maximal dans un faisceau (côté large de l'antenne).

$$\text{L'équation de portée de référence radar est : } R_{\text{ref}} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ref}} \tau_{\text{ref}}}{(4\pi)^3 k T_e F L S N R_{\text{ref}}} \right)^{1/4} \quad 2.24$$

Et donc l'équation radar à n'importe quelle plage de détection pour toute autre combinaison SNR, SER(RCS) et largeur d'impulsion τ peut être donnée comme suit :

$$R = R_{\text{ref}} \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_{\text{ref}}} \cdot \frac{SNR_{\text{ref}}}{SNR} \cdot \frac{1}{L_p} \right)^{1/4} \quad 2.25$$

L_p : pour désigner les pertes supplémentaires, est introduit pour considérer la possibilité que la cible de non référence ne soit pas sur la ligne de visée radar et aussi d'autres pertes associées au scénario spécifique.

$$\text{On peut aussi avoir : } SNR = SNR_{\text{ref}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \cdot \frac{1}{L_p} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_{\text{ref}}} \cdot \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R} \right)^4 \quad 2.26$$

II.7 Fouillis radar

II.7.1 Définition

Le fouillis est un terme utilisé pour décrire tout objet susceptible de générer des échos radar indésirables susceptibles d'interférer avec les opérations normales du radar. Les retours parasites qui entrent dans le radar par le lobe principal de l'antenne sont appelés fouillis du lobe principal ; sinon, ils sont appelés fouillis des lobes secondaires. Le fouillis peut être classé en deux grandes catégories : le fouillis de surface et le fouillis aérien ou volumique. Le fouillis de surface comprend les arbres, la végétation, le terrain, les structures artificielles et la surface de la mer (fouillis de mer). Le fouillis de volume a normalement une grande étendue (taille) et comprend la paille, la pluie, les oiseaux et les insectes. Le fouillis de surface change d'une zone à l'autre, tandis que le fouillis de volume peut être plus prévisible.

Les échos de fouillis sont aléatoires et ont des caractéristiques semblables à du bruit thermique car les composants de fouillis individuels ont des phases et des amplitudes aléatoires. Dans de nombreux cas, le niveau du signal de fouillis est beaucoup plus élevé que le niveau de bruit du récepteur. Ainsi, la capacité du radar à détecter des cibles intégrées dans un arrière-plan à fort écho dépend du rapport signal sur encombrement (**SCR**) plutôt que du **SNR** [4].

II.7.2 Fouillis de surface

Le fouillis de surface comprend à la fois le fouillis terrestre et marin, et est souvent appelé fouillis de surface. Le fouillis de zone se manifeste dans les radars aéroportés en mode de recherche vers le bas. C'est également une préoccupation majeure pour les radars au sol lors de la recherche de cibles à de faibles angles de rasage qui est l'angle entre la surface de la terre et l'axe principal du faisceau d'éclairage de l'antenne radar.

II.7.3 Fouillis de volume

Le fouillis de volume a de grandes étendues et comprend la pluie (météo), les balles, les oiseaux et les insectes. Le coefficient d'encombrement volumique est normalement exprimé en mètres carrés (RCS par volume de résolution). Les oiseaux, les insectes et autres particules volantes sont souvent appelés fouillis angulaire ou fouillis biologique.

II.8 Equation du radar bistatique

Un radar bistatique est un radar dans lequel les antennes d'émission et de réception sont séparées par une distance considérable, comme le montre la figure ci-dessous, et la séparation doit être comparable à la distance cible. Le RCS bistatique doit maintenant être indiqué comme une valeur bistatique σ_b , qui mesure la capacité de la cible réelle à diffuser l'énergie incidente de la direction de l'émetteur vers la direction du récepteur. L'angle bistatique, noté β , détermine en grande partie la taille du RCS bistatique : pour un petit angle.

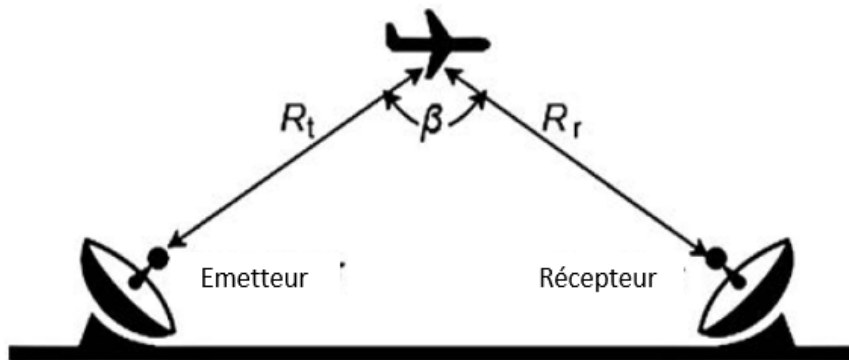


Figure II. 3 : Radar bistatique

Le RCS bistatique est similaire au RCS monostatique, et pour un grand angle bistatique approchant 180° , le RCS bistatique est déterminé par :

$$\sigma_b = \frac{4\pi A_e^2}{\lambda^2} \quad 2.27$$

L'équation du radar bistatique peut être facilement dérivée d'une manière similaire à celle suivie dans le cas du radar monostatique. Ainsi l'équation du radar monostatique pour le SNR est modifiée pour calculer le SNR du radar bistatique :

$$SNR_o = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 F K T_e B L_t L_r L_p} \quad 2.28$$

Où la plupart des symboles ont leur signification habituelle à l'exception de :

G_t = gain de l'antenne d'émission en direction de la cible

G_r = gain de l'antenne de réception en direction de la cible

R_t = distance de l'émetteur radar à la cible

R_r = distance du récepteur radar à la cible

σ_b = section efficace radar bistatique

L_t = perte de l'émetteur radar

L_r = perte du récepteur radar

L_p = perte de propagation moyenne, y compris les trajets d'émission et de réception

II.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux cerner le fonctionnement des antennes radar, puis les démarches à entreprendre pour établir les équations du radar en tenant compte des paramètres connus et de l'environnement. Le problème du radar est celui de la reconnaissance d'un signal en provenance d'une cible lorsqu'il est mélangé avec du bruit ainsi que les effets des pertes et l'influence des fouillis radar. On ne pourra donc parler pour un radar de détection d'une cible et l'on sera amené à définir : Une probabilité de détection qui est la probabilité de voir une cible où elle existe réellement. Une probabilité de fausse alarme qui est la probabilité de voir une cible là où il n'y a rien, ainsi que certaines méthodes utilisées pour réaliser la détection. La définition précise de ces deux facteurs basés sur les probabilités citées, caractérisant la qualité de la réception d'un radar, exige d'approfondir l'action du récepteur radar sur le signal et sur le bruit qui l'accompagne, et d'étudier les propriétés statistiques du bruit et du mélange signal bruit.

LA DÉTECTION PAR RADAR

CHAPITRE III : LA DETECTION PAR RADAR

III.1 Recherche et surveillance radar

Les radars de recherche doivent balayer rapidement pour couvrir le volume de balayage qui leur est assigné le plus rapidement possible, mais doivent également balayer assez lentement pour obtenir le nombre requis de coups dans la largeur de faisceau de l'antenne. L'équation du radar de recherche est unique principalement en raison de la nécessité d'utiliser la vitesse de balayage de l'antenne, la largeur de faisceau et le FRI (Fréquence de Répétition des Impulsions) pour tenir compte du numéro d'intégration requis. En supposant une recherche uniforme, sans chevauchement, d'un angle solide Ω attribué, le nombre de positions de faisceau d'antenne n_p dans la couverture de balayage est [4] :

$$n_p = \frac{\Omega}{\theta_e \theta_a / (57.296)^2} \quad 3.1$$

Avec θ_e, θ_a respectivement les angles d'élévation et d'azimut.

Au chapitre 2 nous avons défini l'équation pour calculer le SNR comme suit :

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F L R^4} \quad 3.2$$

En utilisant les relations : $\tau = 1/B$, et $P_t = P_{av} T / \tau$, où T , est la Période de Répétition des impulsions, et τ est la largeur de l'impulsion l'équation deviendra donc :

$$SNR = \frac{T}{\tau} \frac{P_{av} G^2 \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 k T_e F L R^4} \quad 3.3$$

Notons T_{sc} , le temps qu'il faudra au radar pour balayer un volume défini par l'angle solide Ω ,

alors le temps sur la cible sera alors : $T_i = \frac{T_{sc}}{n_B} = \frac{T_{sc}}{\Omega} \theta_a \theta_e$ 3.4

Si nous supposons qu'au cours d'un seul balayage, une seule impulsion par faisceau et par PRI illumine la cible. Donc T_i sera égale à T , alors le SNR sera :

$$SNR = \frac{P_{av} G^2 \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 k T_e F L R^4} \frac{T_{sc}}{\Omega} \theta_a \theta_e \quad 3.5$$

Après substitution, l'équation du radar de recherche (basée sur une seule impulsion par faisceau par PRI) est :

$$SNR = \frac{P_{av} A_e \sigma}{4\pi k T_e F L R^4} \frac{T_{sc}}{\Omega} \quad 3.6$$

Où $P_{av} A_e$, est appelé produit d'ouverture de puissance.

Le produit d'ouverture de puissance est largement utilisé pour catégoriser la capacité du radar à remplir sa mission de recherche. Ce produit d'ouverture de puissance est calculé pour atteindre un SNR et une section efficace radar prédéterminés pour un volume de recherche donné défini par l'angle solide.

III.2 Filtrage en réception radar

Le traitement ou le filtrage du signal lors de la réception a pour but d'assurer la meilleure visibilité du signal sans le bruit et les autres signaux parasites. Il doit aussi contribuer à assurer au radar ses meilleures performances de pouvoir de séparateur et de précision. Les étapes de la détection peuvent être résumées par la figure ci-dessous [9]:

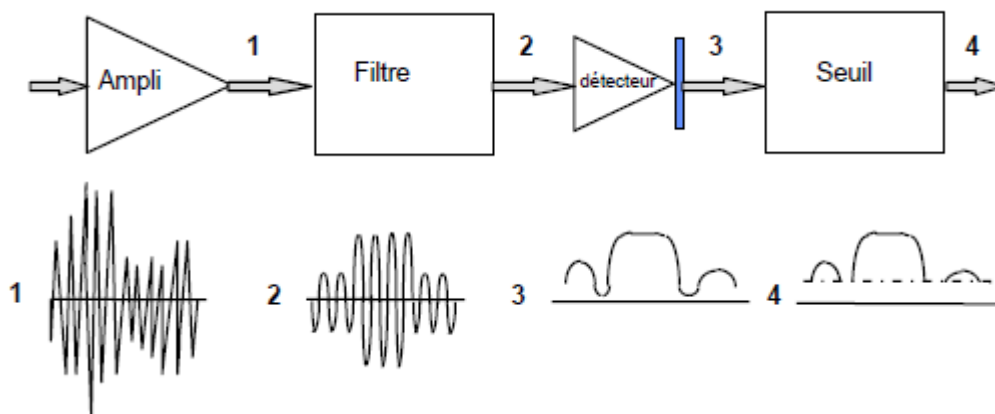


Figure III. 1 : Traitement du signal radar en réception

- L'amplificateur amène le signal à un niveau convenable ;
- Le filtrage a pour but d'atténuer au maximum le bruit tout en préservant le signal ;
- Le détecteur prend (à un coefficient près) le carré de l'amplitude du signal ;
- Le traitement final, se ramène à placer un seuil plus ou moins complexe sur le mélange signal plus bruit après détection, pour ne laisser passer que les signaux d'amplitude suffisante, entraînant ainsi :
 - Une limitation de la visibilité des échos utiles, les échos faibles pouvant ne pas être sélectionnés ;
 - Un risque de « fausse alarme », lorsque le bruit seul forme un écho parasite dépassant le seuil de détection.

