

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid  
Tlemcen - Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

**UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEN**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE**

**Mémoire pour l'obtention**

**du diplôme de Master en :**

***Réseaux et Systèmes de Télécommunications (RST)***

**Thème :**

---

# **Calcul de la Probabilité de Détection pour les Systèmes Radar par Intégration Numérique**

Soutenu en juin 2014

**Présenter par :**

M. BAUCHE Mohamed Amine

Devant le Jury :

**Président :** M. BENDIMERAD Fethi Tarik

**Examineur :** M. BENADDA Belkacem

**Examineur :** M. ABDELMALEK Abdelhafid

**Encadreur :** M. DJENNAS Sidi Ahmed

*Année Universitaire 2013/2014*

# **Dédicace**

A ma famille

A tous mes amis

Pour vous je dédie ce travail

## **Remerciements**

*Tout d'abord je dois remercier ALLAH qui m'a donné la santé et la volonté durant la réalisation de ce mémoire.*

*Puis je voudrais remercier mon Encadreur M. DJENNAS Sidi Ahmed, enseignant à l'université de Tlemcen, pour son aide et pour la confiance qu'il a mis en moi, qu'il trouve ici toute ma gratitude et surtout ma parfaite considération pour l'intérêt qu'il a portait pour ce travail. Je tiens aussi à remercier les membres du Jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail. Leur présence nous a honorés.*

*Mes remerciements vont également à mes chers parents et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.*

**Résumé :**

Depuis leur apparition les radars ont gagné un vaste champ d'application et ont connu de grandes avancées. Ces dispositifs sont essentiellement destinés à la détection et à la télémétrie. La détection sera au cœur même de l'étude proposée avec des modèles pour son calcul numérique. En effet le calcul de la probabilité de détection sachant une certaine probabilité de fausse alerte est d'une complexité évidente ; ce qui nous oblige à passer par le calcul numérique approché. Ceci sera réalisé à l'aide d'un module de calcul basé sur l'intégration numérique.

**Mots clés :**

Radar, détection, probabilité.

# Sommaire

## Introduction Générale

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Notions de Base sur les Radars

I. 1. Introduction.....	6
I. 2. Principe de fonctionnement.....	7
I. 2. 1. Description du radar.....	7
I. 2. 2. Détection et localisation.....	7
I. 2. 3. Perturbations dues au bruit.....	9
I. 3. Notion sur les performances des radars.....	10
I. 3. 1. Portée.....	10
I. 3. 2. Localisation en angle.....	10
I. 3. 3. Localisation en distance.....	10
I. 3. 4. Résolution en distance.....	11
I. 4. Equation des radars.....	12
I. 5. Surface réfléchissante effective.....	12
I. 6. Paramètres de radar.....	13
I. 7. Composantes d'un système radar.....	14
I. 8. Classification des systèmes radar.....	15
I. 8. 1. Radar primaire.....	15
I. 8. 2. Radar secondaire.....	16
I. 8. 3. Comparaison entre radar secondaire et primaire.....	16
I. 9. Radar Doppler.....	17
I. 10. Radar bistatique.....	18
I. 11. Radar imageur et Radar non imageur.....	18
I. 12. Applications des radars.....	19
I. 12. 1. Surveillance.....	19
I. 12. 2. Altimétrie.....	19
I. 12. 3. Mesure de niveau.....	19

<b>I. 13. Perturbations à l'exploitation du primaire</b> .....	19
<b>I. 13. 1. Masque</b> .....	19
<b>I. 13. 2. Fausses alarmes (faux échos)</b> .....	20
<b>I. 14. Radar secondaire et ses évolutions</b> .....	20
<b>I. 15. Principe des traitements</b> .....	20
<b>I. 16. Problèmes en radar secondaire</b> .....	21
<b>I. 16. 1. Réponse sur lobes secondaires</b> .....	21
<b>I. 16. 2. Trajets multiples</b> .....	22
<b>I. 16. 3. Réponses asynchrones</b> .....	23
<b>I. 16. 4. Enchevêtrement des réponses (Garbling)</b> .....	23
<b>I. 17. Radar monimpulsion</b> .....	23
<b>I. 18. Conclusion</b> .....	25

