

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE A.MIRA-BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE



**MEMOIRE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologies**  
**Filière : Télécommunication**  
**Spécialité : Système des Télécommunications**

**Présenté par**

BOUSMAR Chahrazed  
HOCINI Massinissa

*Thème*

*Détection d'un Mobile par Radar*

**Soutenue le : 13 juin 2018**

**Devant le Jury :**

<b>Président</b>	<b>M.MEKHMOUKH.A</b>
<b>Examineur</b>	<b>Mme. ACHOUR.L</b>
<b>Encadreur</b>	<b>M. BERRA.H.S</b>
	<b>M. OUAMRI.M.A</b>

**Année Universitaire : 2017/2018**

# Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à Nos chers parents

À Nos frères et sœurs

À Nos amis

Et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

## *Table des matières*

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les radars .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Définition .....	3
I.3 Les Composants d'un radar .....	4
I.3.1 Le transmetteur (L'émetteur) .....	4
I.3.2 Le duplexeur .....	4
I.3.3 Antenne .....	5
I.3.4 Récepteur .....	5
I.3.5 Affichage radar .....	5
I.4 Classification des systèmes radars .....	5
I.4.1 D'un point de vue position.....	5
I.4.2 Selon la nature du signal .....	6
I.4.2.1 Radars primaires .....	6
a. Radars à impulsions.....	7
b. Radars à onde continue .....	7
b.1 Radars à onde continue non modulée.....	7
b.2 Radars à onde continue Modulée .....	7
I.4.2.2 Radars secondaires .....	7
I.5 Les applications radar .....	8
I.6 Principe de Fonctionnement .....	8
I.6.1 Calcul de la distance .....	8
I.6.2 Calcul de la direction .....	9
I.7 Effet Doppler .....	10
I.8 Equation du radar .....	11
I.9 Propagation des signaux radar .....	11
I.9.1 Réfraction .....	11

I.9.2	Diffraction.....	12
I.10	Les interférences dans les radars .....	13
I.11	Conclusion.....	14
	<b>Chapitre II : Détection Radar .....</b>	<b>15</b>
II.1	Introduction .....	15
II.2	Principe général de la détection .....	15
II.3	Détection avec bruit .....	17
II.3.1	Bruit thermique .....	17
II.3.2	Fouillis (clutter) .....	17
a.	Clutter de mer .....	17
b.	Clutter de terre .....	18
II.4	Les modèles statistiques des fouillis .....	18
II.4.1	Le modèle Gaussien (Normal).....	19
II.4.1	Le modèle Weibull .....	20
II.4.2	Le modèle log-normal .....	20
II.4.3	Le modèle K .....	20
II.4.4	Le modèle Gamma.....	21
II.4.5	Le modèle Pareto .....	21
II.4.6	Le modèle Rayleigh .....	21
II.5	Les critères de décision .....	22
II.5.1	Critère de Bayes .....	22
II.5.2	Critère de Neyman-Pearson .....	23
II.6	La surface équivalente radar.....	23
II.7	Les modèles de fluctuations .....	24
II.7.1	Les modèles Swerling .....	25
II.7.1.1	Swerling I .....	25
II.7.1.2	Swerling II .....	26
II.7.1.3	Swerling III.....	27

II.7.1.4 Swerling IV .....	27
II.7.1.5 Swerling V .....	28
II.8 Conclusion .....	28
<b>Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR .....</b>	<b>29</b>
III.1 Introduction .....	29
III.2 La probabilité de fausse alarme (Pfa).....	29
III.3 Le taux de fausses alarmes (FAR).....	29
III.4 Taux constant de fausses alarmes (CFAR).....	30
III.5 Concepts de base des détecteurs CFAR .....	31
III.6 Les différents types de détecteur CFAR.....	32
III.6.1 Détecteur CA-CFAR (Cell Averaging CFAR) .....	32
III.6.2 Détecteur GO-CFAR (Greatest Of) .....	33
III.6.3 Détecteur SO-CFAR (Smallest Of) .....	34
III.7 Analyse des performances d'un détecteur optimal .....	35
III.8 Analyse des détecteurs CFAR.....	35
III.8.1 Analyse de détecteur CA-CFAR .....	35
III.8.2 Analyse de détecteur GO-CFAR.....	36
III.8.3 Analyse de détecteur SO-CFAR .....	36
III.9 Conclusion .....	37
<b>Chapitre IV : Analyse et Interprétation des résultats des détecteurs CFAR .....</b>	<b>38</b>
IV.1 Introduction .....	38
IV.2 Simulation des cibles fluctuantes et non fluctuantes .....	38
IV.3 Simulation des différents Radar CFAR.....	42
IV.3.1 Interprétation des résultats du détecteur CA-CFAR .....	42
IV.3.2 Interprétation des résultats du détecteur GO-CFAR.....	45
IV.3.3 Interprétation des résultats du détecteur SO-CFAR .....	48
IV.4 Comparaison des détecteurs CFAR.....	52
IV.5 Conclusion .....	54

<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>55</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>56</b>

## Remerciements

Tout d'abord nous Tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu tout puissant pour nous avoir donné la force et le courage afin de mettre ce travail à terme.

Nos remerciements les plus vifs vont en premier lieu à notre Co-encadreur, Monsieur OUAMRI M. Amine, Docteur à l'université de Bejaïa, d'avoir accepté de nous guider tout le long de ce mémoire et d'avoir été présent dans la réalisation de ce modeste travail.

Nous remercions aussi notre encadreur principal, Monsieur BERRAH Smail, Professeur à l'université de Bejaïa, d'avoir accepté de nous prendre en charge.

Nous remercions également le président et les membres du jury pour nous avoir fait honneur de juger notre travail.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

## *Liste des Tableaux*

Tableau II.1 : Probabilité d'erreur et critères de décision .....	16
Tableau II.2 : Exemple d'environnement Gaussien et non Gaussien.....	19
Tableau II.3 : Modèles de cibles .....	25

## Liste des Figures

Figure I.1 : Les composants d'un radar .....	4
Figure I.2 : Classification des systèmes radars .....	6
Figure I.3 : Les applications radars .....	8
Figure I.4: principe du radar.....	9
Figure I.5 : calcul de la direction (azimut) .....	10
Figure I.6 : schéma de réfraction d'une onde électromagnétique .....	12
Figure I.7 : diffraction des ondes électromagnétiques .....	13
Figure I.8 : Détection d'une cible.....	13
Figure II.1 : Principe de détection.....	16
Figure II.2 : modèle surface équivalente radar d'un bombardier B-26 .....	24
Figure II.3 : Modèle de fluctuation Swerling I.....	26
Figure II.4 : modèle de fluctuation Swerling II.....	26
Figure II.5: Modèle de fluctuation Swerling III.....	27
Figure II.6 : modèle de fluctuation Swerling IV .....	27
Figure III.1 : variation du seuil de détection modifiant le taux de fausses alarmes .....	30
Figure III.2 : diagramme du circuit électronique pour obtenir de la moyenne par cellule.....	31
Figure III.3 : Schéma fonctionnel de détecteur CFAR.....	32
Figure III.4: Le détecteur CA-CFAR .....	33
Figure III.5 : Le détecteur GO-CFAR.....	34
Figure III.6 : Le détecteur SO-CFAR.....	34
Figure IV.1 : Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling II avec $pfa = 10^{-10}$ .....	39
Figure IV.2 : Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling II avec $pfa = 10^{-8}$ .....	39
Figure IV.3 : Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling IV avec $pfa = 10^{-9}$ .....	40
Figure IV.4 : Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling V avec $pfa = 10^{-12}$ avec $n_p = 1$ et 10. ....	41

Figure IV.5 : Comparaison des probabilités de détection entre Swerling V et Swerling I .....	<b>42</b>
Figure IV.6 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour différentes valeur de $N$ et $pfa = 10^{-6}$ .....	<b>43</b>
Figure IV.7 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour différentes valeur de $N$ et $pfa = 10^{-8}$ .....	<b>43</b>
Figure IV.8 : Spectre du signal reçu au niveau du radar .....	<b>44</b>
Figure IV.9 : Seuil de détection pour une valeur $Pfa = 10^{-2}$ .....	<b>45</b>
Figure IV.10: Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 12$ et $Pfa = 10^{-6}$ .....	<b>45</b>
Figure IV.11 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 24$ et $Pfa = 10^{-6}$ ....	<b>46</b>
Figure IV.12 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 36$ et $Pfa = 10^{-6}$ ....	<b>46</b>
Figure IV.13 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 12$ et $Pfa = 10^{-8}$ ....	<b>47</b>
Figure IV.14 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 24$ et $Pfa = 10^{-8}$ ....	<b>47</b>
Figure IV.15 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 36$ et $Pfa = 10^{-8}$ ....	<b>48</b>
Figure IV.16 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 12$ et $Pfa = 10^{-6}$ ....	<b>49</b>
Figure IV.17: Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 24$ et $Pfa = 10^{-6}$ .....	<b>49</b>
Figure IV.18 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 36$ et $Pfa = 10^{-6}$ ....	<b>50</b>
Figure IV.19 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 12$ et $Pfa = 10^{-8}$ ....	<b>50</b>
Figure IV.20 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 24$ et $Pfa = 10^{-8}$ ....	<b>51</b>
Figure IV.21 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour $N = 36$ et $Pfa = 10^{-8}$ ....	<b>51</b>
Figure IV.22: Comparaison CA, GO, SO-CFAR pour $N=40$ .....	<b>52</b>
Figure IV.23: Comparaison CA, GO, SO-CFAR pour $N=60$ .....	<b>53</b>
Figure IV.24 : Comparaison des seuils des différents détecteur CFAR .....	<b>53</b>



## *Notations*

<b>RADAR</b>	Radio Detection and Ranging
<b>CW</b>	radar à onde continue
<b>MIMO</b>	Multi Input Multi Output
<b>SISO</b>	Single Input Single Output
<b>SIMO</b>	single input Multi Output
<b>MISO</b>	Multi Input Single Output
<b>SER</b>	surface équivalente radar
<b>SNR</b>	Rapport signal sur bruit
<b>PDF</b>	Fonction de densité de probabilité
<b>CFAR</b>	Constant False Alarm Rate
<b>FAR</b>	Le taux de fausses alarmes
<b>FRI</b>	fréquence de répétition des impulsions
<b>CST</b>	Cellule sous test
<b>CA-CFAR</b>	Cell Averaging CFAR
<b>GO-CFAR</b>	Greatest Of
<b>SO-CFAR</b>	Smallest Of
<b>D</b>	la distance émetteur-cible
<b><math>\Delta T</math></b>	temps correspondant à un aller-retour de l'onde

<b>C</b>	célérité (vitesse de la lumière)
<b><math>F_d</math></b>	Fréquence Doppler
<b><math>V_r</math></b>	La vitesse radiale du réflecteur par rapport au radar
<b>P</b>	La puissance émise
<b><math>P_1</math></b>	Densité de puissance
<b>R</b>	Distance antenne-cible
<b><math>\beta_1</math></b>	angles rasants de l'onde incidente
<b><math>\beta_2</math></b>	angles rasants de l'onde réfractée
<b><math>n_1, n_2</math></b>	indice de réfraction du milieu
<b><math>H_0</math></b>	hypothèse non présence de cible
<b><math>H_1</math></b>	Hypothèse présence de cible
<b><math>P_n</math></b>	Probabilité de non détection
<b><math>P_{fa}</math></b>	Probabilité de fausse alarme
<b><math>P_d</math></b>	Probabilité de détection
<b><math>P_m</math></b>	Probabilité de perte de détection
<b><math>\mu</math></b>	la moyenne
<b><math>\sigma</math></b>	L'écart type
<b>b</b>	paramètre d'échelle
<b>c</b>	paramètre de forme
<b><math>\Gamma</math></b>	fonction gamma
<b><math>K_c</math></b>	La fonction de Bessel modifiée

$\mathbf{r}(t)$	signal reçu
$\mathbf{S}(t)$	signal cible
$\mathbf{n}(t)$	signal bruit
$\mathbf{P}(\mathbf{H}_0), \mathbf{P}(\mathbf{H}_1)$	Probabilités a priori cible absente et cible présente
$\mathbf{C}_{ij}$	les coûts de décisions
$\Lambda(\mathbf{q})$	Le rapport de vraisemblance
$\tilde{\lambda}$	Multiplicateur de Lagrange
$P_s$	La puissance réfléchiée par la cible
$P_i$	La puissance illuminée par le radar
$\sigma_{moy}$	La moyenne des valeurs de $\sigma$ de la cible
$\mathbf{TZ}$	un seuil adaptatif
$\mathbf{Y}$	Cellule sous test
$\mathbf{Z}$	puissance totale du clutter
$\mathbf{T}$	Facteur de Multiplicateur
$P_d^{opt}$	La probabilité de détection optimale
$\bar{s}$	La moyenne du signal à bruit total d'une cible

# *Introduction Générale*

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

L'origine du radar remonte à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. C'est le résultat de l'accumulation de nombreuses recherches auxquelles ont participé les scientifiques de plusieurs pays. C'est ainsi qu'en 1886, le technicien allemand « *Heinrich Rudolph Hertz* » démontra l'existence physique des ondes électromagnétiques et confirme donc la théorie de Maxwell. Vint ensuite le technicien allemand « *Christian Hulsmeyer* » spécialiste des ondes hertziennes qui inventa le « *telemobiloskop* », un appareil de prévention des collisions en mer, qui calcule la distance entre l'antenne et les navires en mesurant le trajet d'aller-retour de l'onde, c'est le premier test pratique du radar. Puis en 1921, « *Albert Wallace Hull* » inventa le magnétron, un oscillateur à haut rendement. En 1930, « *Lawrence A Hyland* » réalisa la première détection d'un aéronef et vers les années 1940, différents équipement radar ont été développés plus particulièrement aux USA, en Allemagne, en France, en Russie et au Japon [1].

A ce jour, le radar est l'une des inventions les plus importantes autant dans le domaine civil que militaire. Un radar est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour détecter, localiser et déterminer la vitesse d'une cible grâce notamment à l'effet Doppler. Les échos de retour ne sont pas seulement produits par la réflexion des ondes émises à partir de cibles réelles (avions, véhicules, bateaux... etc.) mais certains signaux sont des échos indésirables (ou clutter) tels que la mer, le sol, les montagnes, l'atmosphère, les nuages...etc. En général, le signal réfléchi par un objet est noyé dans le clutter et le bruit thermique et donc dans un environnement non stationnaire d'où la nécessité d'utiliser des méthodes adaptatives pour analyser et perfectionner la détection radar. L'objectif ici est de détecter une cible en présence du clutter et du bruit tout en maintenant un taux de fausse alarme constant, cette méthode est connue sous le nom de CFAR (Constant False Alarm Rate).

Contrairement à la détection classique à seuil fixe, le seuil adaptatif permet d'optimiser la probabilité de détection en maintenant un taux de fausse alarme constant. A cet effet, plusieurs détecteurs adaptatifs ont été proposés et analysés pour différents environnements (homogène et inhomogène) où chaque détecteur donne la meilleure performance possible pour chaque environnement donné. Le signal reçu est analysé et échantillonné, chaque échantillon est placé dans une cellule de résolution. La cellule sous-teste (CST ou CUT) se trouvant entre deux fenêtres de références qui constituent les cellules de références.

# Introduction Générale

---

Le principe de la détection automatique est effectué en comparant le contenu de la cellule sous test au seuil adaptatif qui maintient un taux de fausse alarme constant.

Dans ce mémoire, nous nous commençons par des généralités sur les systèmes radar tels que le principe de fonctionnement, ses principaux composants et les différents types de radars existants. Nous exposerons par la suite quelques notions de base sur les radars à savoir l'effet Doppler pour le calcul de la vitesse d'une cible mobile, l'équation radar qui nous donne la relation entre les caractéristiques de la puissance rayonnée, de la cible et le récepteur. Aussi nous expliquons le comportement des ondes électromagnétiques par les phénomènes de propagation.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéresserons à la détection radar où des critères déterminent les types d'environnement, nous citerons donc quelques modèles mathématiques pour la modélisation des statistiques du clutter à savoir les distributions Gamma, Weibull, Pareto, Rayleigh, Log-normale et K. Ensuite, nous donnons quelques exemples de modèles de fluctuations de cible comme les modèles de Swerling (I, II, III...) généralement les plus utilisés.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des performances des détecteurs CFAR : CA-CFAR (Cell Averaging CFAR), GO-CFAR (Greatest Of CFAR) et le SO-CFAR (Smallest Of CFAR) dans un environnement homogène de distribution Rayleigh.

Pour le chapitre VI, nous analysons la probabilité de détection des modèles swerling et proposons de traiter de problème de la détection dans un environnement homogène, à l'aide des programmes MATLAB, avec la présence de clutter de mer pour les trois types de détecteurs CFAR : CA, GO et SO-CFAR, aussi nous proposons d'établir quelques comparaisons des différents détecteurs.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les radars*

# Chapitre I : Généralités sur les radars

---

## I.1 Introduction

Un radar émet de puissantes ondes, produites par un oscillateur radio et transmises par une antenne. En analysant le signal reçu, on pourra donc localiser et identifier l'objet responsable de la réflexion et calculer ainsi sa vitesse de déplacement grâce à l'effet Doppler. Le radar peut détecter des objets ayant une large gamme de propriétés réfléchissantes, alors que les autres types de signaux, provenant de ces objets, tels que le son ou la lumière visible, seraient trop faibles pour être détectés.

Dans ce premier chapitre nous donnerons une description générale sur les systèmes radar, leurs principes et leurs différents composants de base. En suite, Nous évoquons les différents types de radars ainsi que leurs principes généraux et leurs critères de performances. En plus, nous aborderons le principe de fonctionnement tel que le calcul de la distance et la direction ainsi que le principe de l'effet doppler et la propagation des signaux radar.

Enfin, nous présenterons le problème des interférences dans les systèmes radars qui présente le facteur majeur d'influence de l'environnement sur la détection.

## I.2 Définition

Le radar est un appareil émettant et recevant des ondes électromagnétiques. Il est utilisé pour localiser des objets dans l'espace et déterminer leur distance, altitude, vitesse...etc. Le terme RADAR, acronyme de « Radio Detection And Ranging » que l'on peut traduire par « détection et estimation de la distance par onde radio », qui signifie la détection et la localisation à distance d'un objet (cible), a été adopté au cours de la Seconde Guerre mondiale par l'armée américaine [2]. Le radar est donc un instrument de mesure et de détection.