III.2.1 Filtrage non optimal

Le filtre réalisé est généralement un filtre passe bande quasi rectangulaire « presque adapté » de bande voisine de : $\Delta F = 1.2/\tau$

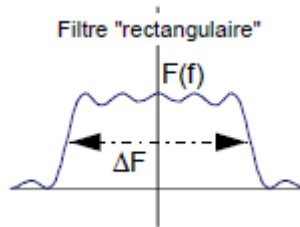


Figure III. 2 : Filtre rectangulaire

Le résultat obtenu dépend alors de largeur de bande du filtre : ΔF comme le montre la figure ci-après, qui présente le rendement du filtrage η tel que :

$$\frac{S}{B} = \eta \frac{E}{B} \quad 3.7$$

Avec S/B le rapport signal sur bruit, qu'on notera par la suite SNR, pour faciliter l'écriture.

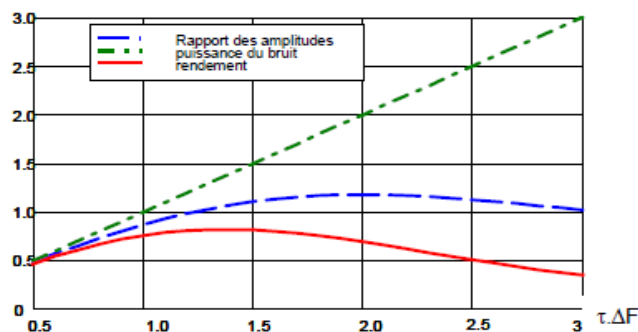


Figure III. 3 : Calculs effectués pour un filtre parfaitement rectangulaire

Le rendement optimum du filtrage est alors voisin de 0.8 (perte 1 dB), pour une largeur de bande définie par : $\tau \cdot \Delta F \approx 1.4$ pour un filtre parfaitement rectangulaire [9].

Elle est légèrement inférieure pour un filtre « quasi rectangulaire » de moins raides.

En définitive nous retiendrons donc :

$$\Delta F \approx \frac{1.2}{\tau} \quad \text{et} \quad \frac{S}{B} \approx 0.8 \frac{E}{B} \quad 3.8$$

Le rendement varie peu en fonction de ΔF , donc dans certains cas on adoptera une bande supérieure, pour mieux préserver la forme du signal traité, comme le montrent les figures suivantes :

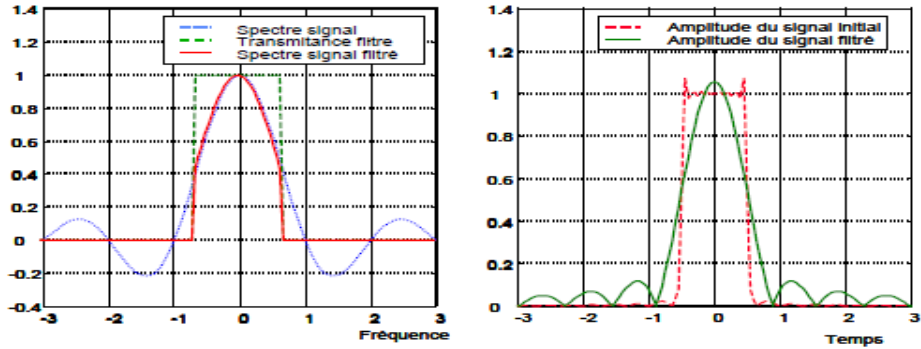


Figure III. 4 : Filtre rectangulaire (comportement à l'adaptation $\Delta F=1.4/\tau$)

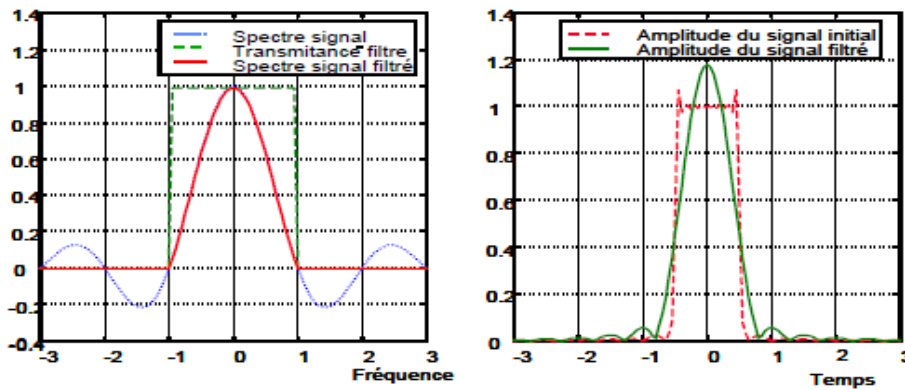
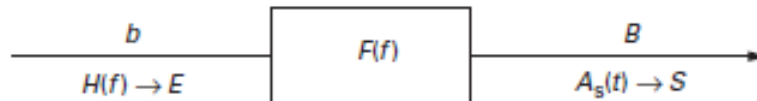


Figure III. 5 : Filtre rectangulaire (comportement à l'adaptation $\Delta F=2/\tau$)

III.2.2 Filtrage optimal (filtre adapté)

Soit $F(f)$ la transmittance du filtre ci-dessous.



Ce filtre voit à son entrée :

- un bruit de densité spectrale : b ;
- un signal défini ici par son spectre $H(f)$ qui est relié à son énergie par la relation :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)|^2 \cdot df \quad 3.9$$

À la sortie du filtre, on trouve :

- un bruit de puissance moyenne :

$$B = \int_0^{+\infty} b \cdot [F(f)]^2 \cdot df = \frac{b}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} [F(f)]^2 \cdot df \quad 3.10$$

- un signal dont le spectre est devenu :

$$H_s(f) = H(f).F(f) \quad 3.11$$

L'**amplitude du signal à la sortie du filtre** est définie par la transformée inverse de Fourier :

$$A_s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f).F(f).e^{j2\pi ft} df \quad 3.12$$

L'expression du rapport signal sur bruit sera par la suite :

$$\frac{S}{B} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} |H(f).F(f)|.df \right]^2}{b \int_{-\infty}^{+\infty} |F(f)|^2.df} \quad 3.13$$

Le rapport S/B est, à spectre $H(f)$ donné, une fonction du module de la transmittance $|F(f)|$ du filtre utilisé. Il reste donc à choisir l'atténuation de ce filtre en fonction de la fréquence.

Le bon filtre pour un signal donné est celui qui « *suit* » le plus fidèlement possible son spectre, en atténuant peu les parties fortes de ce spectre et davantage ses parties faibles, car il devient caractéristique de ce signal à l'exclusion de tout autre. Le filtre adapté au signal répondra donc à la condition d'amplitude :

$$|F(f)| = |H(f)| \quad 3.14$$

Ces deux conditions réunies se résument dans l'expression suivante :

$$F(f) = H^*(f) \quad 3.15$$

Le **filtre optimum**, qui maximise le rapport signal sur bruit à la sortie du récepteur, doit avoir comme transmittance la quantité conjuguée du spectre du signal [22].

Le filtre optimal pondère le plus fortement les composantes spectrales du signal d'entrée qui dépassent largement la densité spectrale de bruit et désaccentue les régions spectrales dans lesquelles la densité spectrale de bruit est beaucoup plus grande que le spectre du signal [3].

Le **rapport signal sur bruit** à la sortie du filtre s'écrira :

$$(S/B)_{max} = E/b \quad 3.16$$

Avec :

- S puissance crête du signal moyenne fréquence (sous porteuse) après filtrage ;
- B puissance moyenne du bruit moyenne fréquence (sous porteuse) après filtrage ;
- E énergie du signal moyenne fréquence (sous porteuse) avant filtrage ;
- b densité spectrale du bruit moyenne fréquence (sous porteuse) avant filtrage ;
- E/b rapport signal sur bruit énergétique.

Dans les cas courants, les filtres ne sont pas parfaitement adaptés, et on peut définir un **rendement de filtrage** :

$$\eta = \frac{S/B}{E/b} \quad 3.17$$

En pratique, le rendement de filtrage est de l'ordre de 0,8, soit une perte de S/B par rapport au filtrage optimal de l'ordre de 1 dB.

III.3 Détection radar

La qualité de détection de cibles inhérente au radar est limitée par la qualité de l'information délivrée par les dispositifs émetteur-récepteur d'une part et d'autre part celle-ci est sujette aux influences de l'environnement ou de l'espace couvert par le radar. Ces influences peuvent être les conséquences de sources naturelles et/ou artificielles.

Dans le domaine du radar, deux problèmes se posent à l'opérateur :

Le premier problème est la détection d'une cible dans l'espace à surveiller. Pour cela, il existe deux hypothèses possibles à considérer :

- Hypothèse H_0 : pas de cible,
- Hypothèse H_1 : présence d'une cible

Cette première opération consiste donc à décider si H_0 ou H_1 est vrai pour une observation.

En second lieu l'opération sera marquée par la localisation en angles, en distance, et en vitesse de la cible à détecter. La présence du bruit perturbe la mesure, qui ne peut donc être exacte. Il n'est possible que d'estimer chaque paramètre : valeur de l'amplitude ou de la phase pour les fonctions déterministes et valeur moyenne et variance pour les fonctions aléatoires. On définit alors les termes suivants :

- détection correcte : décider H_1 alors que H_1 émis
- Fausse alarme : décider H_1 alors que H_0 émis
- Manque de détection : décider H_0 alors que H_1 émis
- Rejet correct : décider H_0 alors que H_0 émis

En général, la forme du signal émis est connue ainsi que la densité de probabilité des paramètres de ce signal. Il en est de même pour la forme d'action du bruit et ses caractéristiques.

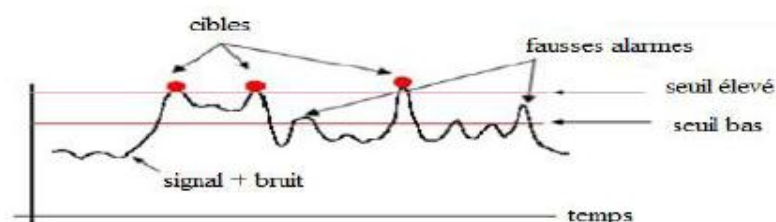


Figure III. 6 : Principe de détection

III.3.1 Probabilité d'apparition de faux signal (Fausse alarme)

Pendant la surveillance de l'espace aérien et pendant l'opération de mesure, la réception du signal écho est réalisée toujours en présence des signaux indésirables. Dans le cas où il n'existe pas de signal écho, on reçoit seulement les bruits.

Soit V_T le seuil optimal du récepteur et γ la variance du bruit. En sortie de l'amplificateur de fréquence intermédiaire, le signal est donné par une enveloppe définie par la loi de répartition de type Rayleigh :

$$p(U) = \frac{U}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{U^2}{2\gamma^2}\right) \quad 3.18$$

La probabilité d'apparition du faux signal qui dépasse le seuil V_T de réception a pour expression :

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} \left(\frac{U}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{U^2}{2\gamma^2}\right)\right) dU = \exp\left(-\frac{V_T^2}{2\gamma^2}\right) \quad 3.19$$

$$V_T = \sqrt{2\gamma^2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)} \quad 3.20$$

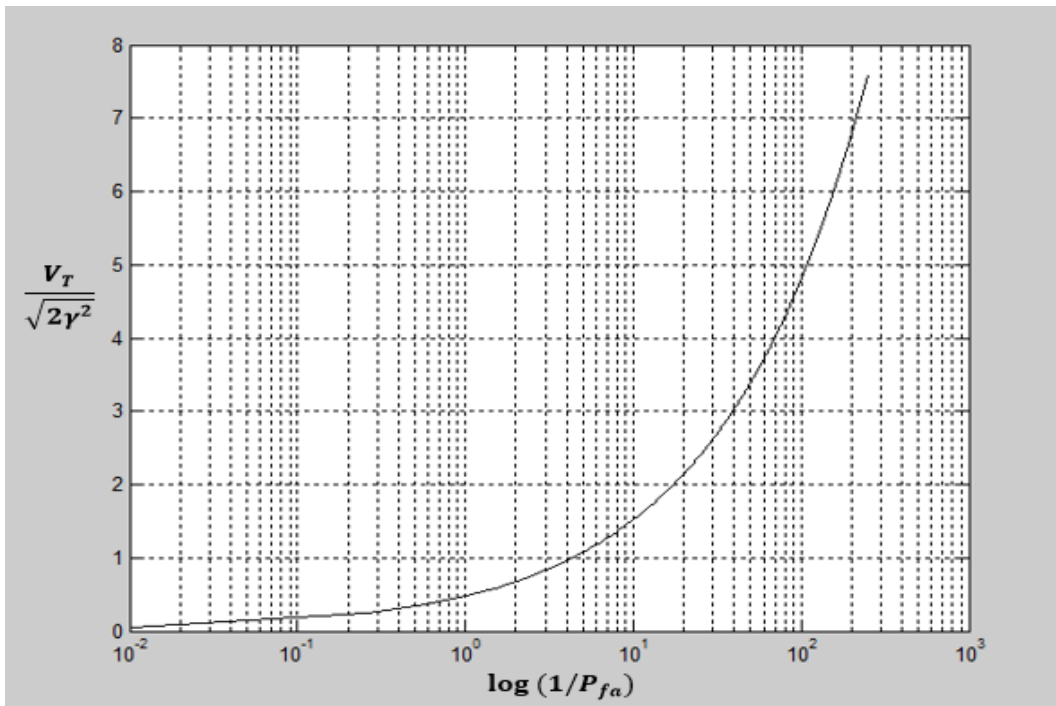


Figure III. 7 : Seuil de détection normalisé par rapport à la probabilité de fausse alarme.