## **Chapitre II : Détection pour les Systèmes Radar**

<b>II. 1. Introduction</b> .....	27
<b>II. 2. Détection en présence de bruit</b> .....	27
<b>II. 3. Probabilité de fausse alerte</b> .....	32
<b>II. 4. Probabilité de détection</b> .....	33
<b>II. 5. Intégration d'impulsion</b> .....	34
<b>II. 6. Intégration cohérente</b> .....	35
<b>II. 7. Intégration non-cohérente</b> .....	36
<b>II. 8. Facteur d'amélioration et perte d'intégration</b> .....	38
<b>II. 9. Conclusion</b> .....	39

## **Chapitre III : Simulations et Résultats**

<b>III. 1. Introduction</b> .....	41
<b>III. 2. Rappel</b> .....	41
<b>III. 3. Présentation de l'algorithme</b> .....	42
<b>III. 4. Résultats de simulations</b> .....	43

<b>III. 4. 1. Convergence</b> .....	43
<b>III. 4. 2. Variation</b> .....	45
<b>III. 4. 3. Evolution 3D</b> .....	47
<b>III. 5. Conclusion</b> .....	48

## **Conclusion Générale**

<b>Conclusion Générale</b> .....	50
----------------------------------	----

## **Références**

<b>Références</b> .....	54
-------------------------	----



# Introduction Générale

## Introduction Générale

Le radar est un système qui utilise les ondes radio pour détecter et déterminer la distance et la vitesse d'objets tels que les avions, bateaux, ou encore la pluie. Un émetteur envoie des ondes radio, qui sont réfléchies par la cible et détectées par un récepteur. La position est estimée grâce au temps de retour du signal et la vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par effet Doppler.

Le radar est utilisé dans de nombreux contextes essentiellement pour le contrôle du trafic aérien. On distingue deux types de radar qui sont utilisés en contrôle aérien, le radar primaire de surveillance PSR (Primary Surveillance Radar) et le radar secondaire de surveillance ou SSR (Secondary Surveillance Radar).

Le radar secondaire SSR, est un dispositif de contrôle aérien qui interroge le ciel. L'émetteur envoie à l'aéronef des impulsions hyperfréquences codées. L'aéronef équipé d'un transpondeur répond à la demande du SSR. Le récepteur du SSR analyse les informations contenues dans la réponse de l'aéronef. Les SSR permettent de connaître la position, l'altitude, l'identité des aéronefs et l'azimut. Le SSR a plusieurs avantages qui lui sont propres, seuls les avions équipés seront visualisés, les obstacles ou les oiseaux n'apparaîtront pas, évitant ainsi une pollution visuelle. Un autre avantage est le fait que des données peuvent être transmises au système radar. Les données dépendent du mode du transpondeur utilisé par l'avion, et des capacités de l'antenne radar.

Le SSR a été amélioré pour un usage civil, et a donné naissance aux transpondeurs. Suivant le mode utilisé, l'opérateur radar au sol peut identifier un appareil par un code attribué à l'avance. Les transpondeurs des avions qui sont à sa portée lui répondent. Les réponses des avions sont capturées par l'antenne du radar secondaire, sont analysées et traitées électroniquement et par la suite visualisées sur les écrans des contrôleurs aériens. Plusieurs problèmes affrontent le développement du Radar

SSR. Parmi ces problèmes on cite : l'enchevêtrement des réponses (GARBLING) et les réponses sur lobes secondaires.