## I.3 Les Composants d'un radar

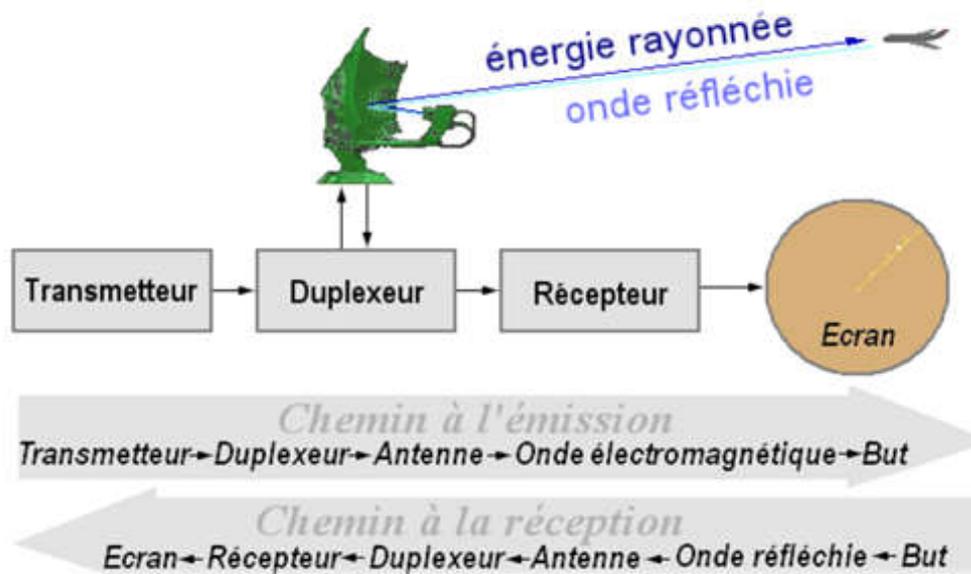


Figure I.1 : Les composants d'un radar [3]

### I.3.1 Le transmetteur (L'émetteur)

Est un appareil électronique qui génère une impulsion électromagnétique qui sera envoyée à l'antenne pour la diffusion. Il est composé d'un oscillateur permanent, d'un amplificateur et d'un modulateur.

### I.3.2 Le duplexeur

Un commutateur électronique permet l'utilisation d'une seule antenne pour émettre et recevoir, en transmettant le signal d'émission à l'antenne et le signal capté au récepteur [4]. Composé de trois ports, son isolation est un paramètre important pour protéger du signal d'émission la chaîne de réception calibrée pour traiter des signaux de faible amplitude.

Il est primordial qu'il soit bien synchronisé, puisque la puissance du signal émis est de l'ordre du mégawatt ce qui est trop important pour le récepteur qui, lui, traite des signaux de très faible puissance (quelques nano-watts). Au cas où l'impulsion émise serait dirigée vers le récepteur, celui-ci serait instantanément détruit.

# Chapitre I : Généralités sur les radars

---

## I.3.3 Antenne

Dont le rôle est de diffuser l'onde électromagnétique vers la cible avec le minimum de perte elle est rotative et permet de surveiller une zone à 360°. L'antenne radar est dessinée de façon à concentrer l'énergie des impulsions émises en un faisceau horizontal étroit (2 à 4°) Sur le plan vertical, le rayon de balayage se situe entre 20 et 40°, et son centre est dirigé vers l'horizon de façon à tenir compte du roulis et du tangage sans perdre les cibles de vue [5].

## I.3.4 Récepteur

Le récepteur est composé d'un limiteur placé en amont de la chaîne, dont le rôle est de protéger le reste de la chaîne de réception, des interférences captées dont le niveau de puissance peut être très élevé [4]. Il transforme le signal à haute fréquence du faisceau en un signal modulé de fréquence intermédiaire, l'amplifie et le transmet ensuite au système de traitement du circuit radar qui en retirera ensuite les cibles d'intérêt.

## I.3.5 Affichage radar

Plusieurs modes d'affichage sont utilisés pour visualiser le signal écho capté par l'antenne, que l'on appelle vidéo radar Le mode A-scan représente l'amplitude du signal capté en fonction du temps ou distance parcourue par l'onde. Le mode B-scan représente la distance en fonction du numéro de tirs, il permet d'afficher les échos captés sur un tour complet. Le mode PPI est un B-scan représenté en coordonnées polaires. La vidéo est affichée en fonction de la position angulaire de l'antenne, ce qui fait de lui le modèle le plus proche d'une image aérienne.

## I.4 Classification des systèmes radars

### I.4.1 D'un point de vue position

Le positionnement et le nombre d'antennes utilisées pour former un système radar permet de le classer selon une certaine nomenclature. En fonction du positionnement des antennes on peut distinguer deux types de configurations principales du radar : le radar **mono-statique** où l'émetteur et le récepteur partagent un système électronique et une antenne commune et le radar **bi-statique** où l'émetteur et le récepteur sont séparés [6].

# Chapitre I : Généralités sur les radars

---

En fonction du nombre d'antennes, on répertorie les radars [7] :

**SISO** : une seule antenne en émission et en réception

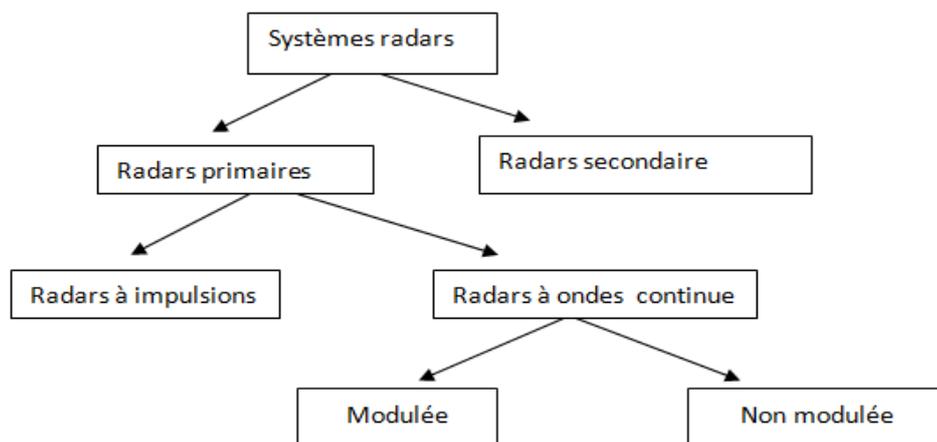
**SIMO** : une seule antenne en émission et plusieurs en réception

**MISO** : plusieurs antennes en émission et une seule réception

**MIMO** : plusieurs antennes en émission et en réception

## I.4.2 Selon la nature du signal

Classification des radars Selon la nature du signal émis et le fonctionnement accompli, ainsi que de leurs principes.



**Figure I.2** : Classification des systèmes radars

### I.4.2.1 Radars primaires

Un radar primaire émet des impulsions hyperfréquences à l'aide d'une antenne, les impulsions sont partiellement réfléchies par le mobile et reviennent à l'antenne, mesurant le temps entre l'émission et le retour des impulsions. Cette durée et la direction de l'impulsion permettant de mesurer la position du mobile, avec déterminations de la position en deux dimensions (2D) (distance et azimut) ou en trois dimensions (3D) (distance, azimut, altitude).

# Chapitre I : Généralités sur les radars

---

## a. Radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance, puis il attend l'écho du signal transmis pendant un certain temps avant qu'elle ne transmette une nouvelle impulsion [5].

La localisation d'un mobile dans l'espace par les impulsions radars dépend de deux facteurs, la distance et la direction, incluant l'azimut de la cible. L'une des caractéristiques importantes des radars à impulsions est la fréquence de répétition d'impulsions « Pulse Repetition Frequency », qui doit être choisie aussi bien pour éviter les ambiguïtés Doppler et distance que pour augmenter la puissance moyenne de transmission [8].

## b. Radars à onde continue

Un radar à onde continue (CW) ou à **ondes entretenues** est un type de radar caractérisé par l'émission d'ondes en continu, modulées en fréquence ou non.

### ➤ Radars à onde continue non modulée

Ce type de radar Spécialisés dans la mesure des vitesses, ne permettent pas de mesurer les distances Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse sur les routes.

### ➤ Radars à onde continue Modulée

L'inconvénient des radars à onde continue modulée est leur incapacité à mesurer des distances, La variation de la fréquence émise apporte une solution à ce problème. Lorsqu'un écho est reçu par le radar, la fréquence du signal réfléchi par la cible peut être mesurée. En se référant à l' instant où la même valeur de fréquence a été émise, il devient possible de mesurer le temps entre l'émission et la réception de cette fréquence. Ce type radar est utilisé comme radio altimètre. Est utilisé pour mesurer la hauteur exacte d'un avion durant la phase d'atterrissage.

## I.4.2.2 Radars secondaires

Le radar secondaire transmet des impulsions hyperfréquences. Celles –ci n'ont pas pour but d'être réfléchies, la cible étant équipée d'un transpondeur permet de fournir des informations concernant l'altitude et le code d'identification [9]. Ensuite le transpondeur met

# Chapitre I : Généralités sur les radars

en forme et émet un message de réponse qui peut être reçu et décodé par notre radar secondaire.

## I.5 Les applications radar

Les applications du radar sont la surveillance et le contrôle dans un contexte civil ou militaire. On utilise le radar pour le contrôle aérien, maritime et routier. Le radar est également utilisé en météorologie et astronautique pour l'observation de la Terre et de sa biomasse. Le tableau figure (I.3) recense en grande partie les applications radar actuelles [7].

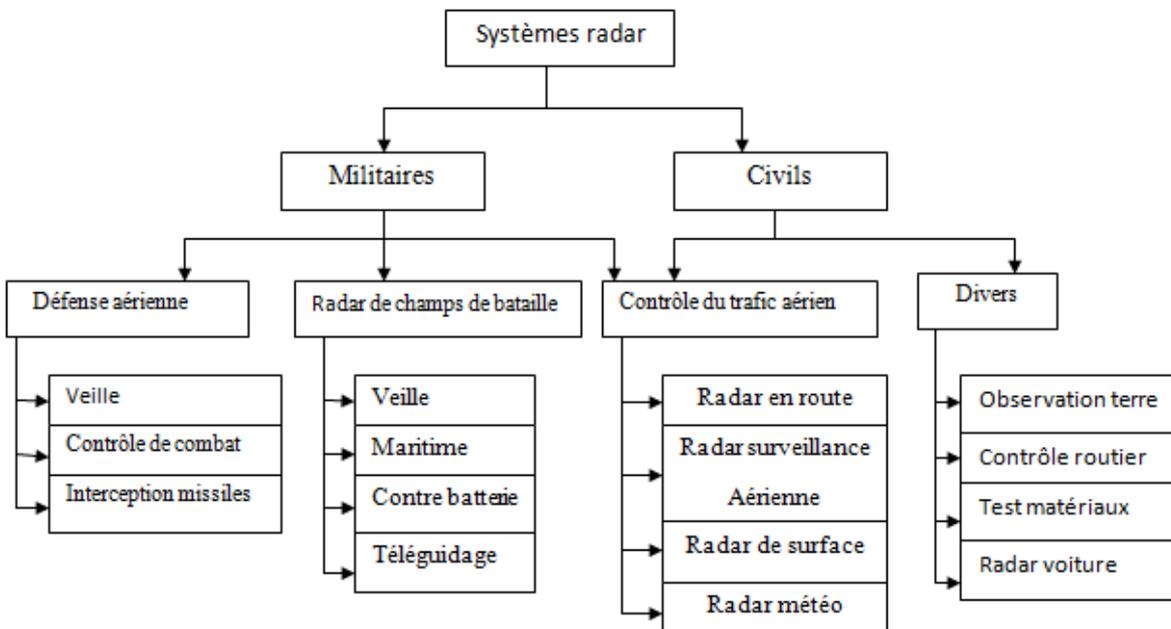


Figure I.3 : Les applications radars

## I.6 Principe de Fonctionnement

### I.6.1 Calcul de la distance

Le calcul de la distance séparant le radar d'un objet se fait d'une manière à émettre une courte impulsion de signal radio et de mesurer le temps d'aller-retour de l'onde émise. La distance donc est la moitié du temps de retour de l'onde multipliée par la vitesse du signal (qui est proche de la vitesse de la lumière dans le vide si le milieu traversé est l'atmosphère)[3].

$$D = \frac{c \cdot \Delta T}{2} \quad (I.1)$$

$\Delta T$  : temps correspondant à un aller-retour de l'onde

# Chapitre I : Généralités sur les radars

---

**D** : la distance émetteur-cible (m)

**C** : célérité ( $3 \cdot 10^8$  m/s)



**Figure I.4:** principe du radar

Le signal reçu aura la même forme que le signal émis mais il sera très faible et toujours accompagné d'un bruit de fond provenant soit :

- du bruit atmosphérique.
- du bruit propre du récepteur.

## I.6.2 Calcul de la direction

La mesure de la position d'une cible est basée sur un calcul d'angle entre la direction du nord et celle de la cible (azimut). La directivité (gain directif) est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction particulière. Une antenne à forte directivité est appelée "antenne directive". En déterminant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer l'azimut et 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).

L'azimut d'une cible détectée par un radar est l'angle entre la direction du nord et celle de la ligne directe antenne cible. Cet angle se mesure dans le plan horizontal, dans le sens des aiguilles d'une montre, et à partir du nord. Les radars émettent normalement de très hautes fréquences pour les raisons suivantes:

- propagation quasi rectiligne de ces ondes.

# Chapitre I : Généralités sur les radars

- Haute résolution (plus la longueur d'onde est courte, plus le radar est capable de détecter un petit objet).
- Encombrement réduit de l'antenne (plus on augmente la fréquence du signal rayonné, plus la directivité est grande pour une antenne de taille donnée).

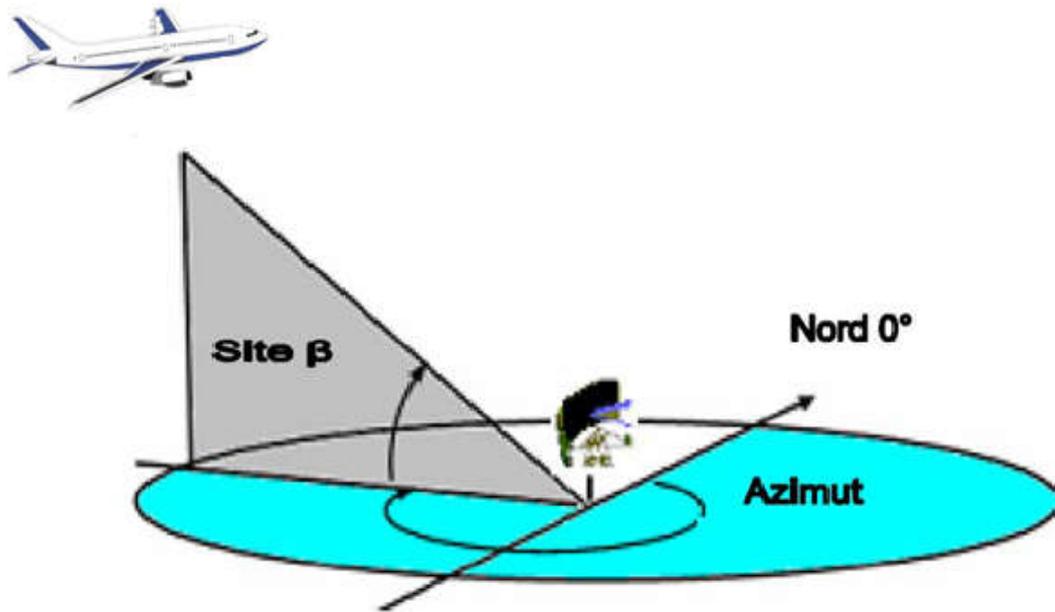


Figure I.5 : calcul de la direction (azimut)

## I.7 Effet Doppler

Le mouvement de la source ou du récepteur entraîne ce que l'on appelle l'effet doppler, cet effet est lié au changement de longueur du trajet de propagation au cours du temps [10].

Lorsque la cible est mobile, et que chaque réflecteur ait une fréquence Doppler.

Cette fréquence s'écrit :

$$F_d = F_e \frac{2V_r}{\lambda} \quad (I.2)$$

Tel que :  $V_r$  est la vitesse radiale du réflecteur par rapport au radar.

La fréquence Doppler est donc proportionnelle à la vitesse radiale qui peut donc être mesurée grâce à l'effet Doppler.

## I.8 Equation du radar

La relation fondamentale entre les caractéristiques de puissance rayonnée, la cible et le récepteur est donnée par l'équation du radar. Elle permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar [11]. Considérons un radar équipé d'un émetteur développant une puissance crête  $P$ , avec une antenne omnidirectionnelle qui présente un gain  $G$  et qui rayonne l'énergie selon une surface sphérique de rayon égale à la distance  $R$  (antenne-cible). La formule qui permet de calculer la densité de puissance dans la direction du gain maximum est la suivante :

$$P_1 = \frac{P}{4\pi R^2} \cdot G \quad (I.3)$$

Où :

$P$  : La puissance émise [w]

$P_1$  : Densité de puissance [w/m<sup>2</sup>]

$R$  : Distance antenne-cible [m]

Dans le cas où la cible se trouvant dans un point  $M$  situé dans la direction du gain maximal ( $G$ ) l'antenne est alors appelée « antenne directive ».