La figure précédente montre un tracé du seuil normalisé en fonction de la probabilité de fausse alarme. Il est évident d'après cette figure que P_{fa} est très sensible aux moindres changements de la valeur seuil.

III.3.2 Probabilité de réception du signal réel

Après l'amplificateur de fréquence intermédiaire, l'enveloppe du signal total formée par le signal utile et le bruit a comme distribution de type Rayleigh exprimée par :

$$p(U, \varphi) = \frac{U}{2\pi\gamma^2} \exp\left(-\frac{U^2+A^2}{2\gamma^2} - \frac{AU \cos\varphi}{\gamma^2}\right) \quad 3.21$$

U : est l'amplitude du bruit ;

A : L'amplitude du signal.

En intégrant la relation précédente par rapport à φ , on a :

$$p(U) = \frac{U}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{U^2+A^2}{2\gamma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{AU}{\gamma^2}\right) \quad 3.22$$

La probabilité d'apparition du signal réel en présence du bruit quand il y a un seuil V_T s'exprime par :

$$P_D = \int_{V_T}^{+\infty} p(U) dU \quad 3.23$$

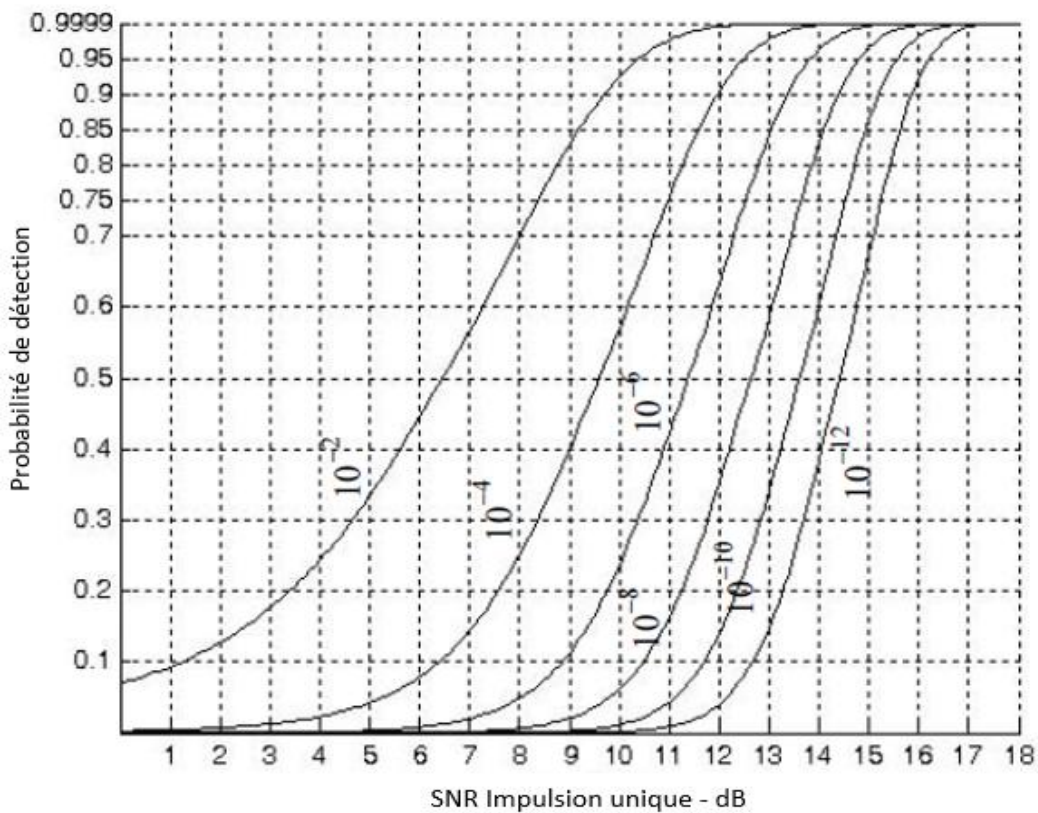


Figure III. 8 : Probabilité de détection par rapport SNR à impulsion unique, pour plusieurs valeurs de Pfa

III.4 Intégration d'impulsion

Lorsqu'une cible est éclairée par le faisceau du Radar, plusieurs échos sont captés par le récepteur pendant le balayage d'antenne, ce qui peut améliorer la probabilité de détection par une sommation des impulsions retournées.

En ajoutant les retours de toutes les impulsions renvoyées par une cible donnée au cours d'un seul balayage, la sensibilité radar (SNR) peut être augmentée. Le nombre d'impulsions renvoyées dépend de la vitesse de balayage de l'antenne et de la PRF du radar.

Plus précisément, le nombre d'impulsions renvoyées par une cible donnée est donné par :

$$n_i = \frac{\theta_a T_{sc} f_r}{2\pi} \quad \text{ou} \quad n_i = \frac{\theta_a f_r}{\dot{\theta}_{sc}} \quad 3.24$$

Avec n_i , le nombre d'impulsion, θ_a est la largeur de faisceau de l'antenne azimutale en degré, f_r la fréquence de répétition des impulsions, et $\dot{\theta}_{sc}$ Taux de balayage de l'antenne (degré/s).

Cette intégration peut se faire de manière cohérente ou non cohérente. L'intégration cohérente appelée aussi intégration de pré détection est basée sur la préservation de la phase et de l'amplitude du signal de retour de chaque impulsion. Par contre la détection non cohérente est effectuée après la détection et additionne essentiellement une fraction de chaque impulsion en moyenne ; la phase de chaque impulsion est perdue après le processus de détection. L'intégration non cohérente est aussi appelée intégration post détection.

III.4.1 Intégration cohérente

En intégration cohérente, lorsqu'un intégrateur parfait est utilisé (efficacité de 100%), pour intégrer n_i impulsions le SNR est amélioré du même facteur. Sinon, une perte d'intégration se produit, ce qui est toujours le cas pour une intégration non cohérente. Une perte d'intégration cohérente se produit lorsque le processus d'intégration n'est pas optimal. Cela pourrait être dû à la fluctuation de la cible, à l'instabilité de l'oscillateur local du radar ou à des changements de chemin de propagation.

Le SNR résultant noté SNR_{IC} de l'intégration cohérente des impulsions n_i , pour un SNR à l'impulsion unique requis pour produire une probabilité de détection donnée par $(SNR)_1$ est :

$$SNR_{IC} = n_i \cdot (SNR)_1 \quad 3.25$$

L'inconvénient avec cette intégration, elle ne peut pas être appliquée sur un grand nombre d'impulsions en particulier si le RCS de la cible varie rapidement.

III.4.2 Intégration non cohérente

L'intégration non cohérente est souvent mise en œuvre après le détecteur d'enveloppe, également appelé détecteur quadratique. L'intégration non cohérente est moins efficace que l'intégration cohérente. En effet, le gain d'intégration non cohérente est toujours inférieur au nombre d'impulsions intégrées non cohérentes. Cette perte d'intégration est appelée post-détection ou perte de détecteur à loi carrée.

En utilisant l'approximation de la perte d'intégration rapportée par Barton et utilisée par Curry on a :

$$L_{INC} = \frac{1+(SNR)_1}{(SNR)_1} \quad 3.26$$

Il s'ensuit que le SNR lorsque les n_i impulsions sont intégrées de manière non cohérente est :

$$SNR_{INC} = \frac{n_i(SNR)_1}{L_{INC}} = n_i \cdot (SNR)_1 \times \frac{(SNR)_1}{1+(SNR)_1} \quad 3.27$$

III.4.3 Intégration binaire

C'est une technique qui utilise une détection à double seuil, où le signal est comparé à un premier seuil analogique puis codé par (1 ou 0). Le résultat des comparaisons de n_i impulsions successives pour la même distance est mis en mémoire et leur somme est comparée à un deuxième seuil numérique M : Si la somme est supérieure ou égale à M, on décide la présence d'une cible [14].

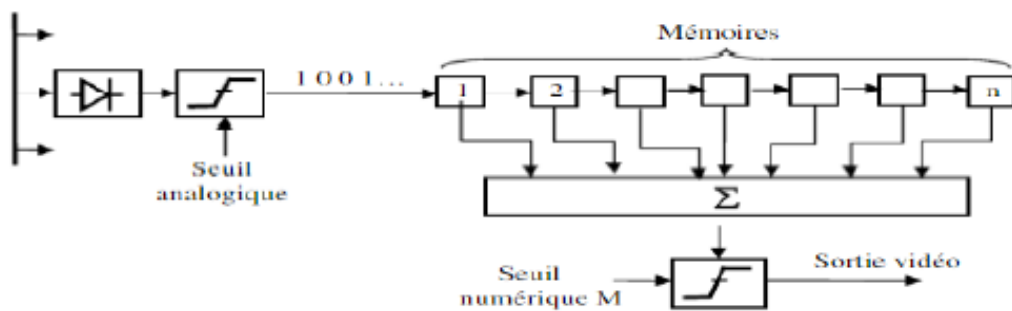


Figure III. 9 : Intégration binaire

III.5 Détection de cibles fluctuantes

La cible est modélisée par une surface équivalente (SER ou RCS) pour représenter la capacité de la cible à réfléchir la puissance dans la direction de l'antenne de réception [14].

La fluctuation de la cible réduit la probabilité de détection, ou réduit de manière équivalente le SNR.

Il est possible de calculer la SER dans les cas simples, mais dans le cas complexe, il est difficile de mesurer la SER à cause d'incertitudes sur le mouvement de la cible, pour cela Swerling a proposé cinq modèles de fluctuation, ces modèles caractérisent la SER comme un processus aléatoire [11] [13].

La probabilité de détection d'une cible fluctuante est calculée d'une manière similaire à l'Eq.(3.23), sauf dans ce cas $f(U)$ est remplacé par la fonction de densité de probabilité conditionnelle $f(U/\sigma)$.

Tableau III. 1 : Modèles de cibles de Swerling

Modèle Swerling	Applications	Type de fluctuation	Fonction densité de probabilité
SW0 et SW5	RCS Constant	Pas de fluctuation	
SW1	Cibles constituées de nombreux petits diffuseurs de valeurs RCS comparables.	Cible ayant une amplitude constante sur un balayage, et amplitude variant indépendamment d'un balayage à l'autre.	$f(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right)$
SW2	Cibles constituées de nombreux petits diffuseurs de valeurs RCS comparables	Amplitude de la cible qui fluctue indépendamment d'une impulsion à l'autre.	$f(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right)$
SW3	Cibles constituées d'un grand diffuseur RCS et de nombreux petits diffuseurs RCS égaux.	Similaire à SW1 sauf dans ce cas, la puissance cible fluctue indépendamment d'une impulsion à l'autre.	$f(\sigma) = \frac{4\sigma}{\bar{\sigma}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\bar{\sigma}}\right)$
SW4	Cibles constituées d'un grand diffuseur RCS et de nombreux petits diffuseurs RCS égaux.	la fluctuation des cibles se fait d'impulsion en impulsion.	$f(\sigma) = \frac{4\sigma}{\bar{\sigma}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\bar{\sigma}}\right)$

Le schéma suivant illustre la détection en générale :

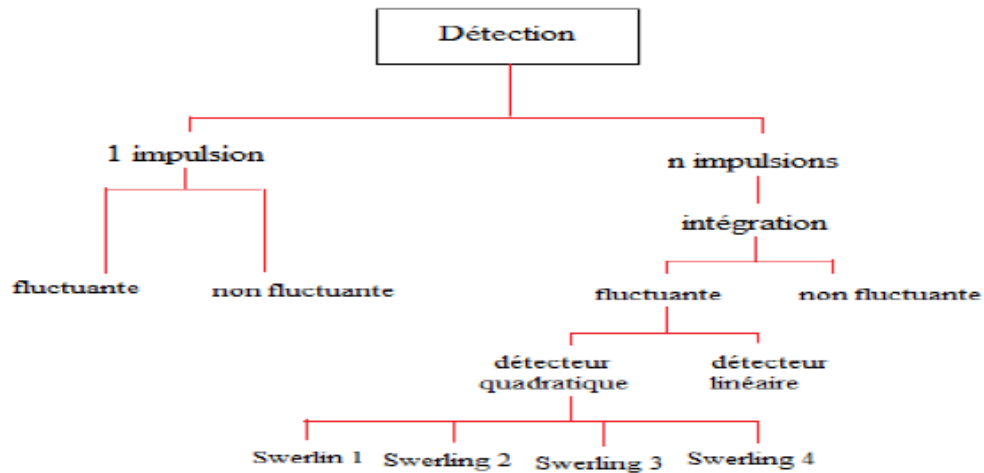


Figure III. 10 : Types de détection

III.6 Taux de fausses alarmes constant (Constant False Alarms Rate : CFAR)

Pour différentes raisons, la densité de puissance de bruit varie. Pour maintenir un taux de fausses alarmes constant, il faut créer un seuil qui s'adapte à cette variation : c'est le rôle du circuit CFAR. Ce seuil est calculé en permanence en fonction de la variance de bruit.

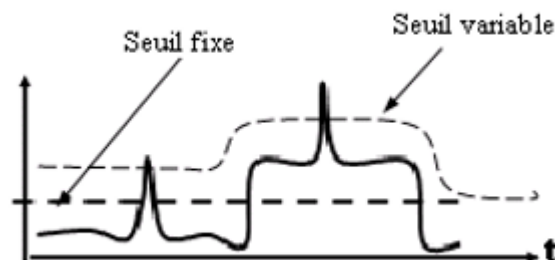


Figure III. 11 : Seuil avec CFAR

Différentes techniques sont utilisées :

- CFAR adaptatif :

Suppose que la distribution des interférences est connue et se rapproche des paramètres inconnus associés à ces distributions.

- CFAR non paramétrique :

Ces processeurs ont tendance à s'adapter à des distributions d'interférences inconnues.

III.7 Détection des cibles mobiles

III.7.1 Localisation en distance doppler

La vitesse radiale ou vitesse de rapprochement des objets détectés est un paramètre mesurable par les radars sous certaines conditions, qui se manifeste à travers l'effet doppler.

Soit un mobile situé à l'instant d'origine à une distance D_0 , du radar et s'en rapprochant à la vitesse V_R . Alors le temps du trajet de l'onde s'écrira :

$$\Delta T = \frac{2D}{c} = \frac{2D_0}{c} = \frac{2V_R t}{c} \quad 3.28$$

Le signal émis est de la forme : $S_{émis}(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$

Le signal reçu sera donc :

$$S_{reçu} = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_r \cdot (t - \Delta T)) = A \cdot \cos\left(2\pi \left(f_r + \frac{2V_R t}{c/f_r}\right) + \varphi_0\right) \quad 3.29$$

Avec $\lambda = c/f_r$, ainsi la fréquence du signal reçu a varié de $f_d = \frac{2V_R}{\lambda}$.

Où f_d est la fréquence doppler de la cible. Cette variation de fréquence très faible peut être mise en évidence en comparant le signal reçu et le signal émis. On peut également constater que leur phase relative a varié, c'est souvent à travers cette variation de phase que l'on met en évidence l'effet doppler.

On notera enfin que cette translation de fréquence est en réalité due à une évolution de la durée du signal reçu.

En effet si la distance entre la cible et le radar diminue pendant la durée du signal, le début du signal aura parcouru une distance supérieure à celle parcourue par la fin du signal. La « queue » du signal rattrape ainsi sa « tête » donc la durée du signal diminue et corrélativement sa fréquence augmente.

Si $T_{émis}$ est la durée du signal émis, $T_{reçu}$ la durée du signal reçu, on pourra alors vérifier que :

$$T_{reçu} = T_{émis} \left(1 - \frac{2V_R}{c}\right) \quad 3.30$$

Ainsi, le radar possède dans une certaine mesure le pouvoir de discriminer des cibles de vitesses radiales différentes même si elles sont dans le même volume de confusion [8].

III.7.2 Visualisation des cibles mobiles

La plupart des radars travaillent dans un milieu encombré par les échos fixes ou de vitesse lente (sol, mer, nuages, pluies, neige...). On cherchera alors à éliminer ces échos indésirables,

normalement reçus par le radar et dont la présence constitue une gêne pour la détection des cibles intéressants.

L'aspect du problème est de tenter de séparer les échos fixes et les échos mobiles en se basant sur le fait que leurs vitesses radiales sont différentes, et donc qu'ils se distinguent par leur effet doppler.

Les procédés correspondants, basés sur la séparation de deux cibles par leurs fréquences doppler, permettent de distinguer une cible mobile dans un milieu d'échos fixes, même si la cible mobile est de surface équivalente plus faible que les échos fixes qui lui sont superposés. Ils possèdent donc une qualité supplémentaire à l'élimination des échos fixes qui est la faculté de visualiser le mobile ou la Visualisation des Cibles Mobiles (VCM), traduction du terme anglo-saxon Moving Target Indicator (MTI).

La qualité d'un circuit VCM est liée au pouvoir séparateur en doppler du radar ; elle sera d'autant meilleure que la durée de la mesure sera grande. En particulier, tout radar émettant des impulsions très longues aura un pouvoir séparateur élevé [8][15].

III.8 Simulation

III.8.1 Introduction sur Matlab

Le logiciel MATLAB pour (MATrix LABoratory) est un logiciel qui est connu par sa performance en termes de calcul matriciel à syntaxe simple, et fournit des outils remarquables dans plusieurs domaines comme en électronique, en informatique, en télécommunication, en mécanique, etc.

Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. MATLAB est un interpréteur: les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne. MATLAB fonctionne dans plusieurs environnements tels que Xwindows, Windows, Macintosh.

GUIDE ou Graphique User Interface (GUI) développement environnement ou encore l'environnement du développement de l'interface graphique de l'utilisateur, fournit un ensemble d'outils pour créer des interfaces graphiques de l'utilisateur (GUIs). Ces outils simplifient le processus de présenter et programmer GUIs.

➤ **Unité Décibel**

Dans les mesures de puissance radio, les pertes et les gains sont normalement exprimés en dB (décibels). Le décibel est une unité relative « logarithmique » qu'il est très utile pour simplifier les calculs de puissance radio.

La puissance transmise est normalement exprimée en (dBm). Un dBm est une unité relative de décibel comparée à 1 milliwatt (0.001W).

$$dBm = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{0.001}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{P(W)}{mW}\right) \quad 3.31$$

En utilisant le dB comme manière de calculer la puissance, il est utile de se rappeler les directives suivantes :

- Doubler la puissance, équivaut à ajouter 3dB
- La réduction de la puissance par moitié est égale à soustraire 3dB

III.8.2 Implémentation des équations radar

III.8.2.1 L'équation SNR du radar

Au chapitre 2, nous avons donné l'équation (2.14), qui représente l'équation du SNR ainsi à travers Matlab nous avons créé une fonction pour implémenter cette équation afin tracer une courbe qui retourne le SNR minimum en fonction de la portée maximale.

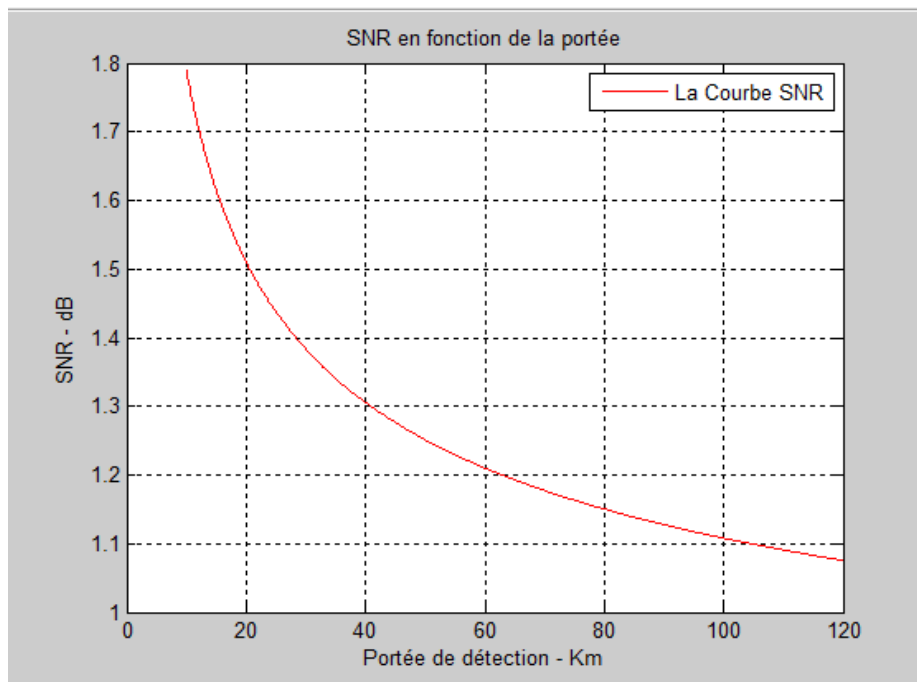


Figure III. 12 : SNR en fonction de la Portée

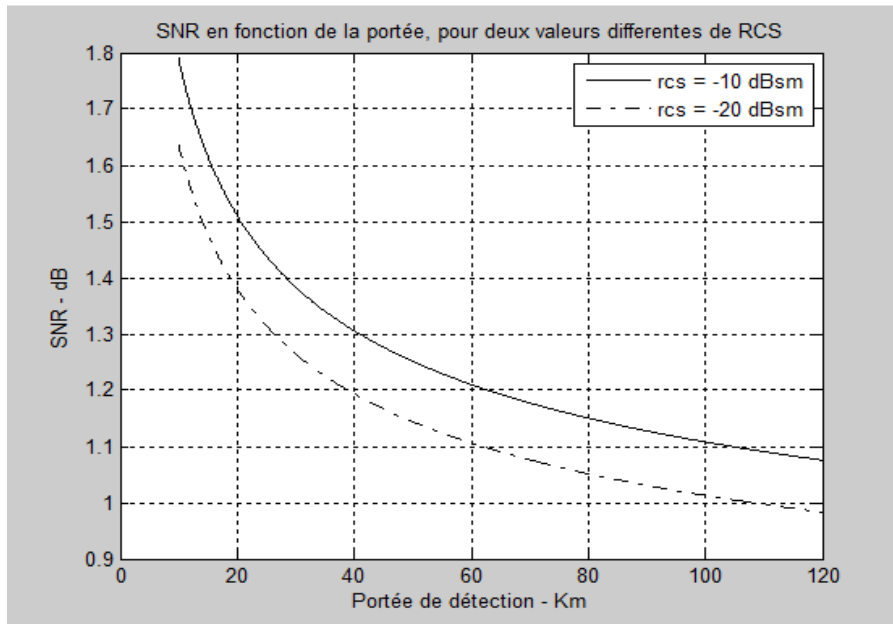


Figure III. 13 : SNR en fonction de la Portée, pour deux valeurs différentes de RCS