## I.9 Propagation des signaux radar

Les ondes électromagnétiques sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent une surface conductrice. Si après l'émission d'un signal on est capable de recevoir une partie de son énergie qui retourne vers la source, alors on a la preuve qu'un obstacle se trouve dans la direction de sa propagation [12]. Deux phénomènes se manifestent dans la propagation des signaux :

### I.9.1 Réfraction

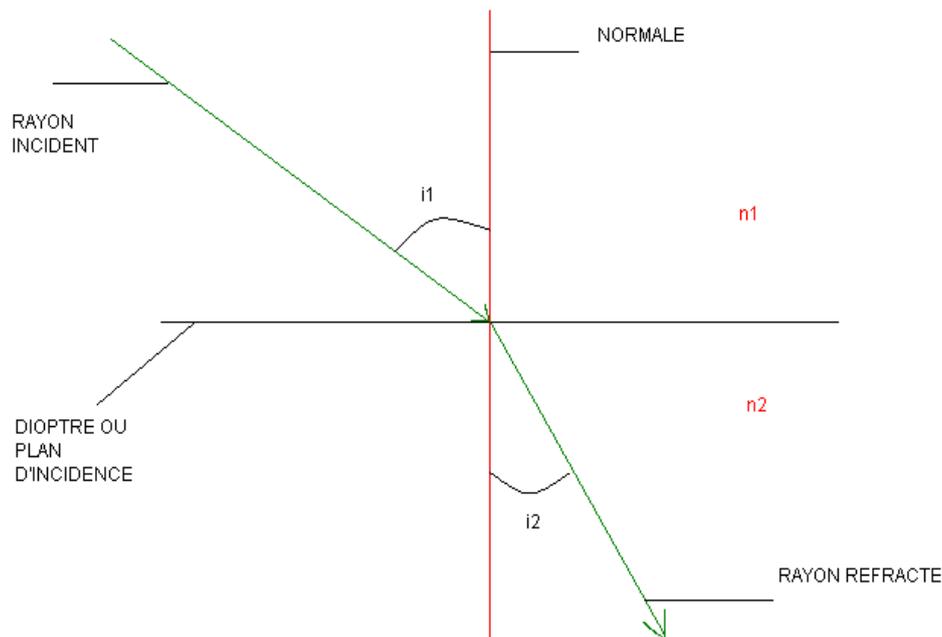
Dans un environnement en espace libre, où l'indice de réfraction est constant, les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite. Cependant, dans la troposphère, les ondes électromagnétiques se réfractent à la variation de l'indice de réfraction. Lorsque l'indice de réfraction change le long de la voie de propagation, ou lorsque l'onde pénètre dans un

# Chapitre I : Généralités sur les radars

milieu différent, l'onde se courbe vers la région ayant l'indice de réfraction le plus élevé. Le degré de réfraction peut être déterminé en utilisant la loi de Snell [12]:

$$n_1 \sin(\beta_1) = n_2 \sin(\beta_2) = cst \quad (I.4)$$

Où  $\beta_1$  et  $\beta_2$  sont respectivement les angles rasants de l'onde incidente et réfractée, et  $n_1$  et  $n_2$  sont l'indice de réfraction du milieu. L'indice de réfraction  $n$  est une propriété électrique du milieu de propagation et est définie comme le rapport entre vitesse de la lumière dans un vide, et la vitesse de l'onde à travers le milieu.



**Figure I.6 :** schéma de réfraction d'une onde électromagnétique

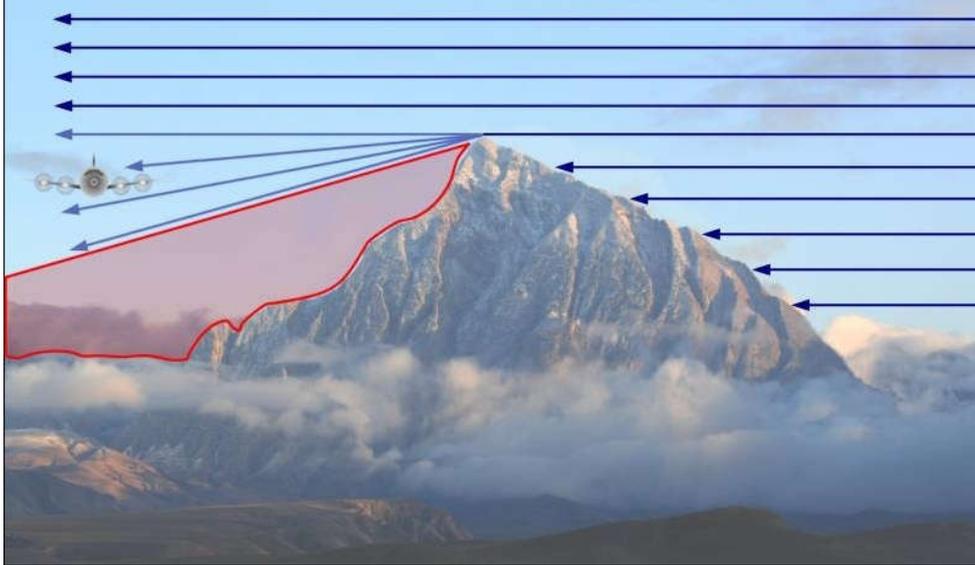
## I.9.2 Diffraction

Les ondes radio se propagent en ligne droite dans le vide mais lorsqu'elles rencontrent un obstacle non transparent, elles subiront une déviation. Ceci est le phénomène de « diffraction ». La déviation est plus importante près de l'obstacle et diminue avec la distance de celui-ci comme montré dans la figure (I.7). Ce phénomène permet à une partie de l'énergie des ondes d'être reçue dans une zone derrière l'obstacle qui normalement devrait être dans l'ombre. Par exemple, cela permet à un récepteur radio de recevoir un faible signal même s'il est derrière une montagne. La diffraction permet ainsi d'étendre la portée d'un signal radio

# Chapitre I : Généralités sur les radars

---

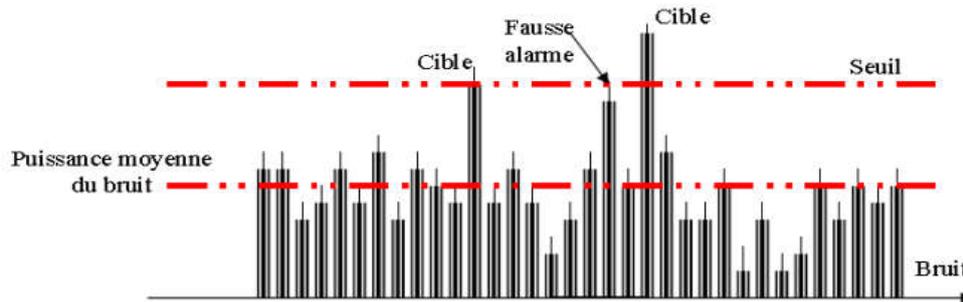
sous l'horizon visible. Dans certaines conditions, l'émission d'un signal radio puissant de très basse fréquence peut faire le tour de la terre grâce à la diffraction.



**Figure I.7 :** diffraction des ondes électromagnétiques

## **I.10 Les interférences dans les radars**

Ces cibles interférentes apparaissent comme des pics dans des cellules de portée et peuvent tomber dans l'une des deux fenêtres de références ou dans les deux en même temps. Le principe de base de la détection d'une cible est basé sur l'utilisation d'un seuil de comparaison servant à extraire des informations du signal reçu et à distinguer une fluctuation due au bruit à celle à un signal utile [13]. Si le signal dépasse le seuil, la cible est détectée, si le bruit dépasse le seuil en absence du signal écho, on dit que c'est une fausse alarme. La probabilité de fausse alarme est inversement proportionnelle au seuil de détection. Donc si le seuil est trop élevé, les cibles peuvent ne pas être détectées, et s'il est trop bas la probabilité de fausse alarme augmente comme il est indiqué sur la figure I.8 :



**Figure I.8 :** Détection d'une cible

## I.11 Conclusion

Ce premier chapitre nous donne un aperçu sur le radar d'une manière générale. Dans un premier temps nous avons donné une brève définition du radar et étudié son principe de fonctionnement par rapport à la cible, tel que la distance, la direction ainsi que l'effet Doppler dans le cas des cibles mobiles. Nous avons vu par la suite le comportement des ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'air par des phénomènes dits de réfraction et de diffraction. Enfin, nous décrivons les différents types d'échos parasites ou fouillis (clutter) pouvant toucher à la qualité de la détection.

## *Chapitre II*

### *Détection radar*

## II.1 Introduction

Dans la détection radar, les ondes électromagnétiques sont reçues par le radar afin de les analyser par le récepteur. Le signal reçu est souvent constitué d'échos parasites qui perturbent la détection. L'objectif principal dans la détection radar est de concevoir une structure optimale du récepteur selon quelques critères qui sont déterminés par le type d'environnement, d'où l'analyse des performances de détection radar pour des milieux homogènes. Ainsi, des modèles mathématiques sont proposés pour modéliser les statistiques du fouillis tels que les distributions Gamma, Weibull, Log-normale, Pareto, Rayleigh, et la distribution K.

## II.2 Principe général de la détection

Une des fonctions principales d'un système radar est de détecter la présence d'une cible d'intérêt noyée dans un bruit ambiant, composé de bruit thermique et du fouillis [14]. La détection radar s'inscrit dans le cadre de la théorie statistique de décision. Cette décision se fait entre deux hypothèses, l'hypothèse  $H_0$  de non présence de cible dans laquelle le signal est composé uniquement du bruit, et l'hypothèse  $H_1$  pour laquelle la cible est présente dans les données. Ces conditions sont inconnues au moment de la détection à cause des interférences. Les probabilités d'erreur sont de deux types ; type I (type  $\alpha$ ) et type II (type  $\beta$ ) comme présenté sur le tableau II.1 [8]. L'erreur de type I qui est similaire a la probabilité de fausse alarme ( $P_{fa}$ ) s'exprimer de la forme :

$$\begin{aligned}\alpha &= P(d = d_1 / y = y_0) \\ &= P(d_1 / H_0)\end{aligned}\tag{II.1}$$

Telle que :  $H_0$  présente l'absence de cible.

L'erreur de type II qui est similaire a la probabilité de perte de détection, s'exprime par :

$$\begin{aligned}\beta &= P(d = d_0 / y = y_1) \\ &= P(d_0 / H_1)\end{aligned}\tag{II.2}$$

Telle que :  $H_1$  présente la présence de cible.

## Chapitre II : Détection Radar

---

Nous avons alors :

$$P(d_0/H_0) + P(d_1/H_0) = 1; \text{ Ce qui signifie : } P_n + P_{fa} = 1$$

$$P(d_1/H_1) + P(d_0/H_1) = 1; \text{ Ce qui signifie : } P_d + P_m = 1$$

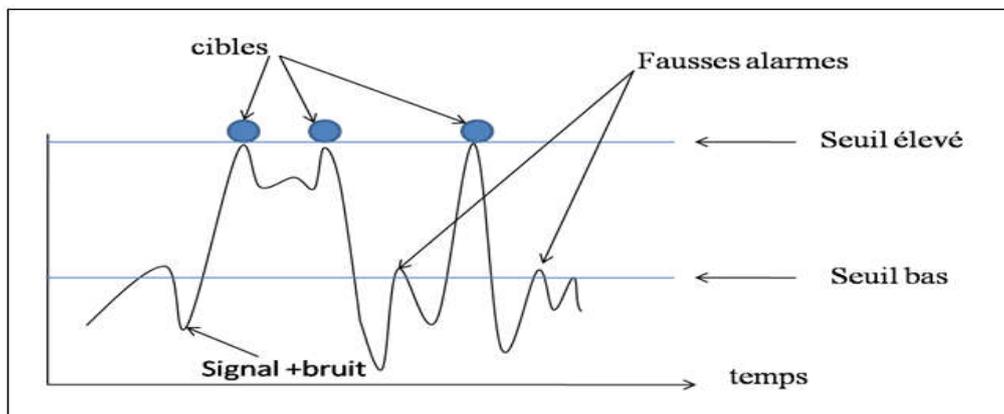
$P_n$  : Probabilité de non détection     $P_{fa}$ : probabilité de fausse alarme.

$P_d$  : Probabilité de détection         $P_m$  : probabilité de perte de détection.

Décision	Hypothèses vraies H	
	H <sub>0</sub> (absence)	H <sub>1</sub> (présence)
d <sub>0</sub>	Décision correcte $1 - P_{fa}$	Décision incorrecte $1 - P_d$
d <sub>1</sub>	Décision incorrecte $P_{fa}$	Décision correcte $P_d$

**Tableau II.1** : probabilité d'erreur et critères de décision.

La décision sur la présence de cible est basée sur l'analyse du signal retourné au récepteur pour déterminer si c'est le signal plus les interférences ou seulement les interférences qui sont présentes. Ceci est fait par comparaison de l'amplitude du signal reçu, avec un niveau de seuil et la décision est basée sur le critère de décision choisi. Si le seuil choisi est trop haut, les cibles ne seront pas détectées, s'il est trop bas, un pic de bruit peut donner lieu à une fausse alarme.



**Figure II.1** : Principe de détection

## Chapitre II : Détection Radar

---

Etant donné que l'interférence est généralement une fonction aléatoire du temps, le processus de détection radar est une procédure statistique utilisant les approches mathématiques de la théorie des probabilités. La théorie la plus utilisée est développée pour la détection des signaux faibles dans un fond de bruit blanc avec une distribution gaussienne.

### II.3 Détection avec bruit

Le signal radar reçu est loin d'être pur. Il est souvent entaché de bruit et d'échos parasites. Ces signaux peuvent avoir des origines internes (bruit thermique) et externes (fouillis (clutter)), En général, la puissance du clutter est beaucoup plus élevée que celle du bruit thermique [15].

#### II.3.1 Bruit thermique

Le bruit thermique est une source interne, il est dû au mouvement aléatoire des porteurs des charge libres causé par l'agitation thermique, on les observe uniquement dans les dispositifs résistifs. Aussi le bruit ambiant, qui résulte de la température du milieu extérieur éclairé par l'antenne est classé généralement avec le bruit thermique.

#### II.3.2 Fouillis (clutter)

Le volume de détection d'un radar est limité par la présence d'échos indésirables provenant de perturbations atmosphériques ou dû à la réflexion des ondes sur le sol ou la mer. L'ensemble de ces échos perturbateurs est désigné sous le nom de clutter ou fouillis qui rendent la détection des cibles plus difficile pour un radar. On appellera donc fouillis de surface les échos provenant de la surface de la terre ou de la mer et fouillis de volume, ceux reflétés par les phénomènes atmosphériques tel que les nuages, la pluie, la neige...etc.

##### a. Clutter de mer

Il est bien connu que l'amplitude du clutter de mer est distribuée selon une loi de Rayleigh. Il existe d'autres modèles qui ont été proposés pour représenter le clutter de mer tels que le modèle log-normal et le modèle Weibull [16]. Récemment la distribution K a été retenue comme un modèle pour représenter le clutter de mer ou de sol.

### **b. Clutter de terre**

Le clutter de sol dépendant de la nature du terrain, tel que les régions urbaines, les forêts, les montagnes ...etc. En outre, les dispersions radar du sol sont affectées par la pluie, la neige, les végétations et la présence de lacs dans les terrains. Le clutter de terre est plus difficile à quantifier et à classifier que le clutter de mer. La densité de probabilité Weibull a été suggérée pour modéliser ce type de clutter.

### **II.4 Les modèles statistiques des fouillis**

Les signaux parasites sont généralement assimilés à du bruit aléatoire se superposant au bruit thermique, et constituent donc "le fouillis" [17]. Dans les radars à basse résolution, la largeur d'impulsion est supérieure à  $0.5\mu\text{s}$ , et la détection se fait à des angles d'incidence supérieurs à 5 degrés. Le clutter de surface peut être modélisé par une distribution Gaussienne de moyenne nulle et de variance constante. Dans la littérature radar, plusieurs distributions ont été proposées pour modéliser les statistiques du fouillis des données acquises de différents environnements tels que la distribution Weibull, la distribution Log-Normal, la distribution Gamma, la distribution K et la distribution Pareto. Alors le tableau II.2 résume quelques cas de clutter gaussien et non-gaussien :

## Chapitre II : Détection Radar

Type de Radar	Largeur d'impulsion $\tau$ ( $\mu$ s)	Terre ou mer	Bande de Fréquences	Angle d'incidence (degrés)	Modélisation du clutter
Basse Résolution	2	Montagnes rocheuses	S (2-4GHZ)	$\geq 5$ $< 5$	Gaussienne Weibull
Basse résolution	3	Collines boisées	L (1-2GHZ)	$0.5^\circ$	Log-normale et Weibull
Haute Résolution	0.17	Forêt	X (8-12GHZ)	$0.7^\circ$	Log-normale et Weibull
Haute Résolution	0.17	Terre cultivée	X (8-12GHZ)	$0.7^\circ$ - $5.0^\circ$	Log-normale et Weibull
Haute Résolution	0.2	Mer : Etat 1	X (8-12GHZ)	$4.7^\circ$	Log-normale et K
Haute Résolution	0.1	Mer : Etat 2	$K_v$ (12-18 GHz)	$1.0^\circ$ - $30.0^\circ$	Log-normale et K

**Tableau II.2** : Exemple d'environnement gaussien et non gaussien.

### II.4.1 Le modèle Gaussien (Normal)

La loi normale est l'une des lois de probabilité les plus adaptées pour modéliser des Phénomènes naturels issus de plusieurs événements aléatoires.

La densité de probabilité de la distribution normale est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < x < +\infty \quad (\text{II.3})$$

Où  $\mu$  et  $\sigma$  (ou  $\sigma^2$ ) sont les paramètres de la distribution, tel que  $\mu$  est la moyenne et  $\sigma^2$  est la variance.

La fonction de répartition de la loi normale ne possède pas d'expression simple. Cependant les valeurs ont été tabulées numériquement pour la loi  $N(0,1)$ .  $\sigma$  est connu sous le nom écart- type

### II.4.2 Le modèle Weibull

La fonction de densité de probabilité ( Probability Density Function PDF) du modèle Weibull est donnée par [18] :

$$f(x) = bcx^{c-1} \exp^{-bx^c} ; x \geq 0 \quad (\text{II.4})$$

Sa fonction de répartition est :

$$f(x) = 1 - \exp^{-bx^c} \quad (\text{II.5})$$

Où

b : le paramètre d'échelle.

c : le paramètre de forme.

### II.4.3 Le modèle log-normal

La distribution log-normal est donnée par [19] :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (\text{II.6})$$

Où la moyenne  $\mu$  et l'écart type  $\sigma$  de  $\ln(x)$ , représentent respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme.