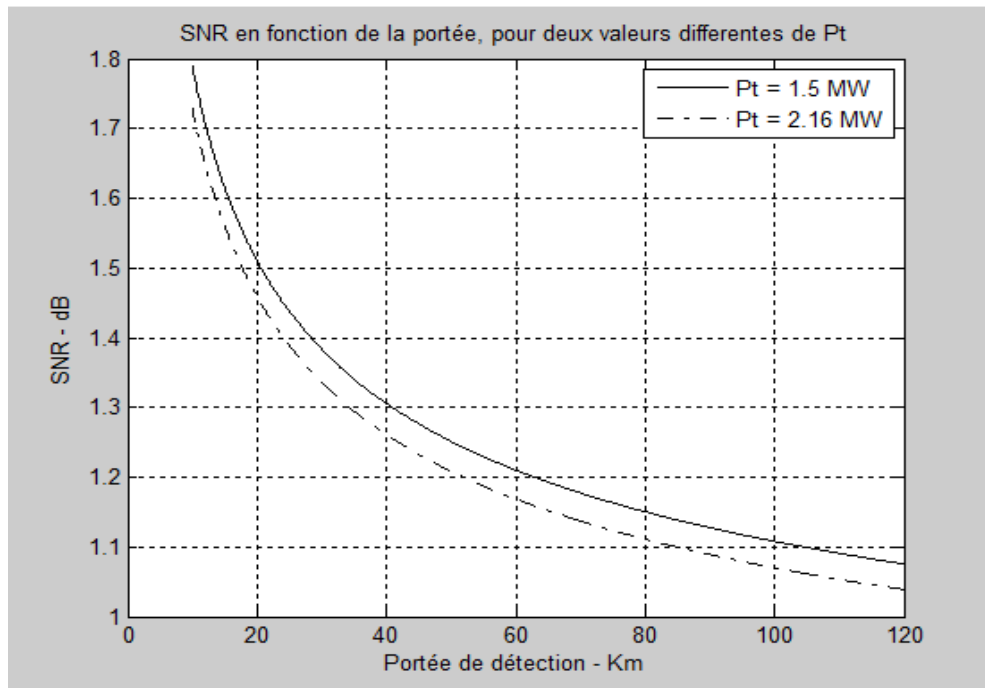


Figure III. 14 : SNR en fonction de la Portée, pour deux valeurs différentes de la puissance de crête

Remarque 1 :

D'après les trois figures précédentes nous avons remarqué qu'à une distance proche du radar, le taux d'SNR est élevé, donc les signaux ne sont pas encore sensibles aux bruits importants. Mais en s'éloignant du radar, ce taux va diminuer ce qui fait que les bruits s'influent aux signaux radar augmentent et aussi la probabilité de fausse alarme en même temps.

III.8.2.2 L'équation de Portée du radar

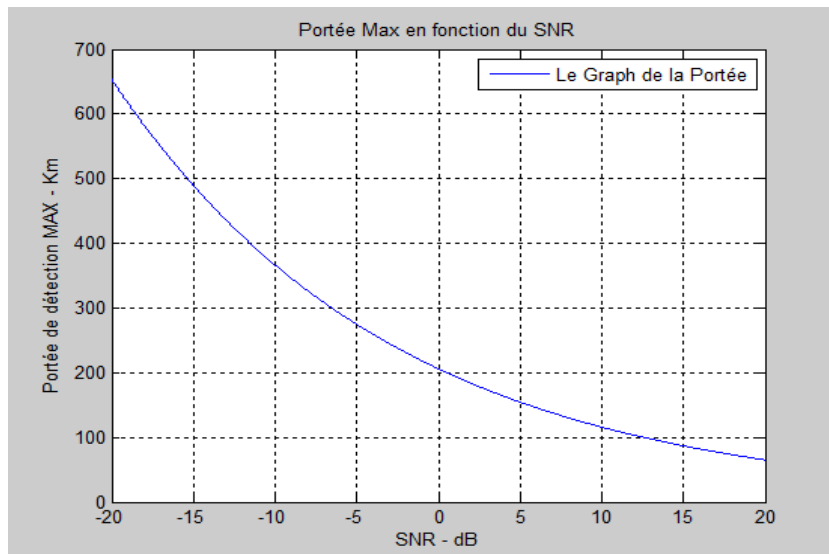


Figure III. 15 : Portée en fonction du SNR

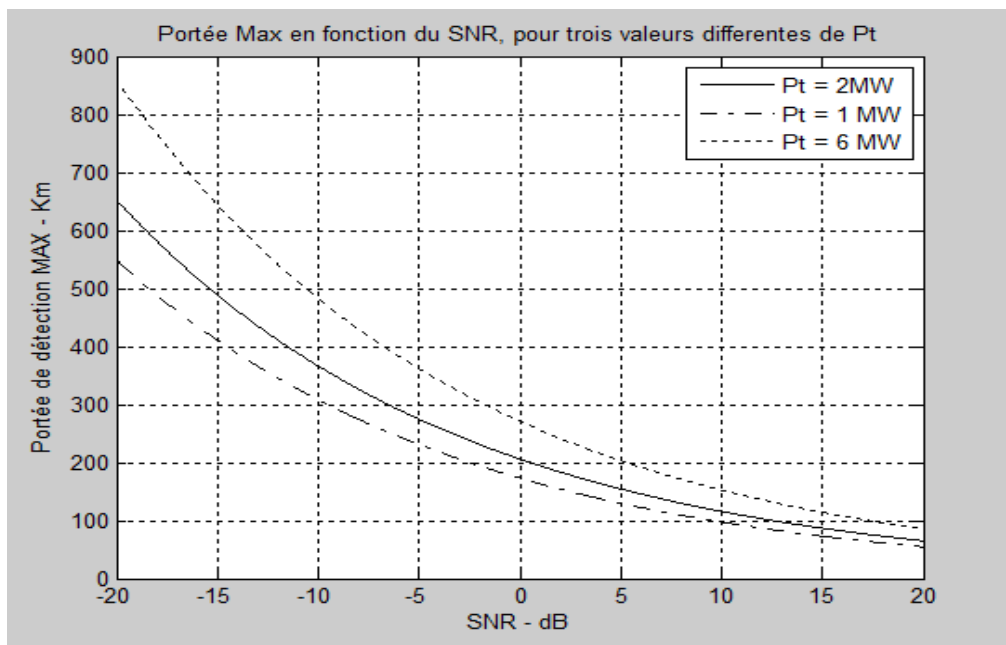


Figure III. 16 : SNR en fonction de la Portée, pour trois valeurs différentes de la puissance de crête

Remarque 2 :

Les deux figures précédentes décrivent l'allure de la courbe de la distance en fonction du SNR qui est une fonction décroissante. La distance ou la portée du radar est maximale au moment où le SNR est faible, c'est-à-dire que le signal radar est mis sous une grande influence de bruits. Alors que cette portée diminue si le SNR augmente donc c'est à l'opérateur de faire le bon choix selon le paramètre important.

III.8.2.3 Puissance de crête Transmise

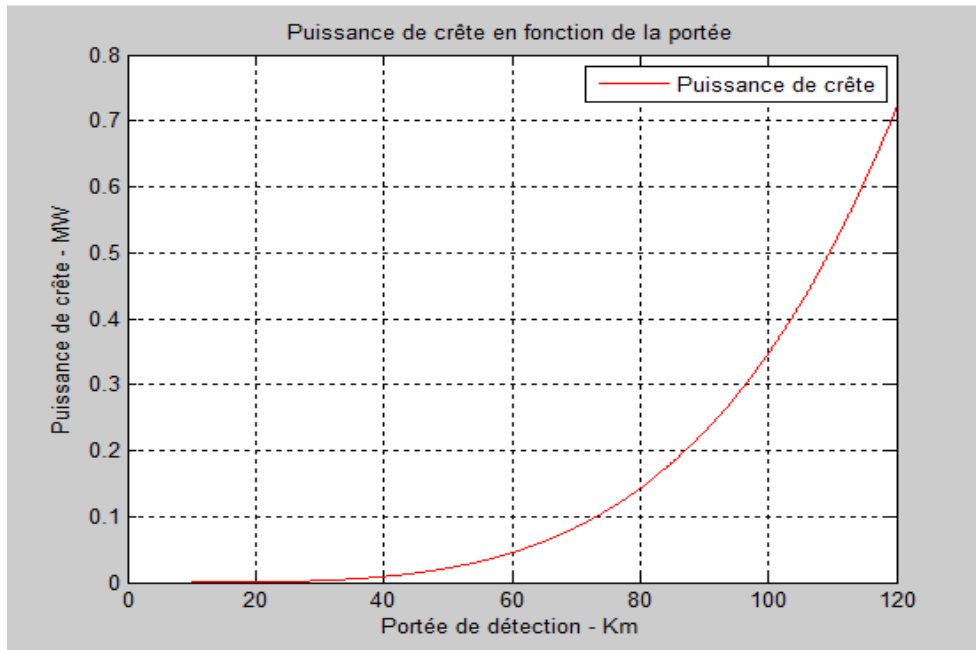


Figure III. 17 : Puissance de crête en fonction de portée Maximale

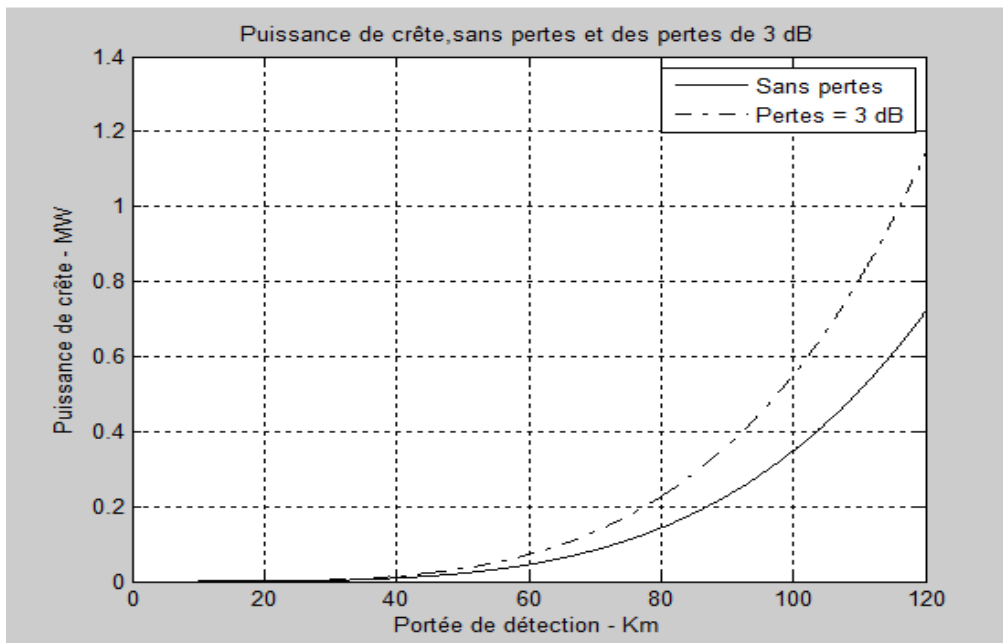


Figure III. 18 : Puissance de crête en fonction de portée Maximale, sans pertes et avec pertes de 3 dB.

Remarque 3 :

Les deux figures précédentes montrent le signal de la puissance pic en fonction de la distance au radar. On peut dire que ce signal s'accroît brièvement à une valeur maximale en s'éloignant du radar pour la détection.