### II.4.4 Le modèle K

Ce modèle est capable de modéliser aussi bien le clutter de sol que le clutter de mer, la variable aléatoire X a une fonction de densité de probabilité définie par :

$$f_x(x) = \frac{4}{b\Gamma(c)} \left(\frac{x}{b}\right)^c K_{c-1} \left(\frac{2x}{b}\right) ; x > 0 \quad (\text{II.7})$$

b : paramètre d'échelle

c : paramètre de forme

$\Gamma$  : fonction gamma

$K_c$  : La fonction de Bessel modifiée

### II.4.5 Le modèle Gamma

La fonction de densité de la distribution Gamma est donnée par [20] :

$$f(x) = \frac{x^{c-1}}{b^c} \Gamma(c) \exp\left(-\frac{x}{b}\right) \quad (\text{II.8})$$

Où

b : le paramètre d'échelle.

c : le paramètre de forme.

### II.4.6 Le modèle Pareto

Ce modèle est introduit pour modéliser les données expérimentales acquises par les radars à haute résolution et/ou à faibles angles d'incidence. La PDF de la distribution Pareto est donnée par [21]:

$$f(x) = \frac{cb^c}{x^{c+1}}; x > b, c > 0, b > 0 \quad (\text{II.9})$$

Où :

c : paramètre de forme

b: paramètre d'échelle.

Le moment d'ordre n qui caractérise la puissance du clutter est donné par :

$$E[x^n] = \frac{cb^c}{c-n} \quad (\text{II.10})$$

### II.4.7 Le modèle Rayleigh

Ce modèle considère que le signal réfléchi est la somme d'un grand nombre de signaux provenant de réflecteurs élémentaires constituant la surface de la cible, ce modèle est le plus utilisé pour représenter la plupart des clutter. Le signal réfléchi suit une loi de probabilité de Rayleigh après le passage par un détecteur quadratique dont l'amplitude de la densité de probabilité de X s'écrit :

$$f_x(x) = \frac{x}{b} \exp\left(-\frac{x^2}{2b}\right), \quad x > 0 \quad (\text{II.11})$$

b : paramètre d'échelle.

### II.5 Les critères de décision

Le système de décision est défini par une application de l'espace des observations dans l'ensemble des hypothèses possibles, on désigne cette application par règle de décision. Le problème de la détection d'une cible revient à considérer une règle de décision optimale qui, à partir de l'observation  $r(t)$ , peut décider de la présence du signal  $s(t)$  qui provient de la cible ou de la présence (en absence de  $s(t)$ ) d'un signal  $n(t)$  qui provient du bruit de l'environnement. Par conséquent  $r(t)$  s'écrit :

$$r(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & \text{cible présente} \\ n(t), & \text{cible absente} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Les principes de la théorie de la détection statistique sont utilisés pour déterminer la structure du récepteur radar permettant d'obtenir une décision optimale. Dans les applications radar, les deux critères qui associent l'optimalité au risque sont ceux de Bayes et de Neyman-Pearson.

Généralement, les coûts de décisions correctes (détection et détection nulle) sont considérés comme nuls. De ce fait, les coûts se résument à  $C_{01}$  et  $C_{10}$  (non détection et fausse alarme).

#### II.5.1 Critère de Bayes

L'utilisation du critère de bayes nécessite principalement deux hypothèses. Donc la première supposition pour le critère de Bayes est la considération des probabilités a priori,  $P(H_0)$  et  $P(H_1)$  qui représentent les probabilités d'occurrences de l'hypothèse  $H_0$  et  $H_1$  respectivement, telle que :  $P(H_0) + P(H_1) = 1$ .

La deuxième hypothèse est l'assignement de coût à chaque décision possible. En particulier, quatre décisions sont possibles :  $D_{11}$  (décider la présence alors qu'une cible est présente) et  $D_{01}$  (décider l'absence alors qu'une cible est présente) concernent l'hypothèse  $H_1$ . D'autre part,  $D_{10}$  (décider la présence alors qu'aucune cible n'est présente) et  $D_{00}$  (décider l'absence alors qu'aucune cible n'est présente) concernant l'hypothèse  $H_0$ .

$D_{11}$  et  $D_{00}$  sont des décisions correctes auxquelles nous affectons les coûts respectifs  $C_{11}$  et  $C_{00}$ . Alors que,  $D_{01}$  et  $D_{10}$  sont des décisions erronées auxquelles nous affectons les coûts respectifs  $C_{01}$  et  $C_{10}$ .

## Chapitre II : Détection Radar

---

L'objectif est de minimiser le coût moyen, La règle de Bayes se résume à :

$$\Lambda(q) = \frac{P_{Q/H_1}(q)}{P_{Q/H_0}(q)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \frac{P_{H_0}(C_{10}-C_{00})}{P_{H_1}(C_{01}-C_{11})} \quad (\text{II.13})$$

Où  $\Lambda(q)$  est le rapport de vraisemblance.

$P_{Q/H_1}(q)$  est la fonction de densité de probabilité de la cellule sous test sachant que le signal  $S(t)$  est présent (cible présente) et  $P_{Q/H_0}(q)$  est la fonction de densité de probabilité de la cellule sous test sachant que le signal  $S(t)$  est absent (cible absente).

### II.5.2 Critère de Neyman-Pearson

Dans ce critère, il consiste à rendre la probabilité de détection  $P_d$  maximale ou à minimiser la probabilité de non détection  $P_{miss}$ , sachant que la probabilité de fausse alarme  $P_{fa}$ , est fixée à une valeur  $\alpha$ .

La règle de décision de Neyman-Pearson donnée par :

$$\Lambda(q) = \frac{P_{Q/H_1}(q)}{P_{Q/H_0}(q)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \tilde{\lambda} \quad (\text{II.14})$$

Où  $\tilde{\lambda}$  est le multiplicateur de Lagrange, correspondant au seuil de détection obtenu à partir de la contrainte  $P_{fa} = \alpha$ .

### II.6 La surface équivalente radar

La surface équivalente radar (SER) est la surface effective de réflexion attribuée à chaque surface de cible (l'objet qui reflète le faisceau électromagnétique) [8]. Plus elle est importante, plus il est facile de détecter la cible. Elle dépend de la nature de l'objet et du rayonnement de l'onde émise par le radar, à savoir sa fréquence et des angles d'incidence et de réflexion de l'onde puis de l'état de polarisation de l'onde [7]. La formule de la SER est donnée par :

$$\sigma = 4\pi \cdot \frac{P_s}{P_i} \quad (\text{II.15})$$

## Chapitre II : Détection Radar

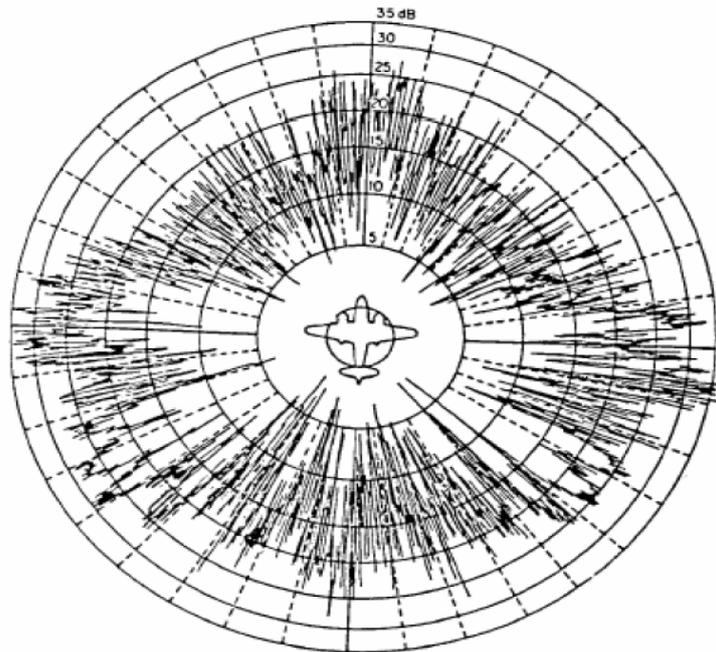
---

Où :

$P_s$  : La puissance réfléchiée par la cible

$P_i$  : La puissance illuminée par le radar

L'unité de la SER est le mètre carré ( $m^2$ ) et s'étend sur une grande gamme de valeurs, tout dépend de la cible détectée.



**Figure II.2** : modèle surface équivalente radar d'un bombardier B-26

Une faible SER permettra d'échapper à un radar, ce qui est lié à la notion de furtivité dans les applications militaires, afin de rendre leur détection plus difficile, par opposition à un avion de ligne qui a une SER plus grande.

### II.7 Les modèles de fluctuations

Le terme fluctuation, dans les systèmes radar, appliqué aux échos radar décrit les changements de la surface équivalente radar (SER). Ces variations apparaissent en des changements de l'aspect de la cible vis-à-vis du radar et ils en résultent des variations dans les échos radar additionné à ceux causés par les conditions météorologiques. Deux types de fluctuations sont considérés : Cible lentement fluctuante et cible rapidement fluctuante

## Chapitre II : Détection Radar

---

- **Cible lentement fluctuante** : L'écho de cible ne change pas pendant l'émission des  $n_p$  impulsions, les échantillons reçus sont les mêmes pour toutes les impulsions
- **Cible rapidement fluctuante** : l'écho change de valeur d'une impulsion à l'autre. Donc les échantillons reçus sont des réalisations différentes de la même variable aléatoire.
- Généralement, les modèles de Swerling sont les modèles les plus utilisés pour représenter les fluctuations des cibles.

### II.7.1 Les modèles Swerling

Il s'agit de formules mathématiques pour décrire les propriétés statistiques de la surface efficace de formes complexes. Selon Swerling, la densité de probabilité de détection des cibles est décrite par une fonction de Khi carré ( $x^2$ ) ayant un nombre fini de degrés de liberté ( $m$ ).

$$p(\sigma) = \frac{m}{\Gamma(m)\sigma_{moy}} \left(\frac{m\sigma}{\sigma_{moy}}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{m\sigma}{\sigma_{moy}}\right)} I_{[0,\infty[}(\sigma) \quad (II.16)$$

Ces modèles sont particulièrement importants pour calculer  $\sigma$  d'une cible radar théorique. Il y a cinq variantes :

Modèles	K	Types de fluctuations
Swerling 1	1	Scan to scan (lentement fluctuante)
Swerling 2	1	Pulse to pulse (rapidement fluctuante)
Swerling 3	2	Scan to scan (lentement fluctuante)
Swerling 4	2	Pulse to pulse (rapidement fluctuante)
Swerling 5	$\infty$	Scan to scan (lentement fluctuante)

**Tableau II.3:** modèles de cibles

#### II.7.1.1 Swerling I

Décrit les échos ayant une rétrodiffusion assez constante durant le temps d'illumination. La probabilité de détection varie selon une fonction en Khi carré ( $x^2$ ) ayant deux degrés de liberté ( $m=1$ ). La surface équivalente radar est toujours constante d'une impulsion à la

suivante lors d'un balayage mais varie de balayage à un autre. La densité de probabilité de  $\sigma$  est donnée par la fonction de Rayleigh :

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{moy}} e^{\left(\frac{-1}{\sigma_{moy}}\right)} \quad (\text{II.17})$$

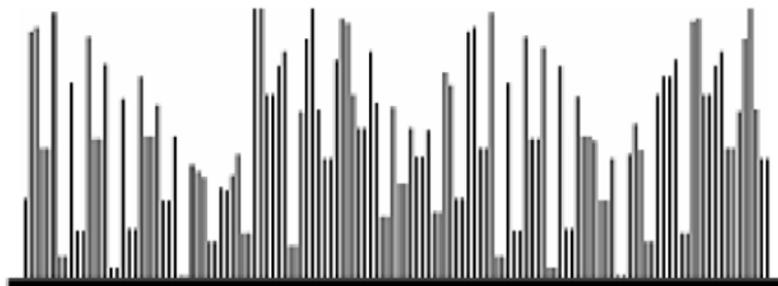
Où  $\sigma_{moy}$ : la moyenne des valeurs de  $\sigma$  de la cible.



**Figure II.3** : Modèle de fluctuation Swerling I

### II.7.1.2 Swerling II

Dans ce cas, les fluctuations sont plus rapides que dans le cas I et sont indépendantes d'une impulsion à une autre, où la fonction de densité de probabilité suit la même loi de l'équation



**Figure II.4** : modèle de fluctuation Swerling II

### II.7.1.3 Swerling III

Est le même que Swerling I mais avec 4 degrés de liberté ( $m=2$ ). La fluctuation de balayage en balayage radar suit la probabilité :

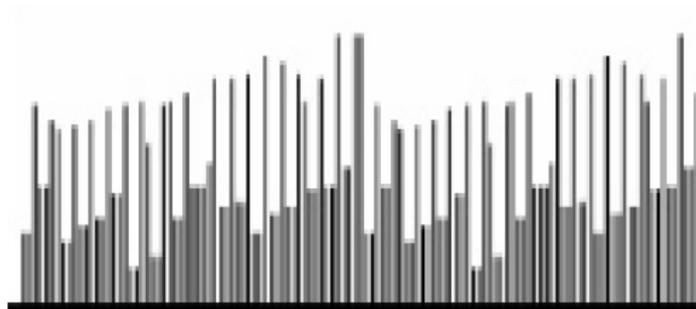
$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{moy}^2} e^{\left(\frac{-1}{\sigma_{moy}}\right)} \quad (\text{II.18})$$



**Figure II.5:** Modèle de fluctuation Swerling III

### II.7.1.4 Swerling IV

Est similaire à Swerling III mais  $\sigma$  varie d'une impulsion à l'autre plutôt que d'un balayage au suivant. On utilise toujours l'équation (II.18).



**Figure II.6 :** modèle de fluctuation Swerling IV

### II.7.1.5 Swerling V

Décrit le comportement d'une cible avec un  $\sigma$  constant (appelé aussi Swerling 0). Il s'agit d'une cible idéale n'ayant pas de fluctuations ( $m \rightarrow \infty$ ).

## II.8 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons étudié le principe général de la détection ainsi que les différentes lois de distribution entrant dans la modélisation du clutter. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons vu les modèles statistiques entrant dans la modélisation du fouillis, et aussi les deux cas de critères de décision, en l'occurrence le critère de Bayes et celui de Neyman-Pearson qui sont essentiels dans l'optimisation du signal. Enfin, les modèles de swerling qui décrivent les fluctuations de la cible : fluctuante ou non fluctuante ainsi que l'expression de la distribution.

## *Chapitre III*

### *La détection à de taux fausse alarme constant CFAR*

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

---

## III.1 Introduction

Dans la détection classique, qui utilise un seuil fixe pour détecter les cibles noyées dans du bruit est médiocre, car une faible variation de la puissance du bruit peut causer une dégradation des performances du radar. C'est pour cela que la technique de détection à taux de fausse alarme constant CFAR (Constant False Alarm Rate), qui se révèle fondamentale dans les systèmes radar, a été développée et qui utilise un seuil adapté au niveau du bruit et du clutter pour avoir un taux de fausse alarme constant tout en maximisant la probabilité de détection. Dans ce chapitre, nous exposerons les différents types de détecteurs CFAR à savoir : (CA-CFAR, GO-CFAR et SO-CFAR).

## III.2 La probabilité de fausse alarme (Pfa)

A cause de la présence du bruit thermique dans le récepteur, il y a toujours une probabilité non nulle où le seuil sera excédé, même en l'absence de cible. Le seuil peut être considéré comme la valeur d'un récepteur de tension de sortie  $V_T$ , que lorsqu'elle est dépassée, indique une détection. Les échos récupérés à la sortie du récepteur peuvent être vrais ou faux. Aux faux échos sont liés des pics de bruit qui, durant leurs mouvements de fluctuation, peuvent dépasser le seuil. La probabilité que la valeur du seuil  $V_T$  sera dépassée lorsque le signal n'est pas présent, est la probabilité de fausse alarme ( $P_{fa}$ ). Le seuil à la sortie du récepteur radar, est choisi de telle façon à ce que la probabilité de fausse alarme et celle désirée soient égales.

## III.3 Le taux de fausses alarmes (FAR)

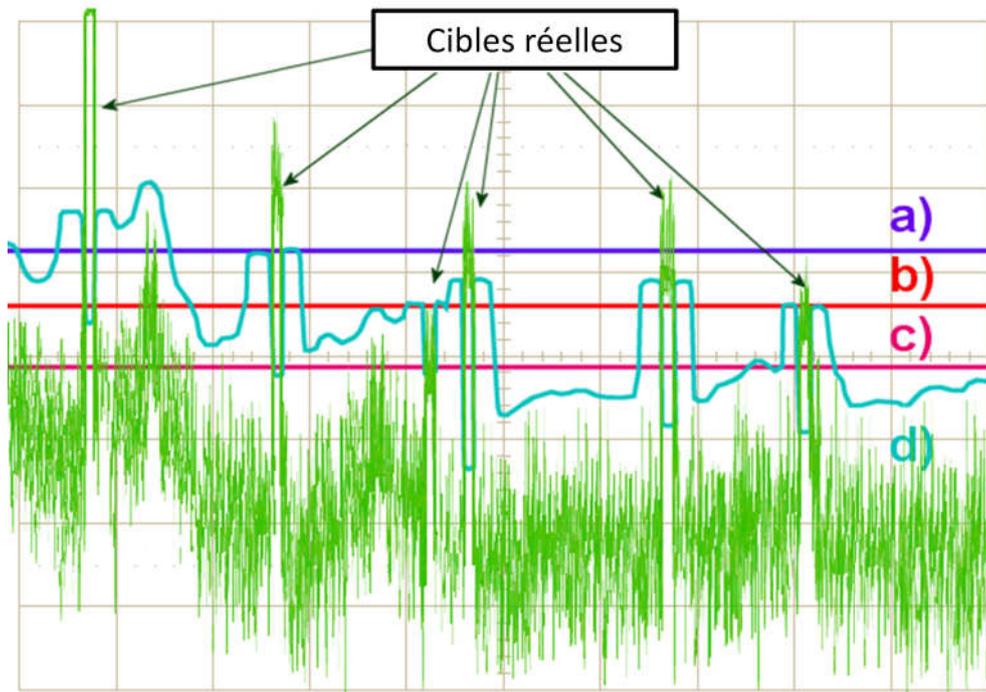
Une fausse alarme est une fausse détection de cible due aux interférences ou faux échos qui dépassent le seuil de détection.

Le paramètre (FAR) est donné par :

$$FAR = \frac{\text{fausses détection par FRI}}{\text{Nbr de cellules de résolution en portée}} \quad (\text{III.1})$$

Où : FRI : fréquence de répétition des impulsions.

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR



**Figure III.1** : variation du seuil de détection modifiant le taux de fausses alarmes

- (a) Seuil trop élevé avec une faible probabilité de détection.
- (b) Seuil optimal avec une probabilité de détection élevée, mais on a quand même une fausse détection.
- (c) Seuil trop bas, ce qui amène un grand nombre de fausses alarmes.
- (d) Seuil variable du filtre pour que le FAR soit constant.

Quand le bruit thermique dépasse le seuil de filtrage ou que du bruit interne ou externe se mêle au signal, de fausses détections se produisent. Si le filtre pour les faux échos dans le récepteur est fixé trop haut, il y aura peu de fausses alarmes mais le rapport S/N choisi éliminera un grand nombre de vrais échos. Au contraire, si le seuil est fixé trop bas de nombreux faux échos vont alors masquer les vraies détections.

## III.4 Taux constant de fausses alarmes (CFAR)

Il existe différentes solutions à ce problème, regroupées sous le vocable de TCFA (CFAR). Il s'agit de varier le seuil du filtre selon le bruit de l'environnement en prenant une moyenne de bruit de fond.

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

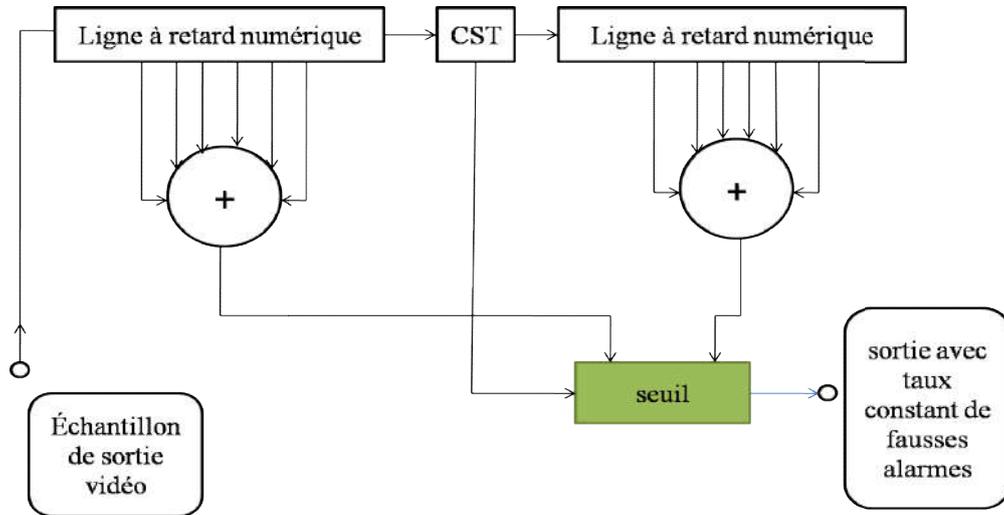


Figure III.2 : diagramme du circuit électronique pour obtenir de la moyenne par cellule

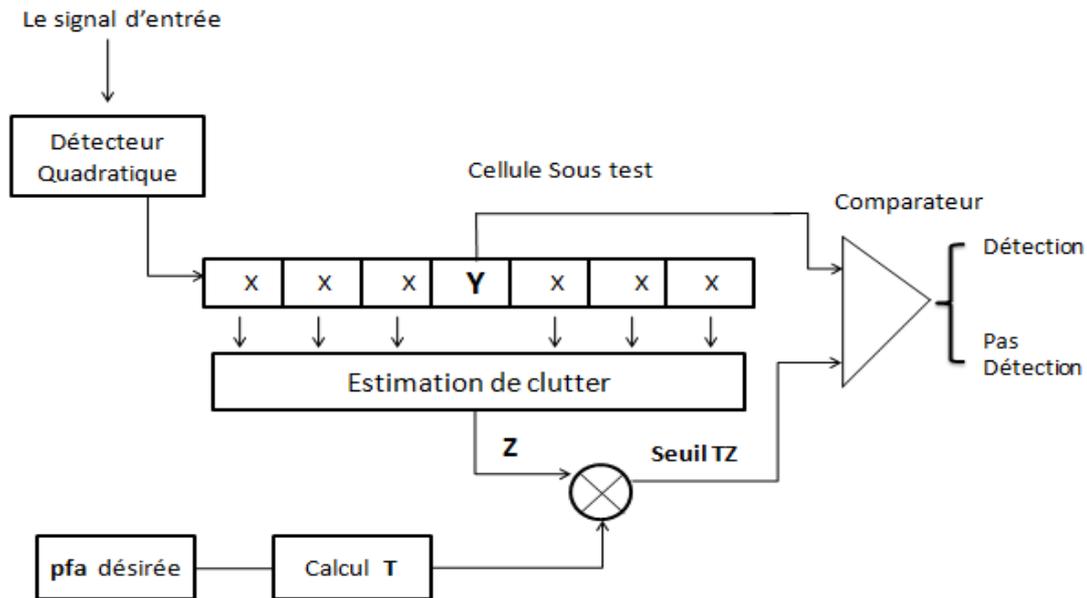
Dans la figure III.2 on fait un estimé des interférences présentes dans les cellules de résolution de chaque côté de la cellule d'intérêt. Le processus est répété pour chaque cellule à une portée donnée.

## III.5 Concepts de base des détecteurs CFAR

Le CFAR est un modèle qui se place dans la partie traitement du signal du récepteur radar après réception et démodulation des échos radar. Les algorithmes de détection basés sur la technique CFAR sont utilisés pour détecter des cibles noyées dans des signaux parasites dont les puissances sont inconnues. Le détecteur CFAR comme montré dans la Figure III.3 est le Processus par lequel les échos parcourent une série de cellules de portée qui sont de nombre impaire [22]. est obtenu en échantillonnant le signal reçu à la sortie du détecteur quadratique et en le passant dans un registre à retard formé par un ensemble de cellules dites cellules de références . La cible est déclarée présente dans la cellule d'intérêt ou la cellule sous test tout en maintenant un taux de fausse alarme constant. Ceci est accompli par une comparaison de la sortie de chaque cellule sous test  $Y$  à un seuil adaptatif  $TZ$  dont la valeur est le produit entre la statistique  $Z$  qui représente l'estimation de la puissance total du clutter calculé à partir des échantillons  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , dans la fenêtre de référence et un facteur d'échelle  $T$  qui est choisi d'une manière à assurer la probabilité de fausse alarme désirée. L'échantillon dans la cellule sous test est comparé à ce seuil afin de déterminer la présence ou l'absence d'une cible selon une règle de décision suivante :

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

$$Y \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} TZ \tag{III.2}$$



**Figure III.3** : Schéma fonctionnel de détecteur CFAR

## III.6 Les différents types de détecteur CFAR

Plusieurs procédés de détection ont été proposés. La différence entre les diverses procédures CFAR réside dans la méthode retenue pour effectuer l'estimation de la puissance de la puissance du clutter selon le type d'environnement.

### III.6.1 Détecteur CA-CFAR (Cell Averaging CFAR)

Le premier détecteur CFAR est le détecteur CA-CFAR proposé par Finn Johnson [23] et illustré dans la Figure III.4. La puissance du clutter dans ce type de CFAR, est estimée par la moyenne arithmétique des échantillons dans la fenêtre de référence. Les performances du CA-CFAR sont optimales dans les milieux homogènes. L'inconvénient majeur de ce procédé, est que dans le cas où l'environnement est non homogène c'est-à-dire présence d'un bord du

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

clutter ou cibles interférentes, le seuil de détection augmente et la probabilité de détection du détecteur CA-CFAR diminue même pour un rapport signal sur bruit élevé.

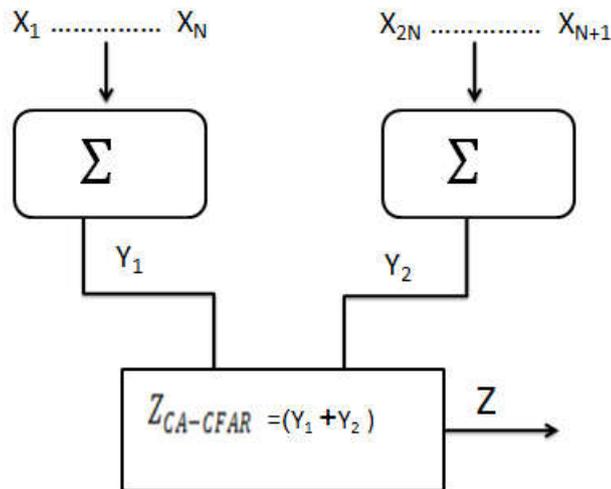


Figure III.4: Le détecteur CA-CFAR

## III.6.2 Détecteur GO-CFAR (Greatest Of)

La présence de discontinuité du clutter (bord de clutter) provoque une diminution ou augmentation de probabilité de fausse alarme  $P_{fa}$ . Hansen et Sawyers [24] ont proposé le détecteur GO-CFAR qui utilise le maximum des sommes des sorties des deux fenêtres qui se trouvent dans les deux cotés de la cellule sous test ce qui permet de faire une bonne estimation du seuil et une adaptabilité rapide aux changements dans l'environnement. La présence de cibles interférentes amène un masquage de cibles et par conséquent les performances du détecteur GO-CFAR se dégradent. Le but de cette amélioration est de corriger le problème de l'effet de bord du clutter.

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

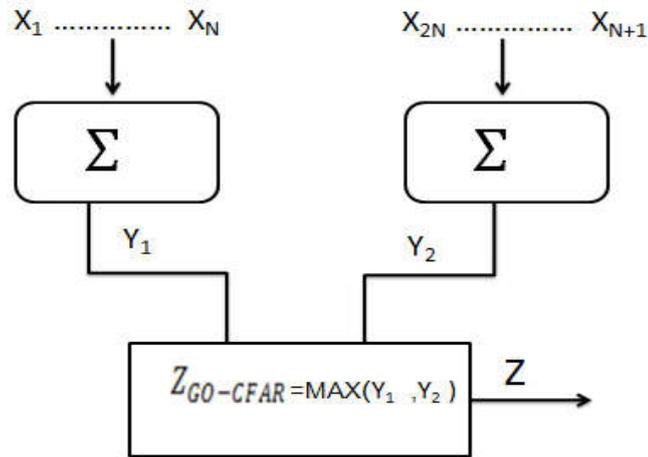


Figure III.5 : Le détecteur GO-CFAR

### III.6.3 Détecteur SO-CFAR (Smallest Of)

Pour corriger le problème de l'effet masque (si une cible se situe dans la région du bruit thermique seulement), Trunk [25] a proposé le détecteur SO-CFAR, c'est-à-dire il prend le minimum des deux fenêtres de part et d'autre de la cellule sous test au lieu du maximum.

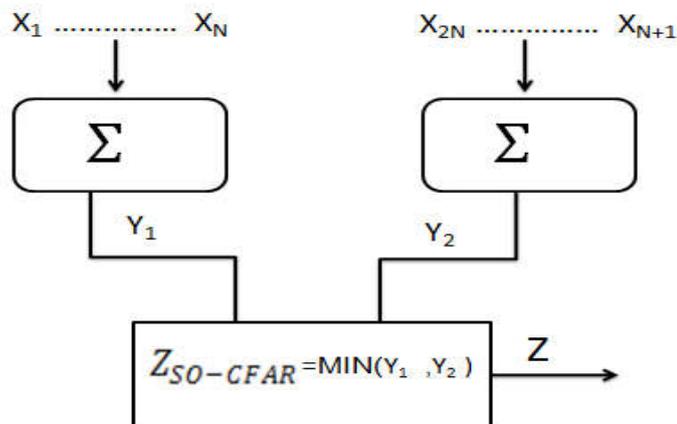


Figure III.6 : Le détecteur SO-CFAR

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

---

## III.7 Analyse des performances d'un détecteur optimal

Le détecteur optimal c'est le seuil fixe pour déterminer la présence d'une cible sous l'hypothèse que la puissance total du bruit homogène  $\mu$  est connue à priori. Dans ce cas, la probabilité de fausse alarme  $P_{fa}$  est donnée par [26] :

$$P_{fa}=P(Y > TZ/H_0) = \exp(-TZ/2\mu) \quad (\text{III.3})$$

Où  $TZ$  désigne le seuil fixé optimale.

La probabilité de détection optimale  $P_d^{opt}$  est donnée par :

$$P_d^{opt} = P(Y > TZ/H_1) = \exp(-TZ/2\mu(1 + \bar{s})) \quad (\text{III.4})$$

## III.8 Analyse des détecteurs CFAR

### III.8.1 Analyse de détecteur CA-CFAR

Dans le détecteur CA-CFAR, la puissance de bruit totale est estimée par la somme de  $N$  cellules de la fenêtre de référence. Il s'agit d'une statistique suffisante pour la puissance de bruit  $\mu$  dans l'hypothèse de bruit de milieu homogène.

$$Z = \sum_{i=1}^N X_i \quad (\text{III.5})$$

Où  $X_i$  sont des cellules adjacentes a la cellule sous test.

La probabilité de détection  $P_d$  pour le détecteur CA-CFAR est donnée par [27] :

$$P_d=[1 + T/(1 + \bar{s})]^{-N} \quad (\text{III.6})$$

Le facteur de multiplicateur  $T$  est calculée à partir (III.6) par la mise en  $\bar{s} = 0$ .

$$T = (P_{fa})^{-1/N} - 1 \quad (\text{III.7})$$

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

---

## III.8.2 Analyse de détecteur GO-CFAR

Dans le détecteur GO-CFAR, la puissance totale du bruit est estimée par le maximum des sommes des deux fenêtres de référence, on a :

$$Z = \max(Y_1, Y_2) \quad (\text{III.8})$$

Où

$$Y_1 = \sum_{i=1}^n X_i \text{ et } Y_2 = \sum_{i=n}^{n+1} X_i \quad (\text{III.9})$$

Avec  $n=N/2$ .

La probabilité de fausse alarme est donnée par [28] :

$$P_{fa} = 2(1 + T)^{-n} - 2 \sum_{i=0}^{n-1} (n + i - 1)(2 + T)^{n+i} \quad (\text{III.10})$$

Où T est la constante de multiplication qui dépend de la taille de la fenêtre de référence N.

La probabilité de détection  $P_d$  est déduit par le remplacement T par  $T/(1+\bar{s})$  dans (III.10) qui donne :

$$P_d = 2\left(1 + \frac{T}{1+\bar{s}}\right)^{-n} - 2 \sum_{i=0}^{n-1} (n + i - 1)\left(2 + \frac{T}{1+\bar{s}}\right)^{n+i} \quad (\text{III.11})$$

## III.8.3 Analyse de détecteur SO-CFAR

Dans le détecteur SO-CFAR, la puissance totale du bruit est estimée par le minimum des sommes des deux fenêtres de référence, nous avons :

$$Z = \min(Y_1, Y_2) \quad (\text{III.12})$$

La probabilité de détection pour un détecteur SO-CFAR est donnée par la formule suivante :

$$P_d = 2\left(1 + \frac{T}{1+\bar{s}}\right)^{-n} \times 2\left(2 + \frac{T}{1+\bar{s}}\right)^{n+i} \quad (\text{III.13})$$

$Y_1$  et  $Y_2$  étant définis dans (III.9).

# Chapitre III : La détection à taux de fausse alarme constant CFAR

---

## III.9 Conclusion

La détection à taux de fausse alarme constant (CFAR) permet une bonne estimation du clutter en fixant le seuil de détection à la variation du bruit, contrairement à la détection classique qui utilise un seuil fixe où dans la plupart des cas amène de nombreuses fausses alarmes. Quelques types de détecteurs CFAR tels que : CA, GO, SO-CFAR que nous avons présenté dans ce chapitre adoptent des techniques d'estimation pour chaque type de détecteurs que ce soit dans un environnement homogène (CA-CFAR) ou non homogène (GO, SO-CFAR).

## *Chapitre IV*

# *Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR*

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

---

## IV.1 Introduction

L'une des tâches importantes d'un système radar est la détection de cible. Cependant la détection elle-même est assez simple ; il compare le signal à un seuil. Par conséquent, la détection arrive avec un seuil approprié. En général, le seuil dépend à la fois de la probabilité de détection et de la probabilité de fausse alarme. Dans de nombreux systèmes à réseaux phasés, en raison du coût associé à une fausse détection, il est souhaitable d'avoir un seuil de détection qui non seulement maximise la probabilité de détection mais maintient également la probabilité de fausse alarme en dessous d'un niveau prédéfini.

Dans ce chapitre, nous analysons la probabilité de détection des modèle Swerling. Nous proposons aussi l'analyse et interprétation des résultats obtenus pour différentes situations de détection pour un système CFAR où la probabilité de fausse alarme doit être variée ainsi que la taille de cellule.

## IV.2 Simulation des cibles fluctuantes et non fluctuantes

Cette section traite de la probabilité de détection radar pour les cibles mobiles en utilisant les différents modèles Swerling. En utilisant les expressions de différentes cibles, on trace dans ce qui suit la variation de la probabilité de détection pour différentes valeurs de  $n_p$  (le nombre de pulsation). La figure IV.1 montre un graphique de la probabilité de détection en fonction du rapport SNR avec différentes valeur de  $n_p$  avec une probabilité de fausse alarme  $pfa = 10^{-10}$  et  $10^{-8}$  dans le cas de la fluctuation Swerling II.