III.8.2.4 Largeur d'impulsion

Nous avons modifié l'équation (2.20) du chapitre 2, pour calculer la largeur d'impulsion requise pour atteindre un certain SNR pour une plage de détection donnée :

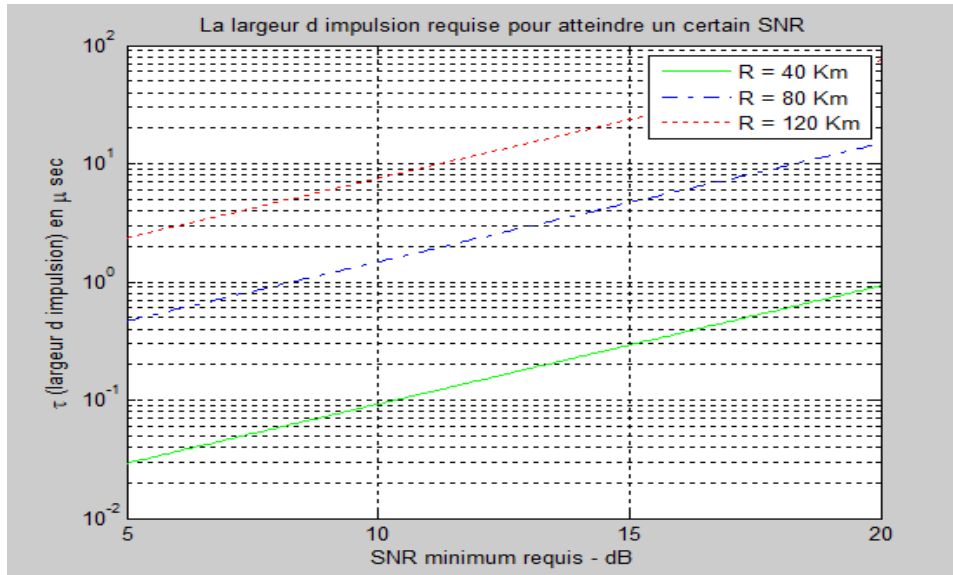


Figure III. 19 : Largeur d'impulsion par rapport au SNR requis pour trois valeurs de plage de détection différentes

III.8.3 Simulation scénario Radar

III.8.3.1 Détection des cibles

Radar simulation est une application qui a été réalisé sur Matlab à travers le GUI [17]. Cette application permet de simuler un radar de détection, avec une antenne qui effectue un balayage sur 360° azimut, et le balayage se fait sur un rayon de 120 Km, avec des anneaux distant de 15 Km chacun, nous avons délibérément choisi cette distance afin que cela concorde avec les équations radar que nous avons implémenté ci-haut où nous avons utilisé une plage de portée allant de 10 Km à 150 km.

III.8.3.2 Organigramme du déroulement de la simulation

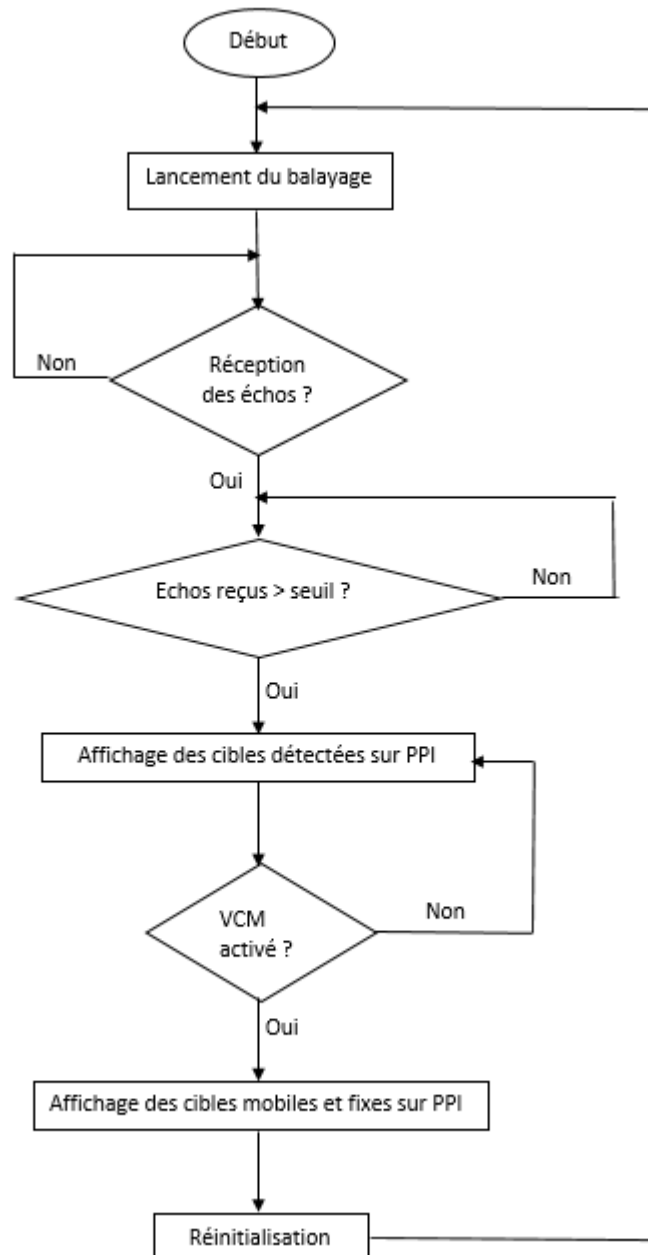


Figure III. 20 : Organigramme du déroulement de la simulation

L'organigramme précédent décrit les étapes du déroulement de la simulation. Après avoir ouvert l'application, on lance le balayage, s'il n'y a pas réception des échos on continue le balayage, dans le cas où on reçoit des échos on compare ces signaux reçus avec un seuil fixe, si ces signaux reçus (échos) sont inférieurs au seuil (pas de cible) on continue toujours le balayage, si les échos reçus dépassent le seuil on affiche alors les cibles détectées sur l'indicateur plan position PPI dans la plage de portées d'où ont été renvoyés les échos pour chaque cible. Après si on active le VCM (Visualiser les Cibles Mobiles) on affiche toutes les

cibles détectées en différenciant celles qui sont mobiles de celles qui sont fixes, sinon on reste sur l'affichage où toutes les cibles se ressemblent donc sans distinction particulière.

III.8.3.3 Lancement de la simulation

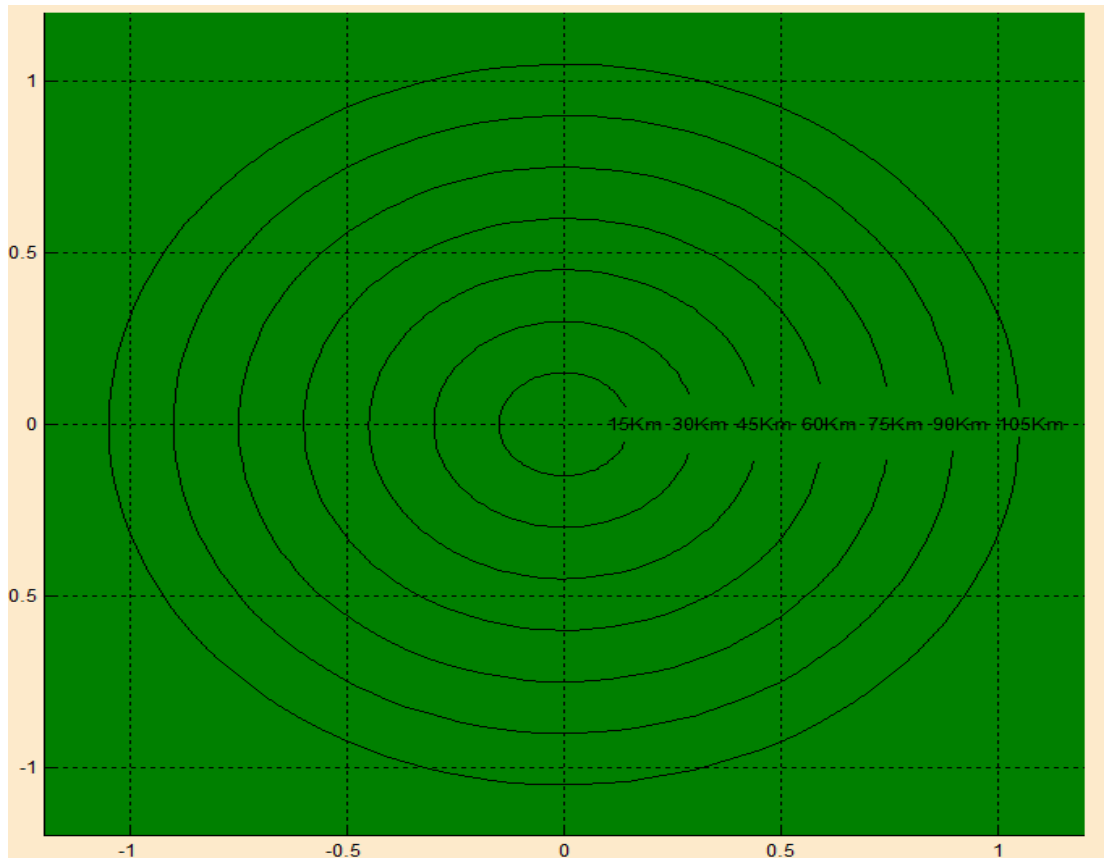


Figure III. 21 : Ouverture de l'application

Après le lancement l'application génère des cibles ainsi que des fouillis avec des positions et vitesses aléatoires, suivant le nombre de cibles et de fouillis qu'on désire afficher sur l'indicateur plan-position. On pourra aussi ajouter des objets fouillis manuellement sur l'indicateur si on le désire et contrôler les niveaux de bruits qu'on voudra pour les ajouter ensuite aux signaux retournés considérés comme reçus afin de fixer un seuil au de la duquel la détection est réalisée et les objets (cibles et fouillis) sans distinction sont affichés sur l'indicateur lors du lancement de l'application comme on peut le voir sur la figure III.22.

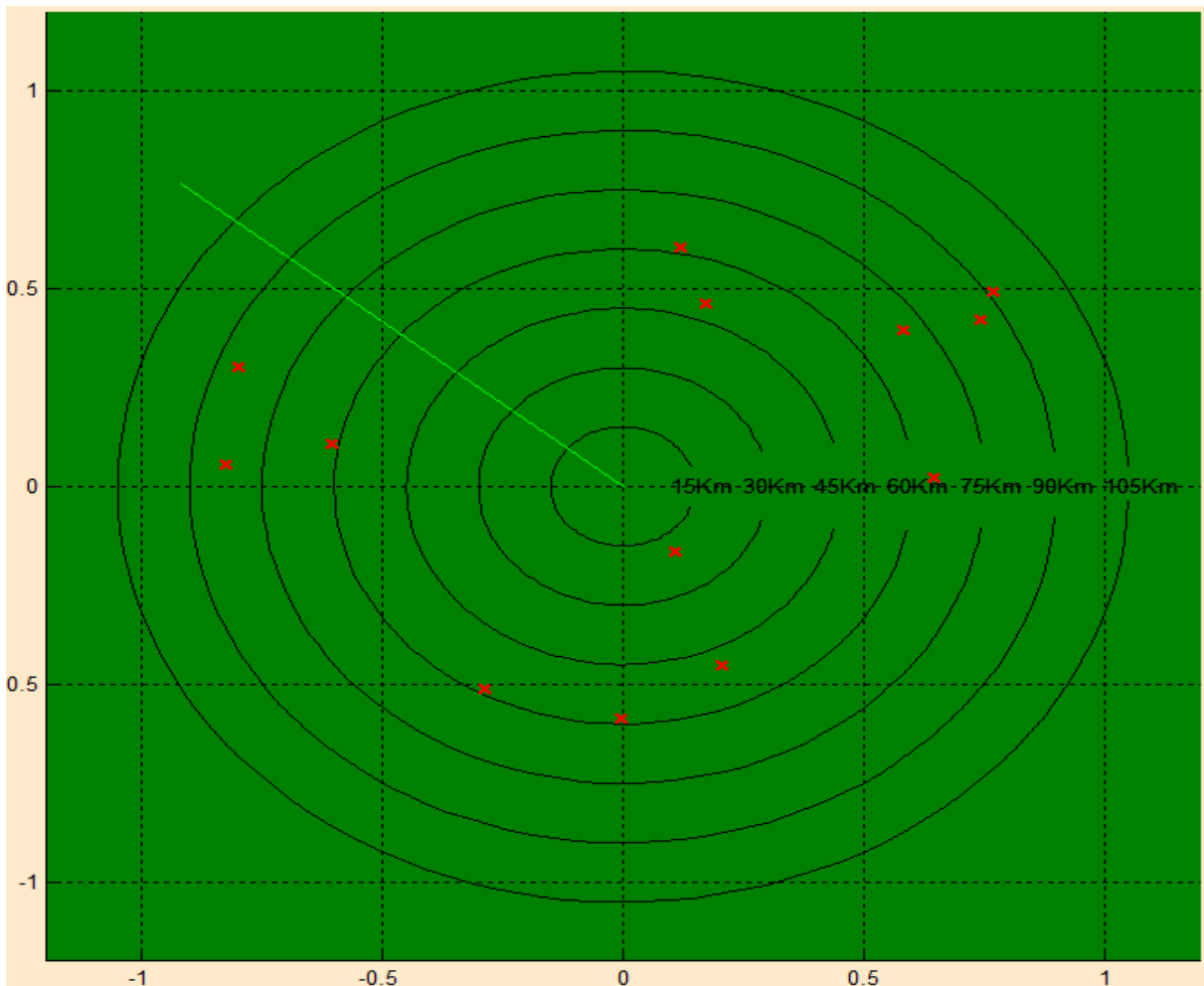


Figure III. 22 : Lancement de la simulation (Balayage et détection des cibles)

Au début de simulation le seuil absolu est fixe. Ainsi l'augmentation de ce seuil entrainera la disparition de certains objets. On pourra aussi, si on le désire, changer des paramètres comme la bande de fréquence, la fréquence d'échantillonnage, la vitesse de l'antenne pour un balayage rapide, le nombre d'impulsion dans le buffer, la période de répétition des impulsions (PRI).

Pour détecter un objet particulier sur l'indicateur, on attend à ce que le trait de balayage arrive au niveau de l'objet, puis on met la simulation en pause, puis on lance l'**analyse du buffer**, le balayage continue alors jusqu'à ce qu'il arrive au niveau de la cible puis affiche le contenu du buffer (Tampon) sous forme de graphe où on peut voir le signal reçu et ce même signal reçu par rapport au seuil de détection (Figure III.23 et Figure III.24).

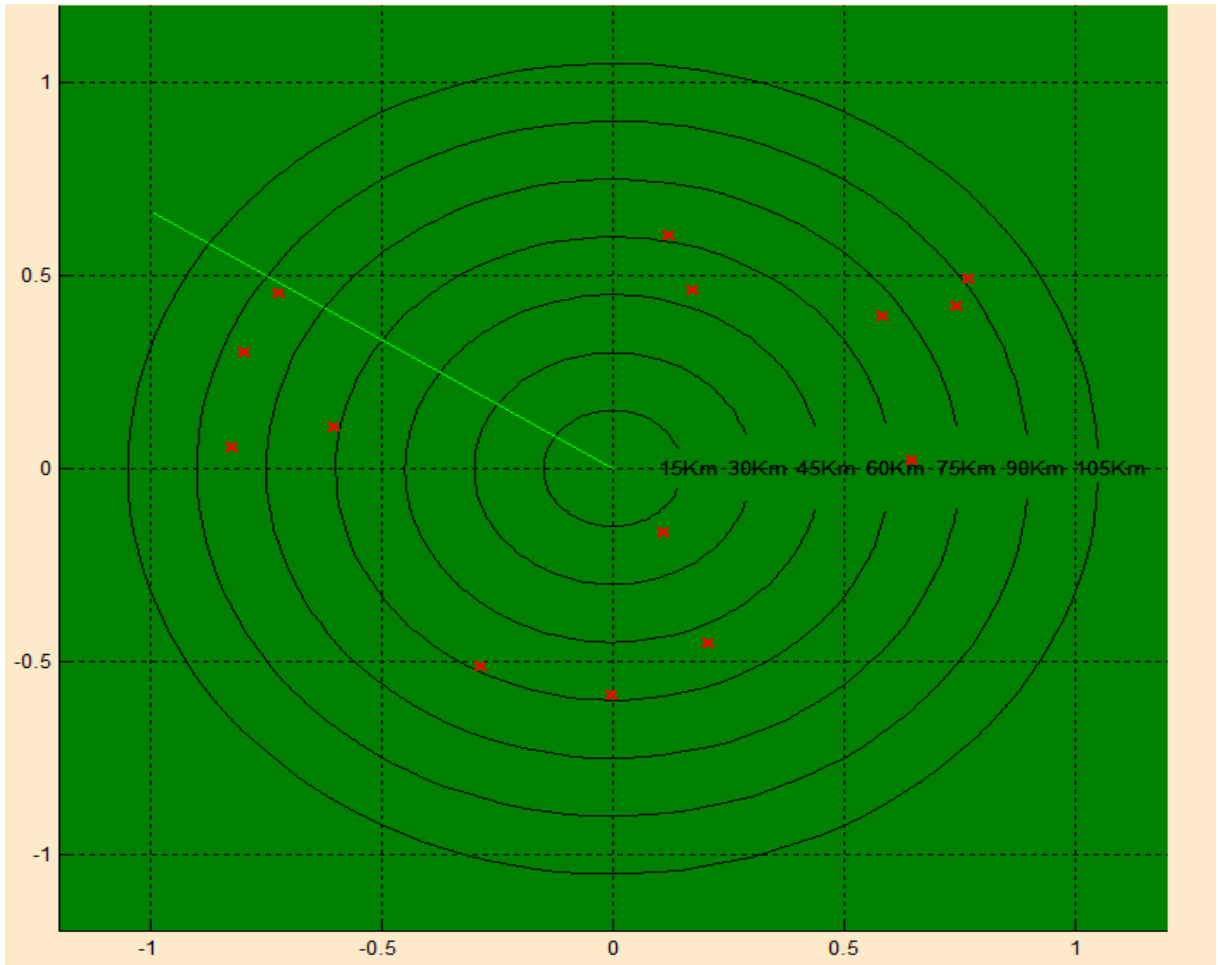


Figure III. 23 : Détection d'une cible particulière

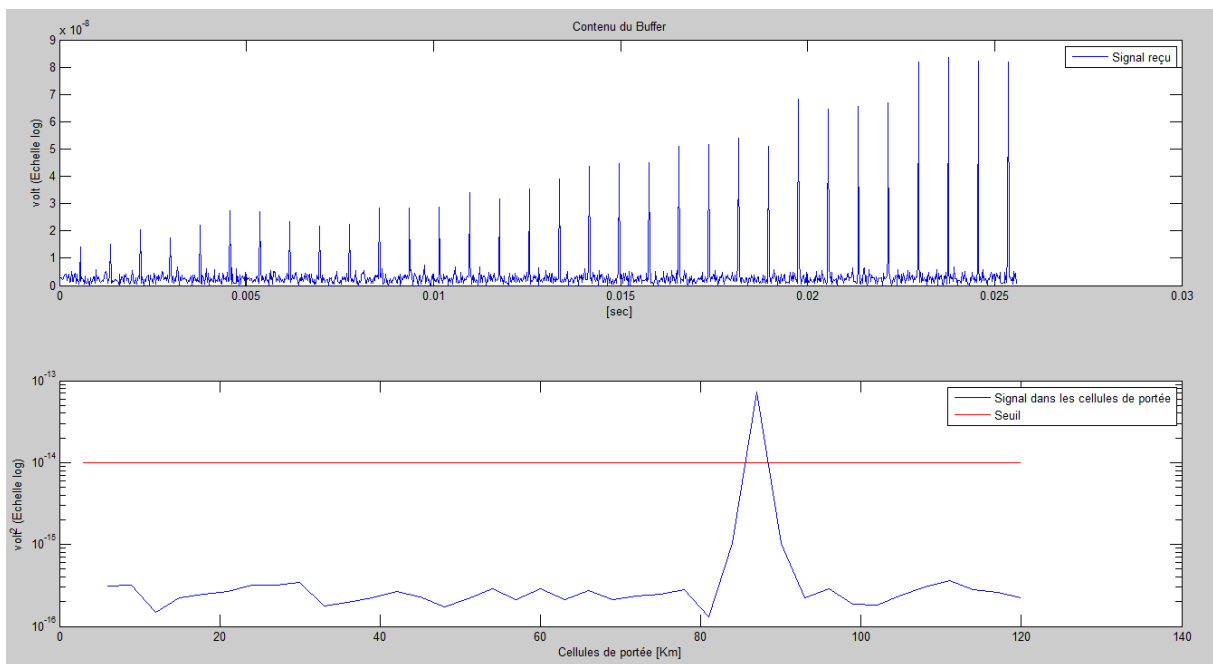


Figure III. 24 : Échos reçus de la cible détectée

Remarque : Sur les deux figures précédentes on peut voir que la cible qui a été détectée se trouve dans la plage de portée allant de 75 km à 90 km, comme l'indique le balayage et le pic du signal reçu.

III.8.3.4 Visualisation des cibles mobiles

La détection des objets ayant été faite, on passe alors à la seconde étape de la détection, à savoir la visualisation des objets mobiles.

En activant le **VCM** (Visualisation des cibles mobiles), on enclenche alors le calcul de la vitesse ainsi que la direction des objets mobiles à travers la transformée de fourrier appliquée au signal de retour.

Le procédé de VCM est basé sur la séparation de deux cibles par leurs fréquences doppler, permettent de distinguer une cible mobile dans un milieu d'échos fixes, même si la cible mobile est de surface équivalente plus faible que les échos fixes qui lui sont superposés.

On peut voir sur l'indicateur plan-position, à la Figure III.25 les triangles noirs représentant les objets (Fouillis) qui sont fixes donc avec une fréquence doppler nulle, et les objets représentés par des croix rouges sont les cibles mobiles qui ont donc une fréquence doppler qui n'est pas nulle.