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

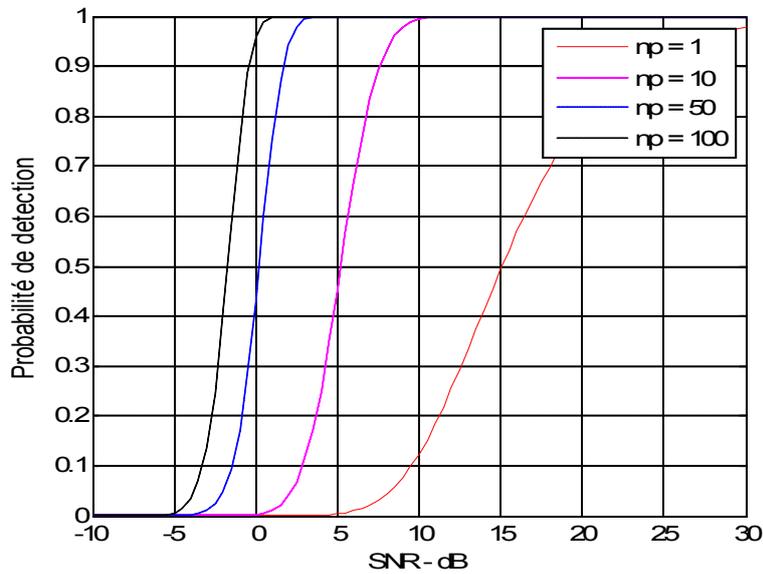


Figure IV.1 : Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling II avec  $pfa = 10^{-10}$

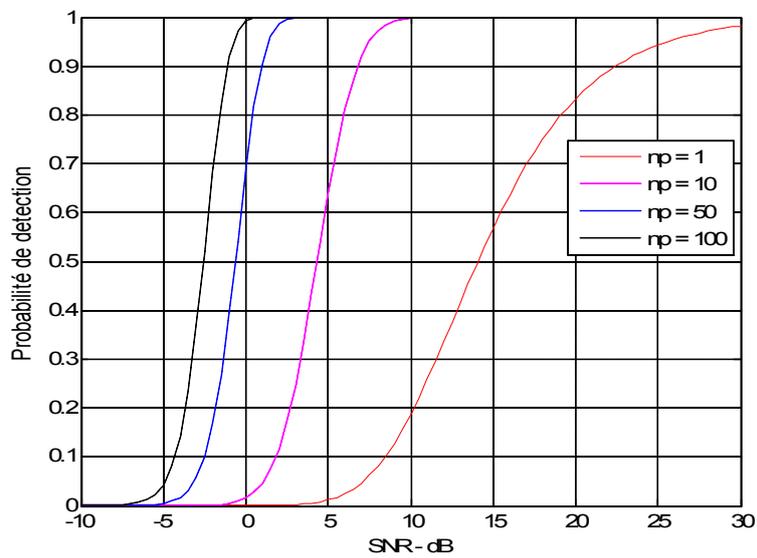
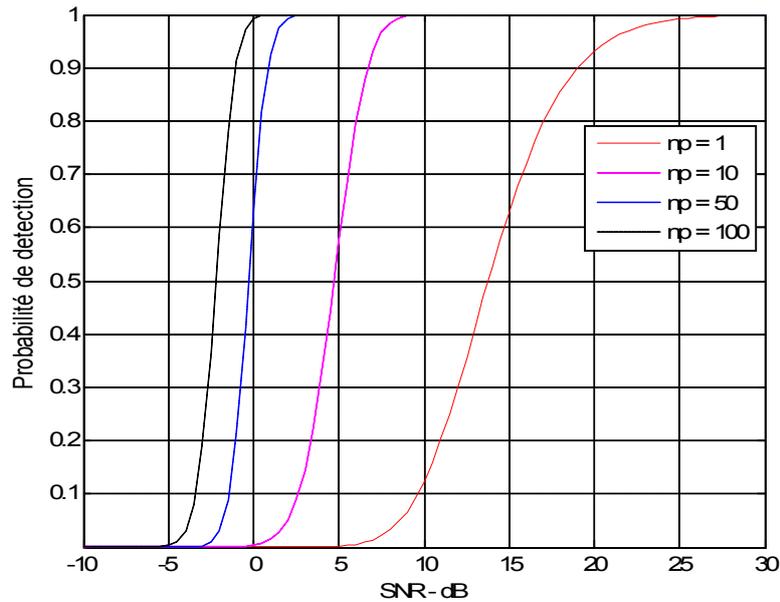


Figure IV.2 : Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling II avec  $pfa = 10^{-8}$

## Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

---

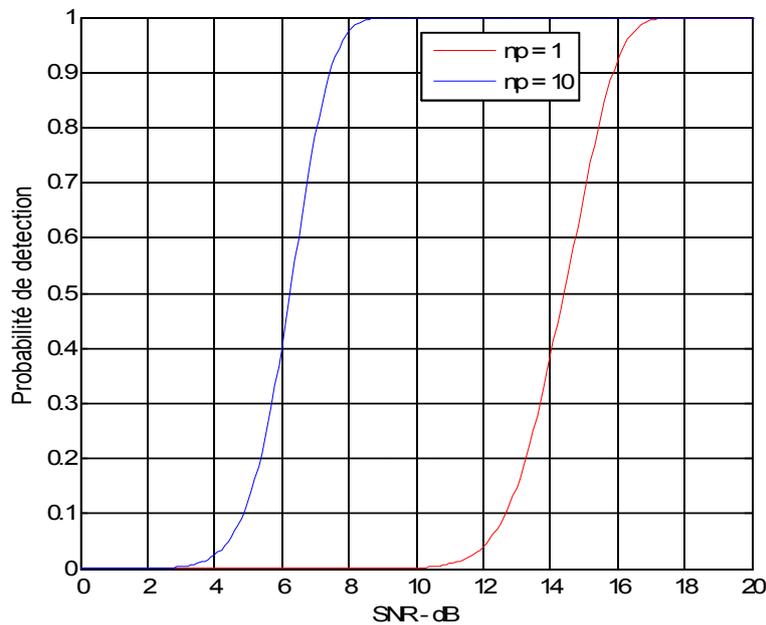
D'autre part, la mesure de la probabilité de détection par rapport au SNR est donnée dans le cas de l'utilisation de Swerling IV et V avec un nombre définie de pulsation et une probabilité de fausse alarme  $pfa = 10^{-9}$  et  $10^{-12}$  respectivement. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures IV.3 et IV.4.



**Figure IV.3 :** Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling IV avec  $pfa = 10^{-9}$

## Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

---



**Figure IV.4 :** Probabilité de détection en fonction du SNR cas de Swerling V avec  $pfa = 10^{-12}$  avec  $n_p = 1$  et 10.

On constate d'après l'analyse des différents résultats obtenus que le seuil de détection diminue avec l'augmentation de la probabilité de fausse alarme, par conséquent la probabilité de détection augmente. On remarque que la probabilité de détection des cibles Swerling V (cibles non fluctuantes) en fonction du SNR est quasi-constante puisque la surface équivalente de ces cibles reste constante donc la puissance de réception reste la même. D'autre part, il est à noter que la détection des cibles fluctuante est plus difficile que celle des cibles non fluctuantes aux probabilités de détection élevées. En outre, nous remarquons que la fluctuation des cibles perturbe la détection de celle-ci. Plus le rapport signal sur bruit est considérable plus la probabilité de détection est élevée.

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

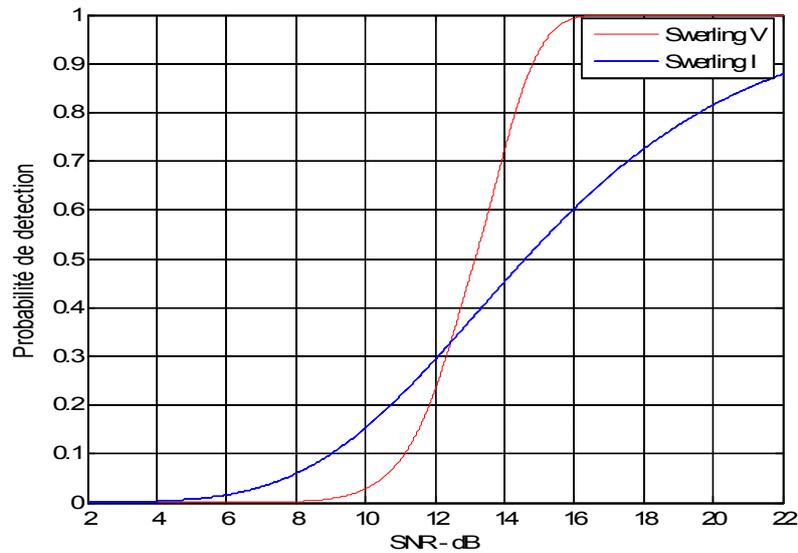


Figure IV.5 : Comparaison des probabilités de détection entre Swerling V et Swerling I

## IV.3 Simulation des différents Radar CFAR

Dans cette section, nous proposons d'analyser les différents types de radars CFAR étudié dans le chapitre III à savoir CA-CFAR, GO-CFAR et SO-CFAR. Le travail concerne l'évaluation des performances radar en détection de cibles intégrées dans un clutter de mer suivant un modèle de distribution de Rayleigh. Le bruit de fond est schématisé par un ensemble d'échantillons  $N$ . Les performances des différents radars à savoir la probabilité de détection et la probabilité de fausse alarme sont calculées.

### IV.3.1 Interprétation des résultats du détecteur CA-CFAR

Nous allons calculer la probabilité de détection du radar CA-CFAR en utilisant un modèle de fouillis avec différente probabilité de fausse alarme. Le radar CA-CFAR ou le radar à fausse alarme constante utilise le principe de l'évaluation du niveau de fouillis pour maintenir un taux d'alarme constant. Une valeur estimée est obtenue en faisant la moyenne du signal reçu sur un certain nombre de cellules. D'autre part, la valeur du seuil de détection est incrémentée afin de prendre une décision de détection. Dans notre cas, nous calculons la variation de la probabilité de fausse alarme en fonction du nombre de cellules  $N$ , et le facteur de multiplication  $T$ , alors que la probabilité de détection est donnée en fonction de tous les paramètres précédent plus le rapport signal sur clutter. Les figures suivantes représentent la variation de la probabilité de détection en fonction du SCR pour les valeurs de  $N = 12, 24, 36$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

et  $pfa = 10^{-6}, 10^{-8}$ . En effet, c'est une comparaison entre la probabilité de détection optimale et celle du CA-CFAR

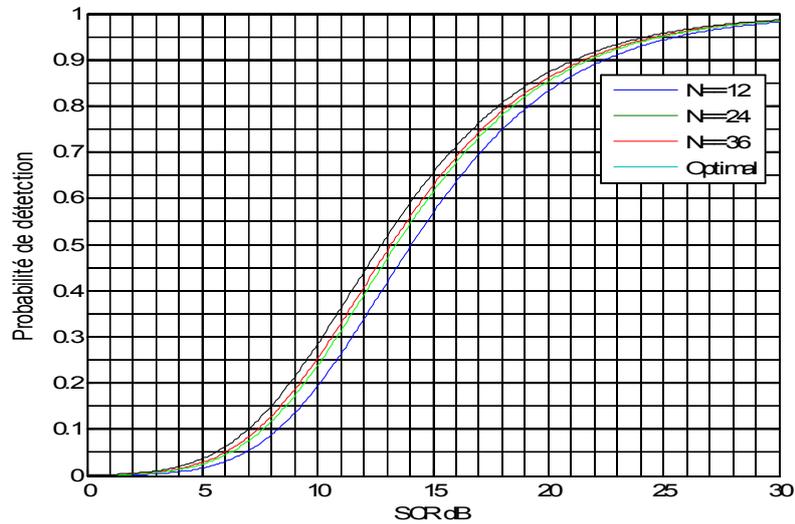


Figure IV.6 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour différentes valeur de  $N$  et  $pfa = 10^{-6}$ .

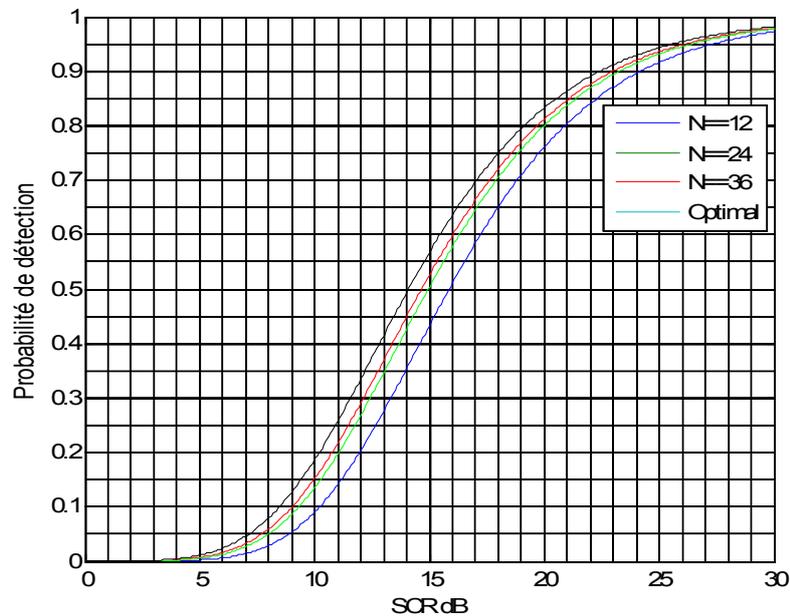


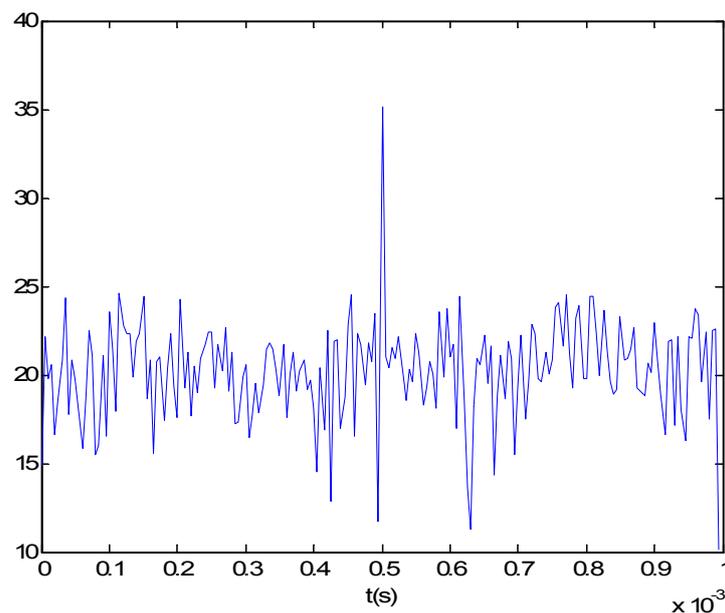
Figure IV.7 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour différentes valeur de  $N$  et  $pfa = 10^{-8}$ .

## Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

---

Les figures ci-dessus illustrent la différence de la probabilité théorique (optimal) et la probabilité de détection simulée pour différentes valeurs de  $N$  et  $Pfa$ . D'après ces graphes, il est clair que plus le nombre de cellules est grand plus la probabilité de détection est grande et plus on s'approche du détecteur optimal. D'autre part, plus la probabilité de fausse alarme est grande plus on tend vers les valeurs optimales de probabilité de détection.

Considérons le signal représenté dans la figure IV.8. Il représente le spectre du signal reçu au niveau du radar. Le graphique CA-CFAR de ce signal montre des valeurs fortes à gauche et à droite de la cible, mais elle a une valeur relativement faible. La décision locale du radar obtenue par CA-CFAR avec  $pf_a = 10^{-2}$  et  $N = 200$  est montrée sur la figure IV.9. La ligne bleu est le seuil adaptatif, qui est l'écart-type local multiplié par un facteur de contraste. On remarque que, si le filtre pour les faux échos dans le récepteur est fixé trop haut, il y aura peu de fausses alarmes. Au contraire si le seuil est trop bas, un grand nombre de faux échos vont masquer les vraies détections.



**Figure IV.8** : Spectre du signal reçu au niveau du radar

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

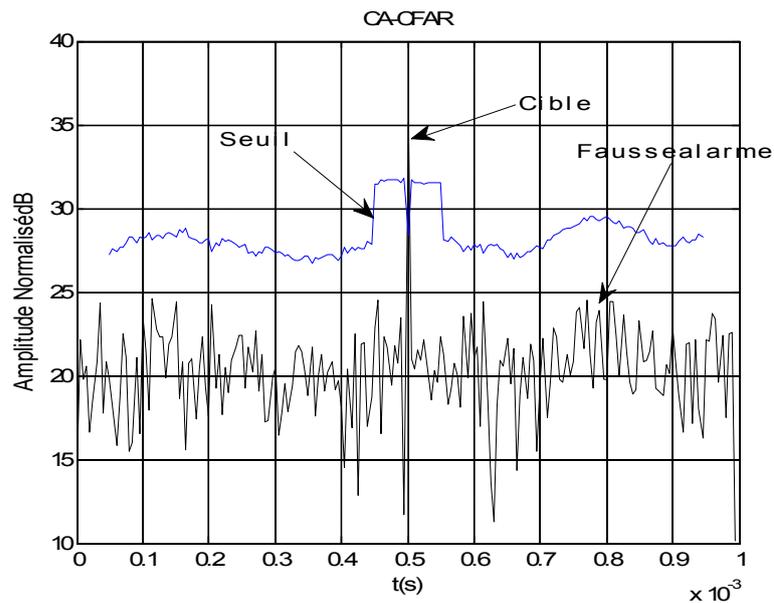


Figure IV.9 : Seuil de détection pour une valeur  $Pfa = 10^{-2}$

## IV.3.2 Interprétation des résultats du détecteur GO-CFAR

Dans cette section nous nous focalisons sur l'analyse des différents résultats de détection d'un autre type de radar à savoir le GO-CFAR. Cependant, nous calculons la probabilité de détection en fonction du rapport signal sur clutter SCR pour différentes valeur du nombre de cellules  $N$  et en fonction de la probabilité de fausse alarme tout comme le détecteur CA-CFAR. Les figures ci-dessous montrent cette variation pour les valeurs précédentes.