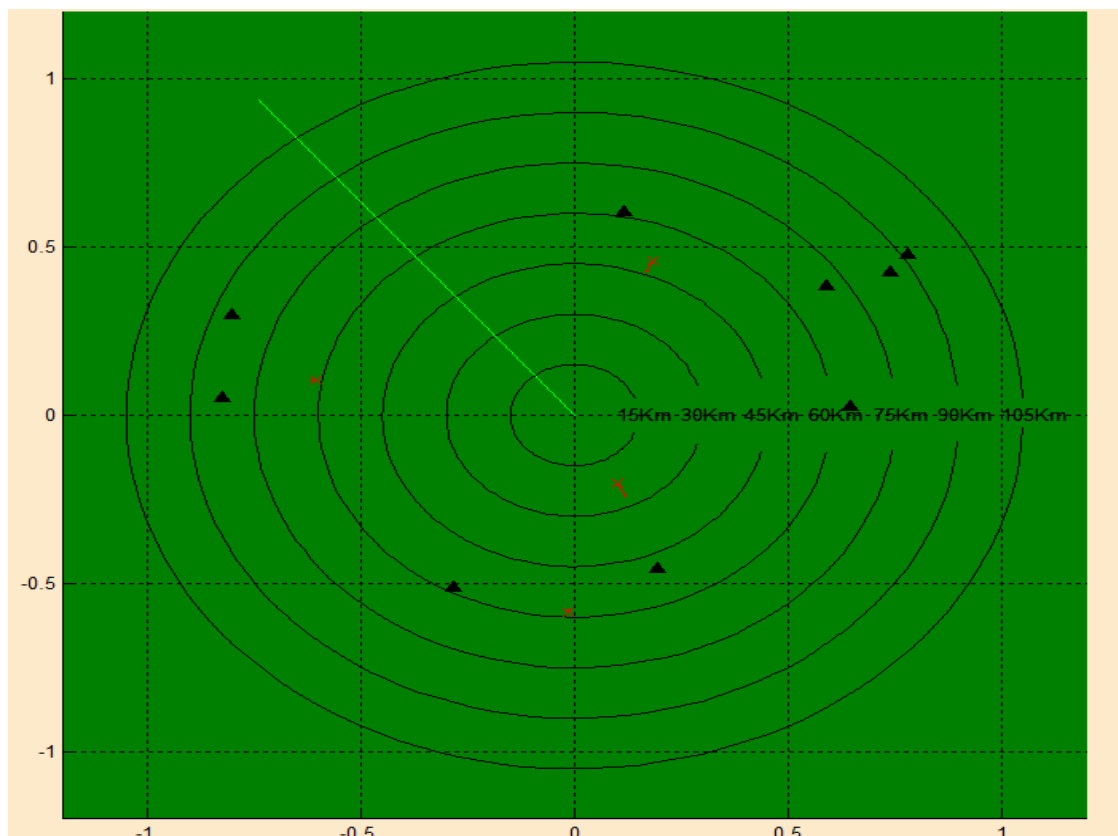


Figure III. 25 : Détection avec Visualisation des cibles mobiles

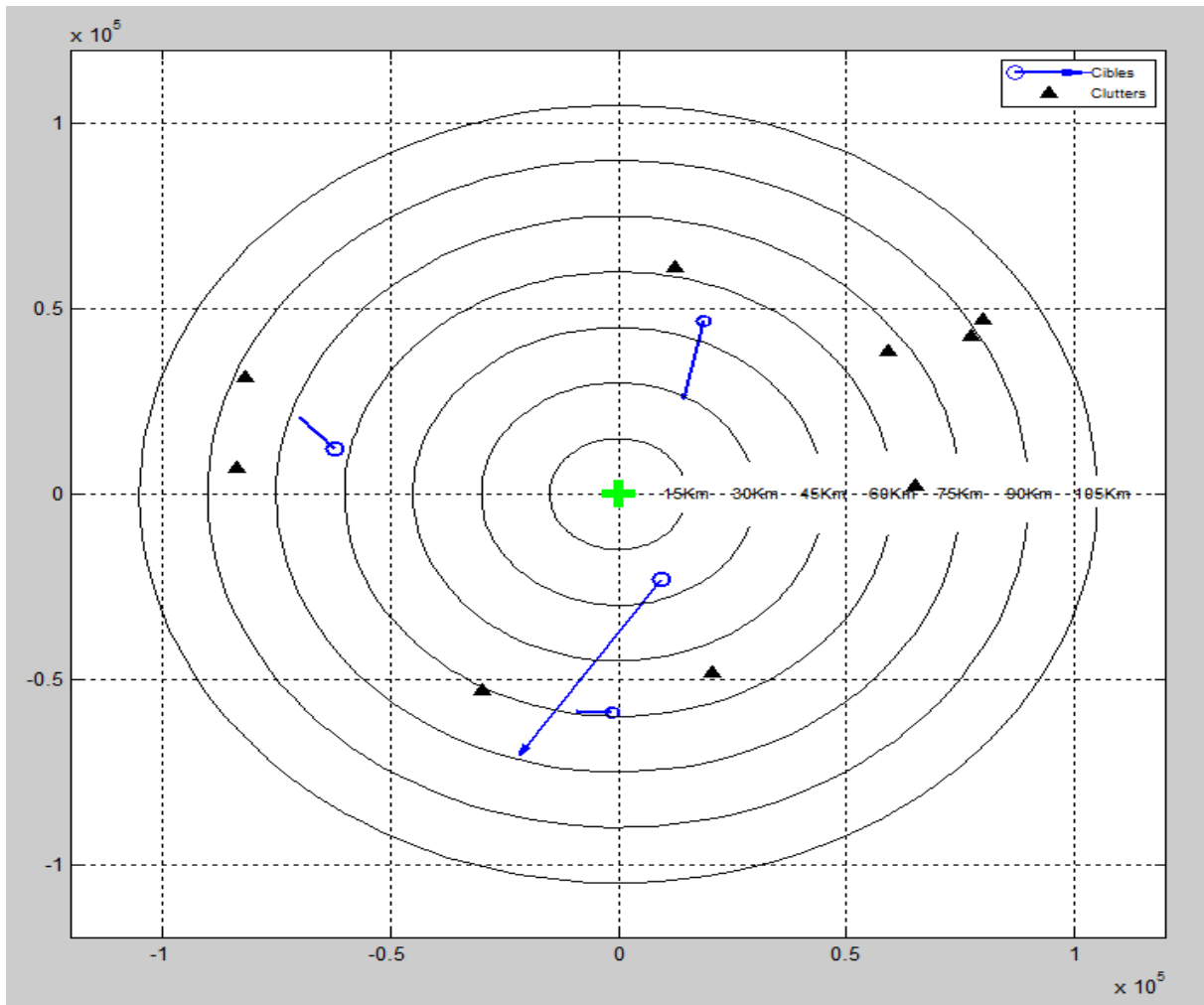


Figure III. 26 : Cibles et fouillis (Positions)

Remarque : Sur la Figure III.26 on peut voir les cibles mobiles en bleu et les flèches désignent leur direction, tandis que les triangles noirs sont immobiles.

III.9 Conclusion

La théorie sur la détection radar nous a permis de comprendre, dans un premier temps, sur quelle base il faut partir dans la formulation des hypothèses qui vont aboutir au calcul des probabilités de détection et de fausse alarme afin de fixer un seuil pour la détection en présence et/ou en absence d'une cible d'intérêt.

Mais d'abord la prise en compte du traitement (Filtrage) pour maximiser le rapport signal sur bruit, effectué sur le signal lors de la réception radar est un fait majeur qui intervient dans la fixation d'un seuil de détection.

La technique d'intégration d'impulsion, permet de faire la sommation des impulsions retournées qui sont captées par le récepteur pendant le balayage d'antenne, ce qui par la suite améliorera la probabilité de détection.

La détection des cibles fluctuantes devient autre, par rapport à la détection des cibles qui ont une surface effective réfléchissante constante. Pour cette première, les travaux de Swerling ont été incontournables afin de proposer des modèles, destinés à être appliqués pour des types de fluctuation, des types de réflecteurs de cibles, ainsi que des fonctions de densité de probabilité pour chaque modèle. Par la suite ces modèles servent à calculer la probabilité de détection et de fausse alarme pour le cas des cibles fluctuantes.

La simulation nous a permis, de pouvoir développer des fonctions Matlab pour pouvoir calculer le SNR, la portée et la puissance de crête en fonction des paramètres radar, ensuite nous sommes passés à la simulation du scénario de détection radar en temps réel pour voir comment se déroule la détection et aussi regarder le contenu du buffer pour une cible détectée, là nous avons eu les résultats escomptés parce que le signal reçu lors de la détection dépasse le seuil de détection cela rend la détection correcte.

En outre, nous avons aussi visualisé en temps réel, à travers la visualisation des cibles mobiles, l'opération qui suit la détection à savoir la distinction entre les objets qui s'affichent sur l'indicateur, pour visualiser ceux qui sont fixes et ceux qui sont mobiles.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le nom de radar reflète l'accent mis par les premiers expérimentateurs sur l'appareil pour détecter la présence d'une cible et mesurer sa portée. Il a d'abord été développé comme un dispositif de détection pour avertir l'approche d'aéronefs hostiles et pour diriger les armes antiaériennes.

Après la deuxième guerre mondiale, les applications du radar ont évolué, parce qu'au début, l'utilisation du radar relevait essentiellement du domaine militaire alors qu'aujourd'hui il est utilisé dans le domaine civil dont on peut citer entre autre la météorologie, le contrôle du trafic aérien, la surveillance du trafic routier ...etc.

Notre projet comporte un travail théorique accompagné d'une simulation, son objectif consiste en une étude et la simulation d'un radar de détection. Pour réaliser la simulation nous avons utilisé le logiciel Matlab, et ensuite l'interface GUI de Matlab pour simuler le scénario de détection.

Le travail théorique a été de mener une étude sur le radar qui part des généralités, aux équations radar, et pour aboutir à la discussion sur le traitement du signal reçu par le radar et la détection de la présence ou non d'une cible.

La simulation est axée sur deux parties, d'abord implémenter les équations radar pour faire une étude et tirer des conclusions sur les paramètres à prendre en compte lors de l'élaboration d'un radar pour atteindre certaines portées et la puissance de crête nécessaire à transmettre. Ensuite la simulation d'un radar qui effectue un balayage de 360° à la recherche des cibles qu'il affiche par la suite sur l'indicateur Plan-Position. Les cibles détectées représentées par des croix rouges, ensuite à travers la fonction VCM de l'application nous pouvons regarder les cibles mobiles à la différence des cibles fixes.

Nous pouvons donc dire que l'étude que nous avons menée a porté son fruit et que la simulation est réussie et a répondu à nos attentes.

Et pour finir, cette étude sur les équations radar pourrait faire l'objet de travaux supplémentaires, visant à aller vers d'autres applications du radar et permettre la contribution au développement de nouvelles techniques de radar pour la détection et la poursuite de cibles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Rajeev Bansal, *Handbook of Engineering Electromagnetics*, 2004, CRC Press, Edition 1, ISBN-13 9780824756284
- [2] Andy Harrison, *Introduction to Radar using Python and Matlab*, 2019, Artech House, ISBN-13 9781630815974
- [3] J.V Difrancio, W.L Rubin, *Radar detection*, 2004, SciTech Publishing
- [4] B.MAHAFZA, *Matlab simulations for radar systems design*, 2004, CRC Press/Chapman & Hall
- [5] Skolnik M.I, *Introduction to radar systems, 2000*, MGH, ISBN-10 007118189X, ISBN-13 978007118189X
- [6] Ms.S.MEGHELATI. *COURS RADAR*, Université de Blida, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département Aéronautique.
- [7] ISBN, Sommaire le radar, « *chapitre 1 : Description générale* », ISBN : 978-2-9544675-1-1, radars-darricau.fr/livre/I-Pages/Sommaire.html, 2021
- [8] RAJOELIMBOLOLONA Hasina Angelina, *Détection de cibles mobiles par un radar Doppler à impulsion*, Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de licence à visée professionnelle, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2015
- [9] J-Darricau, sommaire le radar, « *chapitre 17-1 : Approche physique des récepteurs linéaires Radars classique, pulse doppler, à corrélation* » <http://radars-darricau.fr/livre/2-PDF/chapitre-17-1.pdf>
- [10] Habibur Rahman, *fundamental principles of radar*, 2019, CRC Press, ISBN-13 9780429279478
- [11] Bassem R.Mahafza, Ph.D. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. United States of America : CHAPMAN & HILL/CRC, 2000. 1. Radar. 2. System analysis—Data processing. I. Title.. ISBN 1-58488-182-8.
- [12] Marcum, J. I., A Statistical Theory of Target Detection by Pulsed Radar, IRE Transactions on Information Theory. Vol IT-6, pp 59-267. April 1960.
- [13] Swerling, P., Probability of Detection for Fluctuating Targets, IRE Transactions on Information Theory. Vol IT-6, pp 269-308. April 1960.
- [14] DJEDOUÏ Nacéra & BOUKERN Dounya, « Étude et réalisation d'un RADAR de détection », mémoire de master 2 en télécommunications, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen. Algérie. 19/06/ 2017.
- [15] J-Darricau, sommaire le radar, « *chapitre 13 : visualisation des cibles mobiles* », radars-darricau.fr/livre/I-Pages/Sommaire.html 2021

- [16] Mark A.Richards, James A.Scheer, William A.Holm, *Principles of modern radar : basic principles*, 2010, SciTech Publishing
- [17] Yonathan Nativ , *Radar simulation*
<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13485-radar-simulation>
- [18] Wikipedia, « Radar secondaire »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_secondaire , 2021
- [19] C.Wolff, « Caractéristiques de l’antenne »
<https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Caract%C3%A9ristiques%20de%20l%E2%80%99antenne.fr.html> , 2021
- [20] Wikipedia, « Signal sur bruit »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Rapport_signal_sur_bruit, 2021
- [21] Wikipedia, « facteur de bruit »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_bruit, 2021
- [22] Jacques Darricau, « radars : Principes de bases », *Article TE6650 Technique de l’ingénieur*, 2013
- [23] Wikipedia, « radar primaire »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_primaire 2021
- [24] C.Wolff, « Classification des systèmes radars »
<https://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20des%20syst%C3%A8mes%20radars%20%281%29.fr.html> , 2021
- [25] Wikipedia, « Effet doppler »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Doppler , 2021