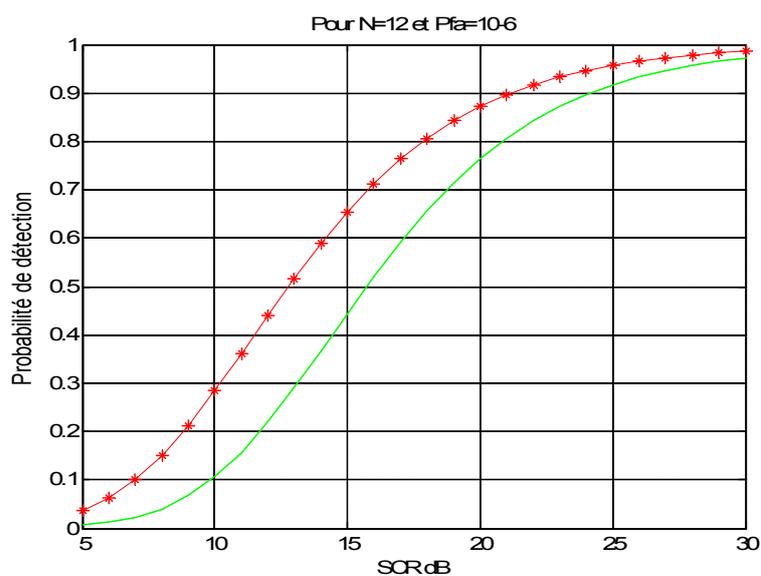


Figure IV.10 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 12$  et  $Pfa = 10^{-6}$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

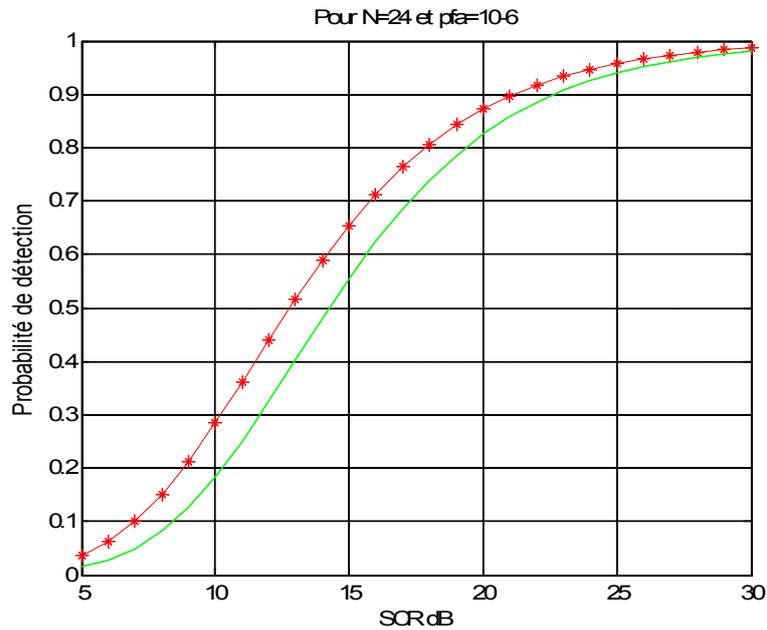


Figure IV.11 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 24$  et  $Pfa = 10^{-6}$

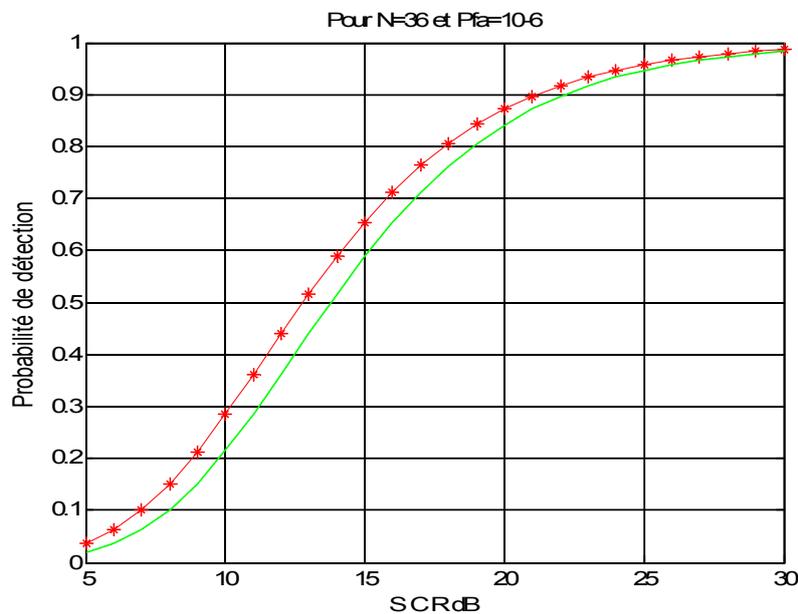


Figure IV.12 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 36$  et  $Pfa = 10^{-6}$

On constate d'après les résultats obtenus pour une variante de  $N = 12, 24, 36$  et une probabilité de fausse alarme de  $Pfa = 10^{-6}$  que la probabilité de détection s'améliore avec l'augmentation du nombre de cellules  $N$ . D'autre part, pour une probabilité de fausse alarme

## Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

égale à  $Pfa = 10^{-8}$ , cette amélioration est plus accentuée entre  $5dB$  et  $25 dB$  suivie d'une faible variation qui devient constante aux environs de  $30 dB$ . A noter que la courbe en rouge, c'est la probabilité de détection optimale.

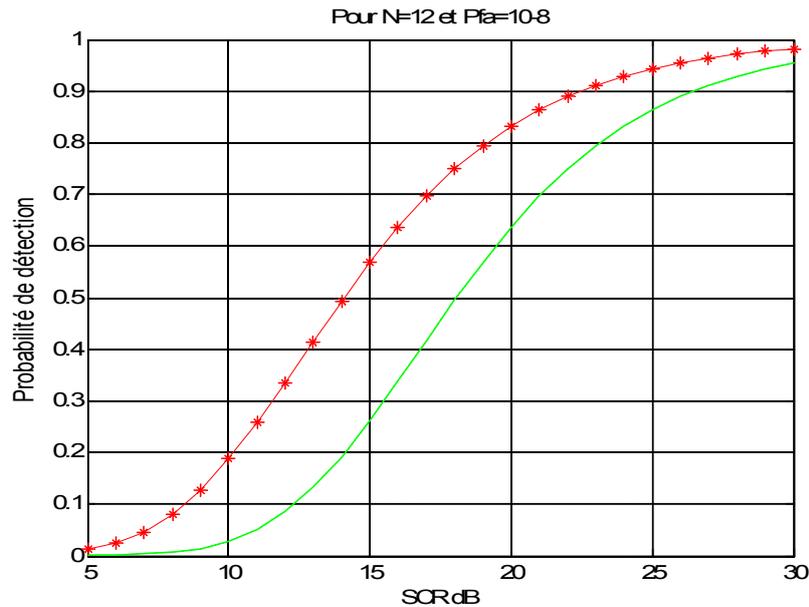


Figure IV.13 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 12$  et  $Pfa = 10^{-8}$

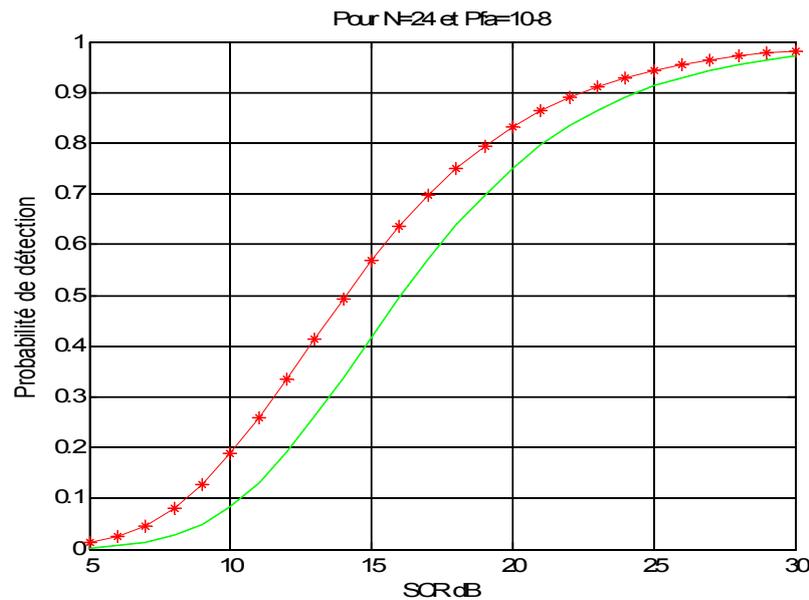


Figure IV.14 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 24$  et  $Pfa = 10^{-8}$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

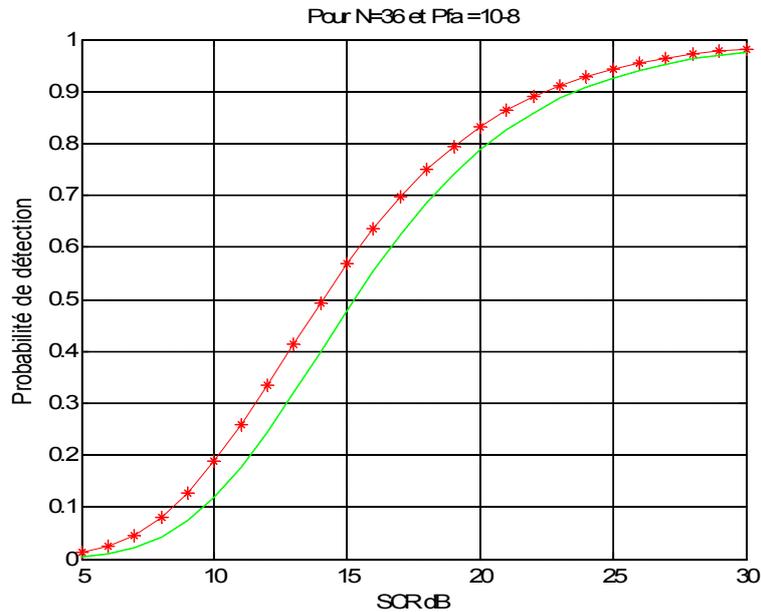


Figure IV.15 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 36$  et  $P_{fa} = 10^{-8}$

### IV.3.3 Interprétation des résultats du détecteur SO-CFAR

Dans cette section, nous présentons les performances du détecteur SO-CFAR décrits précédemment avec les différents schémas du nombre de cellule  $N$ . Les résultats sont donnés pour une probabilité de fausse alarme  $P_{fa} = 10^{-6}, 10^{-8}$ . La probabilité de détection  $P_d$  est calculé en utilisant les mêmes étapes que la  $P_{fa}$ . Les figures ci-dessous résument les valeurs de la probabilité de détection qui correspondent à chaque schéma pour différentes valeurs de nombre de cellules, en fonction du SCR.

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

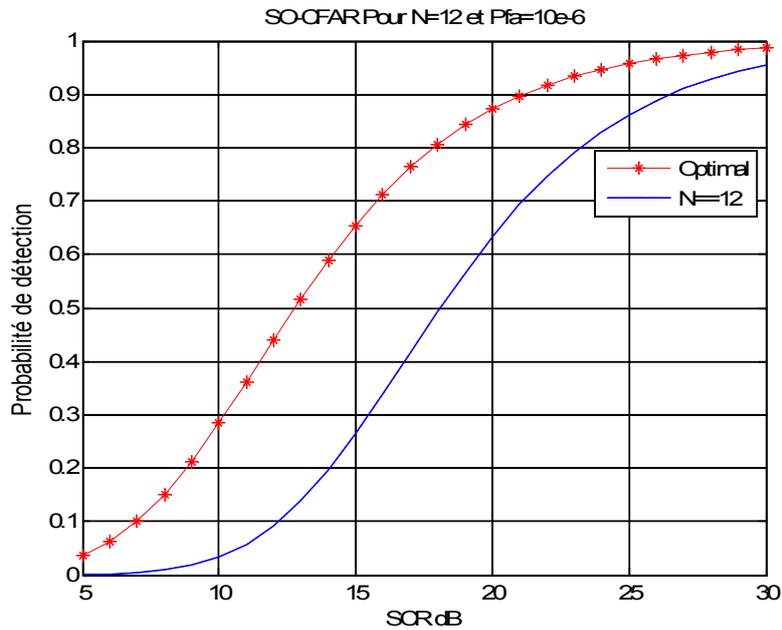


Figure IV.16 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 12$  et  $Pfa = 10^{-6}$

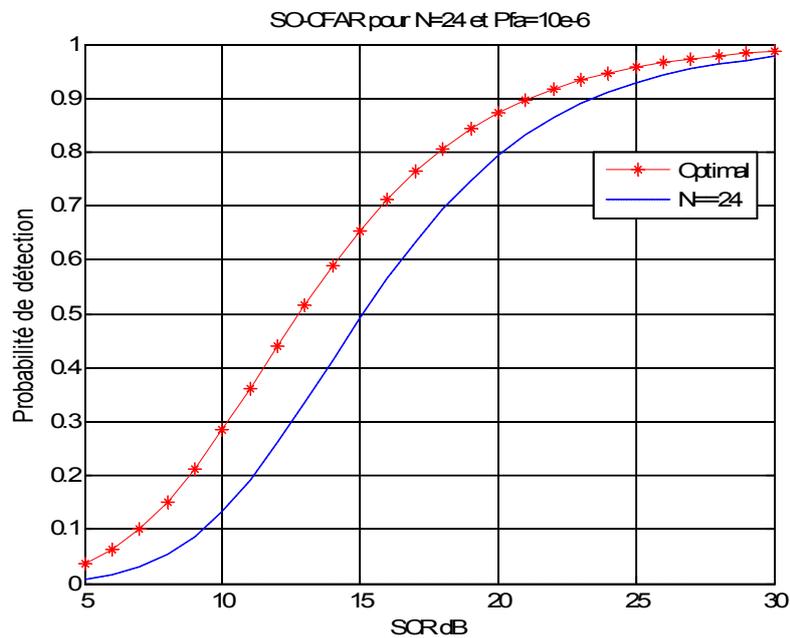
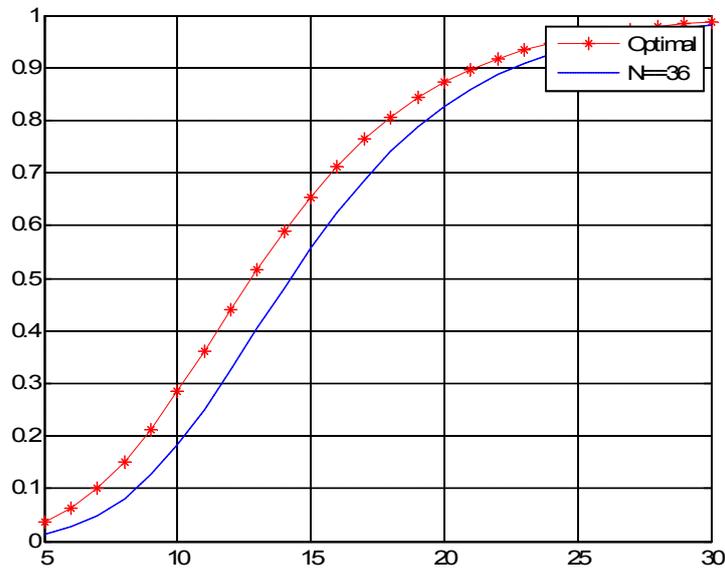


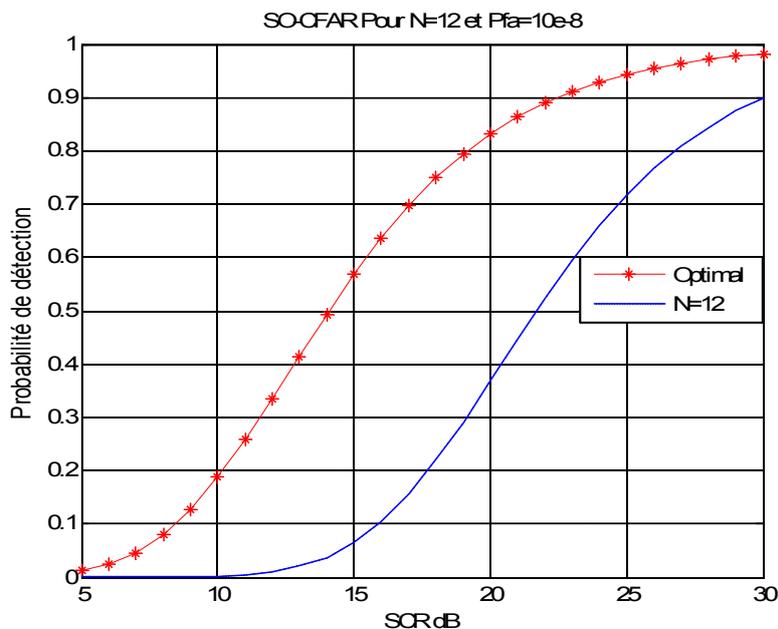
Figure IV.17 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 24$  et  $Pfa = 10^{-6}$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR



**Figure IV.18 :** Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 36$  et  $Pfa = 10^{-6}$

Les résultats obtenus montrent que pour un type de radar SO-CFAR, pour une valeur de  $N = 12$  la probabilité est trop faible, par conséquent il faut avoir un nombre considérable de cellules pour une bonne probabilité de détection.



**Figure IV.19 :** Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 12$  et  $Pfa = 10^{-8}$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

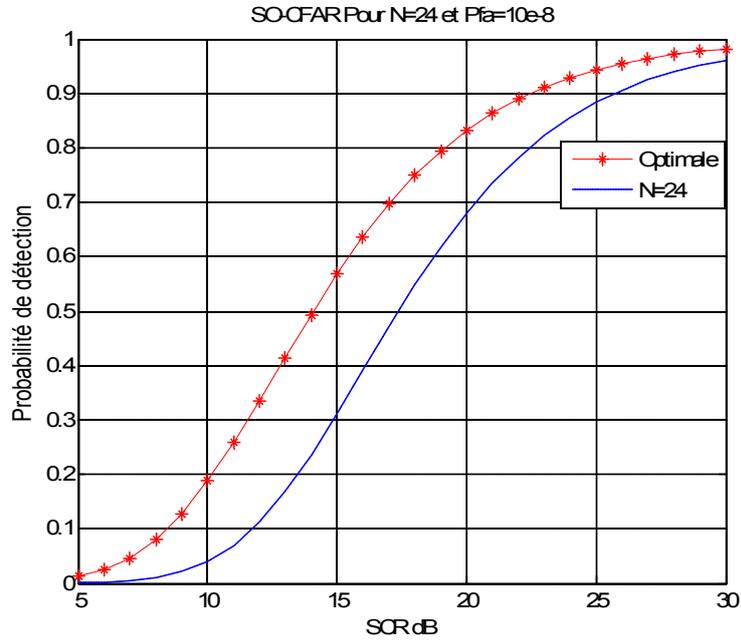


Figure IV.20 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 24$  et  $Pfa = 10^{-8}$

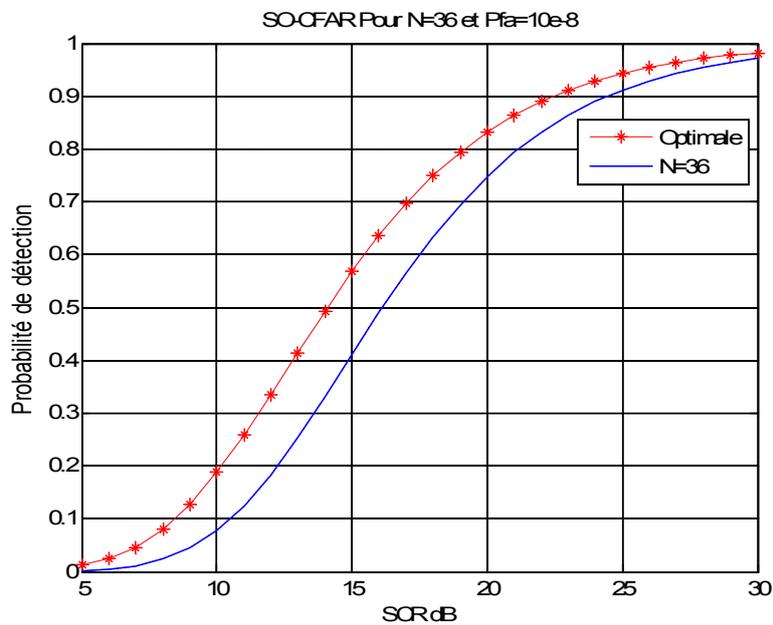


Figure IV.21 : Probabilité de détection en fonction du SCR pour  $N = 36$  et  $Pfa = 10^{-8}$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

D'après les figures ci-dessus, on remarque que l'augmentation de la probabilité de fausse alarme engendre une augmentation de la probabilité de détection. Par conséquent, et selon les résultats obtenus on peut dire que les performances du détecteurs SO-CFAR dans un milieu homogène présente une perte de puissance. Cependant, pour d'autres distributions, le détecteur SO-CFAR peut donner de meilleurs résultats tels que la distribution de Pearson.

## IV.4 Comparaison des détecteurs CFAR

Afin de mieux interpréter nos résultats, nous avons comparé entre les trois détecteurs pour une probabilité de fausse alarme  $Pfa = 10^{-8}$  et un nombre de cellule  $N = 40$ . La figure IV.22 illustre la variation de la probabilité de détection pour le CA, GO, et SO-CFAR en fonction du rapport signal sur clutter. En effet, le détecteur GO-CFAR montre une légère dégradation par rapport au détecteur CA-CFAR, les deux courbes sont presque identiques et superposés. D'autre part, nous confirmons notre analyse pour le détecteurs SO-CFAR qui nécessite une grande valeur du nombre de cellule afin de minimiser la perte de puissance. Nous pouvons également voir que les performances de détection augmentent lorsque le paramètre de forme  $N$  augmente.

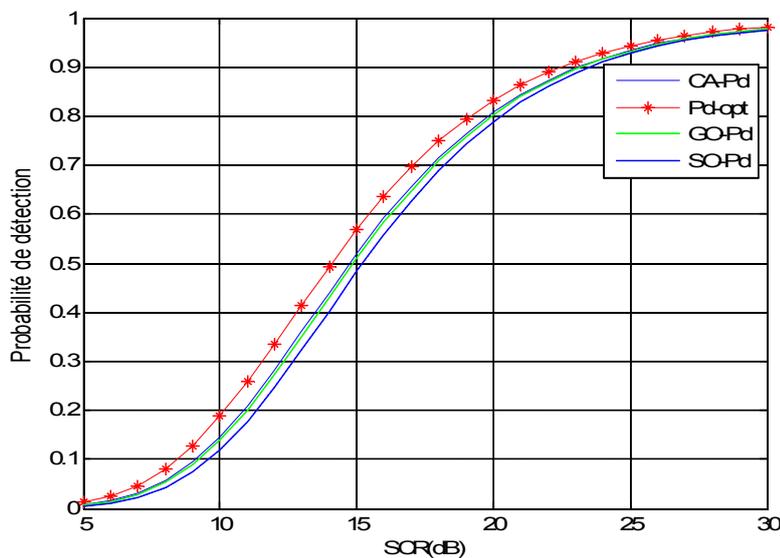


Figure IV.22: Comparaison CA, GO, SO-CFAR pour  $N=40$

# Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

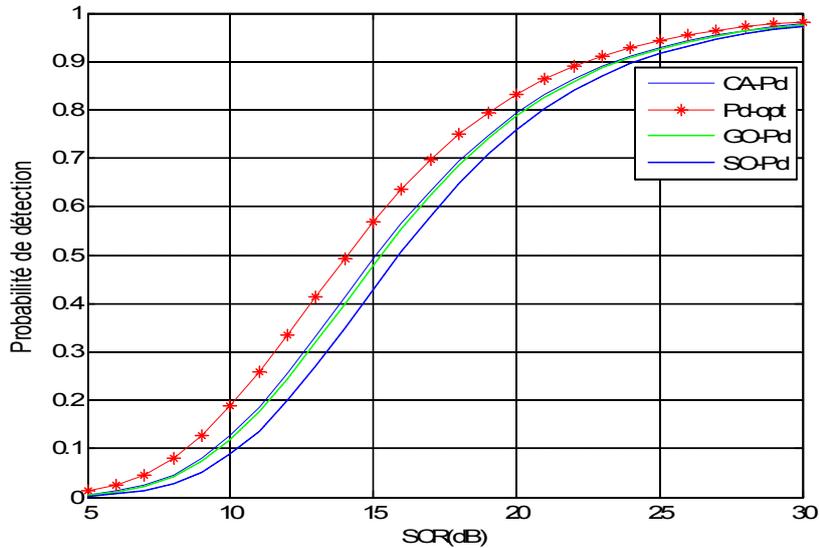


Figure IV.23: Comparaison CA, GO, SO-CFAR pour N=60

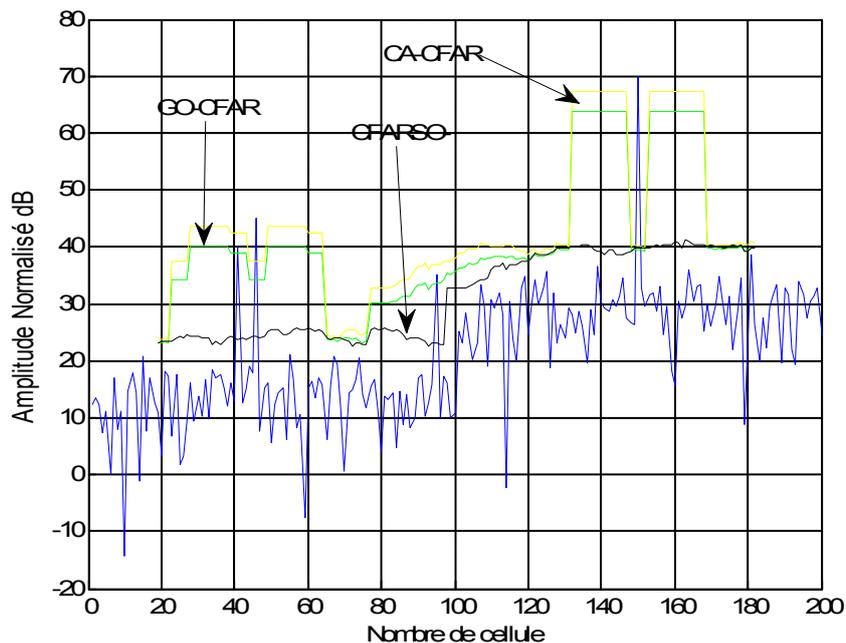


Figure IV.24 : Comparaison des seuils des différents détecteur CFAR

La figure IV.24 donne la variation des seuils de détection pour la situation de trois cibles avec deux cibles adjacentes où la plus faible cible est cachée par la plus forte. Les avantages de GO CFAR résident dans la faible puissance de calcul requise et des pertes cibles relativement faibles. Comparé au CA-CFAR, le traitement de l'environnement de fouillis non homogène est amélioré. Alors que les inconvénients sont l'efficacité globale encore faible et la

## Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats des détecteurs CFAR

---

possibilité (typique pour toutes les variantes du CA-CFAR) que deux cibles adjacentes puissent se couvrir mutuellement. Il y a aussi des problèmes lors d'un changement brusque des signaux de perturbation (par exemple, sur les bords des zones de fouillis fixes). D'autre part, le SO-CFAR utilise le même circuit que le GO-CFAR. La seule et unique différence est qu'au lieu de la plus grande valeur du signal de sortie des deux lignes à retard, la plus petite est utilisée. Le grand niveau du signal d'écho adjacent n'est donc généralement pas utilisé pour le calcul de la valeur du seuil. La possibilité que deux signaux cibles adjacents puissent se recouvrir est donc légèrement réduite.

### IV.5 Conclusion

Des méthodes adaptatives ont été adoptées dans la détection CFAR dans le but de déterminer le seuil optimal qui permet de perfectionner les systèmes de détection. Nous avons analysé et étudié différents détecteurs CFAR dans un fouillis d'environnement considéré homogène représenté par une distribution Rayleigh. On a choisi donc les détecteurs CA, GO, et le SO-CFAR pour déterminer la meilleure performance de chacun d'entre eux et cela dans différentes situations : la variation de  $N$  (nombre de cellules) et la probabilité de fausse alarme  $P_{fa}$  en fonction du rapport SNR.

## *Conclusion Générale*

# Conclusion Générale

---

## Conclusion générale

Le concept de détection CFAR (Constant False Alarm Rate) permet donc de détecter des cibles noyées dans des signaux parasites, cela en estimant le niveau du bruit qui permettra d'adapter le seuil de détection à la variation du bruit pour maintenir un taux de fausse alarme constant.

Dans cette étude, nous avons analysé les performances de trois types de détecteurs CFAR : le CA-CFAR, le GO-CFAR et le SO-CFAR dans un clutter de mer de milieu homogène avec une distribution Rayleigh. Le détecteur CA-CFAR fait l'estimation du niveau du fouillis par la moyenne arithmétique des échantillons. Les détecteurs GO-CFAR et SO-CFAR utilisent respectivement les maximums et les minimums des deux fenêtres qui se trouvent des deux côtés de la cellule sous test.

L'objectif étant d'obtenir les meilleurs résultats possibles pour chaque détecteur CFAR en variant à chaque fois la probabilité de fausse alarme  $Pf_a$  ainsi que le nombre de cellules  $N$ , ce qui ramène le détecteur à converger vers un détecteur optimal. L'interprétation des résultats obtenus sous logiciel MATLAB a été basée sur une comparaison détaillée suivant la variation de  $N$ , de la  $Pf_a$  ainsi que la variation signal sur clutter SCR.

Le travail réalisé peut être amélioré par différentes manières afin de déterminer la probabilité de détections optimales ou quasi optimales, d'une autre manière un modèle mathématique d'optimisation peut être suggéré afin de réaliser une bonne détection. Cependant l'une des manières la plus efficace est de trouver les paramètres judicieux tels que la probabilité de fausse alarme et aussi le nombre  $N$  de cellules sous test. En effet la résolution de ce problème nécessite des algorithmes d'optimisation très pointus. Nous proposons comme perspective un algorithme génétique qui a pour rôle la recherche de ses valeurs en introduisant une fonction objectif comportant la probabilité de détection.

## ***Bibliographie***

[1] [www.storyboardthat.com/fr/innovations/radar](http://www.storyboardthat.com/fr/innovations/radar)

[2] GHALEB Antoine. “*Analyse des micro-Doppler de cibles mobiles déformables en imagerie radar*”. Université Télécom Paris Tech, 2009.

[3] [Www.Radartutorial.Eu](http://Www.Radartutorial.Eu) .

[4] MANGINI Geoffroy. “*Etude d’un radar cohérent fonctionnant en mode pulsé : application à la surveillance maritime* ”. Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc, 2013.

[5] KRATTOU Mohamed Riad. “*Etude De la Détection Radar Dans Un Milieu Homogène*”. Université De Tlemcen, 2013.

[6] BAADECHE Mohamed. “*Performances des Détecteurs CFAR dans des Environnements Gaussiens et non-Gaussiens*”. Université Des Frères MENTOURI Constantine ,2016.

[7] BOUDAMOUZ Brahim. “*Contribution à l’étude de nouvelles techniques de radar MIMO pour la détection de cibles en contexte urbain (à l’intérieur des bâtiments)* ”. Université De Toulouse, 2013.

[8] ABDOU Latifa. “*Application des algorithmes évolutionnaires à l’optimisation du seuil de détection dans les systèmes distribués CFAR*”. Université de Batna, 2009.

[9] KHAMASSI Seifeddine. “*Etude sur les systèmes radar de contrôle aérien et développement d’un outil de décryptage ASTERIX* ”. Université Virtuelle de Tunis, 2015.

- [10] COSQUER Ronan. “*Conception d’un sondeur de canal MIMO caractérisation du canal de propagation d’un point de vue directionnel et doublement directionnel*”. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2004.
- [11] ACHBI Said., ABADLI A.Moutaleb. “*Analyse des performances des détecteurs CA,OS et ML-CFAR dans un clutter de distribution Weibull*”. Université Mohamed khider Biskra ,2007.
- [12] JORIS Derksen. “*A study of radar performance assessment accuracy sensitivity to the resolution of atmospheric input data case studies of North Sea environments*”. Delft University of Technology, 2016.
- [13]Mr S.MEGUELATI. “*Cours Radar*”, Université de Blida ,5ème Année Ingénieur, Département Aéronautique (Option : Installation), Année : 2009/2010.
- [14]GOY Philippe. “*Détection d’obstacles et de cibles de collision par un radar FMCW aéroporté*”. Université Toulouse, 2012.
- [15] CHABBI Souad. “*Détection adaptative CFAR a censure automatique basée sur les statistiques d’ordre en milieux non gaussiens*”. Université Mentouri Constantine ,2008.
- [16] MESSALI Zoubeida. “*Performances des détecteurs distribués CFAR dans un clutter  $\alpha$ -Stable basés sur des méthodes de prétraitement : la transformée en ondelettes et la compression non linéaire*”. Université de Constantine ,2009.
- [17]G.Pailloux. “*Estimation structurée de la covariance du bruit en détection adaptative*”. Université Paris Ouest, 2010.
- [18] M.Guida, M.Longo, and M.Lops. “*Biparametric linear estimation for CFAR against Weibull clutter*”. IEEE Trans. Aerospace. Electron. Syst., 28(1):138-151, 1992.

- [19] M.Guida, M.Longo, and M.Lops. “*Biparametric CFAR procedures for lognormal clutter*”. IEEE Trans. Aerospace. Electron. Syst., 29(3):798-809, 1993.
- [20] G.Gigli, G.Lamprapoulos. “*A new maximum likelihood generalized Gamma CFAR detector*”. In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium., pages 3399-3401, Toronto, Canada, 2002.
- [21]G.V.Weinberg. “*Constant false alarm rate detectors for Pareto clutter models*”. IET Radar Sonar Navig., 7(2):153-163,2013.
- [22] SEKSAF Abdeldjabar. “*Optimisation du Seuil de détection dans les systèmes distribués CFAR par Essaims de Particules (OEP)* ”. Université Mohamed Khider Biskra, 2015.
- [23] Finn, H.M., Johnson, R.S. “*Adaptive Detection Mode with Threshold Control ASA Function of Spatially Sampled Clutter-Level Estimates*”. RCA Review, 1968.
- [24]Hansen, V.G. “*Constant false Alarm Rate Processing in Search Radars*”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1973.
- [25] Trunk, G.V. “*Range Resolution of Targets Using Automatic Detectors*”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1987.
- [26] P.P.GANDHI., S.A.KASSAM. “*Analysis of CFAR Processors In non homogeneous Back ground*”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System 1988.
- [27] B.O.STEENSON. “*Detection Performance of a Mean-Level Threshold*”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System 1968.

[28] Hansen. V.G., J.H .Sawyers. “Detectability loss due to greatest of selection in a cell averaging CFAR”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic system 1980.

## **Résumé**

Le terme radar signifie la détection et la localisation d'un objet à distance à partir du signal rétrodiffusé par un objet qu'il soit fixe ou mobile. Il est utilisé notamment dans beaucoup d'applications dans le secteur militaire (la marine, le téléguidage, la surveillance aérienne...), mais aussi dans le domaine civil tels que la météorologie, le contrôle routier...etc. Le signal reçu par le radar à partir des objets détectés est généralement suivi d'obstacles indésirables ou fausses alarmes pouvant gêner leur détection. Il faut donc tenir compte de plusieurs caractéristiques de la cible et de les distinguer de ces interférences pour avoir une meilleure détection possible. L'objectif premier dans la détection radar est donc de concevoir une structure optimale du récepteur suivant quelques critères déterminés par le type de l'environnement où se trouve la cible à détecter. Le but de notre travail est d'analyser les performances du radar dans un milieu homogène.

Mots clés : radar, fausse alarme, clutter, homogène.

## **Abstract**

The term radar means the detection and localization of an object remotely from the signal backscattered by an object whether fixed or mobile. It is used in many applications in the military sector (navy, remote control, aerial surveillance ...), but also in the civil field such as meteorology, roadside control ... etc. The signal received by the radar from the detected objects is generally followed by undesirable obstacles or false alarms that can hinder their detection. It is necessary to take into account several characteristics of the target and to distinguish them from these interferences to have a better possible detection. The prime objective in radar detection is therefore to design an optimal receiver structure according to some criteria determined by the type of environment in which the target to be detected is located. The purpose of our work is to analyze the performance of the radar in a homogeneous medium.

Key words: radar, false alarm, clutter, homogeneous.