Les chercheurs et les concepteurs s'intéressent aux réponses des transpondeurs et comment peut-on avoir une seule détection correcte sur l'écran au lieu de trois ou plus. Pour résoudre ce problème on procède suivant une modélisation afin de minimiser les lobes secondaires au niveau du radar pour ensuite les supprimer au niveau de transpondeur et avoir un lobe principal le plus important possible. Dans la littérature des études ont été faites dans le but de supprimer les lobes secondaires dans les différents types de radar et spécialement en SSR pour garantir une probabilité nulle d'avoir de fausses détections. La méthode utilisée pour diffuser le faisceau radar est celui des antennes réseau à commande de phase qui ont été utilisées en premier ; durant la deuxième guerre mondiale mais les limitations de l'électronique du temps n'ont pas permis d'avoir des résultats de bonne résolution. Dans ce système, on divise le guide d'onde venant de l'émetteur en un très grand nombre de sous-guides d'onde. Ces derniers se terminent chacun par une fente sur une plaque faisant face à une direction et on contrôle la phase de l'onde passant dans chacune de ces fentes.

Il faut dire que le radar représente un sujet très vaste dont on ne peut citer toutes les connaissances. Néanmoins nous avons donné quelques généralités pour inciter le lecteur à approfondir ces notions pour être plus près du travail que nous allons réaliser.

Ce mémoire entre dans le cadre de la détection qui est l'un des piliers des systèmes radar puisque elle constitue les yeux au sens figuré de ces systèmes qui leurs permettent de voir l'environnement et de différencier les objets. Ce même mémoire sera composé de trois chapitres dont le premier qui sera consacré à quelques notions de base sur le radar. Ces notions englobent entre autres la composition des systèmes

radar, leurs utilisations, leurs limitations et contraintes, etc. Sur le même sujet, nous parlerons du principe de fonctionnement des systèmes radar et des différentes parties des radars primaires et secondaires. Dans ce même chapitre nous allons donner quelques définitions ainsi que la classification des différents types de radar et leurs applications. Nous parlerons aussi des différentes évolutions qui les ont accompagnées depuis leur apparition ainsi que les problèmes qui font obstacle à leur bon fonctionnement.

Le deuxième chapitre quant à lui, il est plus ciblant où nous entamerons la détection sous ses différents aspects. Nous exprimerons les différentes probabilités qui caractérisent cette détection et leur interaction. De la même manière nous donnerons quelques modèles approchés pour le calcul numérique de ces probabilités qui sont très complexes avec des expressions très lourdes. Nous exposerons aussi dans ce chapitre les différentes techniques utilisées pour l'amélioration de la détection et la minimisation du rapport signal sur bruit. Notre base de travail sera exclusivement un modèle intégrale pour le calcul de la probabilité de détection. Celui-ci sera intégré dans un module de calcul numérique dont les résultats des différentes simulations seront illustrés dans le troisième et dernier chapitre. Ce troisième chapitre renfermera un certain nombre de résultats, les plus significatifs, avec des commentaires et des explications.

# **Chapitre I :**

# **Notions de Base**

# **sur les Radars**

## I. 1. Introduction

Le terme RADAR est l'acronyme *Radio Detection And Ranging*, adopté par la marine américaine en 1945, que l'on peut traduire par : détection et estimation de la distance par ondes radio. Le développement du radar est dû en grande partie à la révélation technologique qui a pris place au 20<sup>ème</sup> siècle, et durant la deuxième guerre mondiale. Il a connu un progrès rapide et continu. Dans le temps moderne, l'utilisation du radar est plus vaste non seulement dans le domaine militaire mais aussi civil, même aussi spatial. Si on décompose le sens du mot Radar, on peut définir :

- Radio : les radars fonctionnent à des fréquences comprises entre 3 MHz (ondes de surface ou par réflexion ionosphère) et 100 GHz (courtes portées).
- Détection : des seules cibles utiles, définies par les spécifications de besoin des utilisateurs, donc avec rejet des signaux parasites après identification.
- And : simultanément.
- Ranging : localisation des cibles en quatre dimensions : Site, Gisement, Distance, Vitesse radiale).

Les principaux domaines d'utilisations du radar sont :

- Émettre un signal hyperfréquences (radio) vers une scène.
- Capter le signal rétrodiffusé de la scène.
- Enregistrer l'intensité (détection) du signal de retour et le délai entre ce dernier et le signal émis (télémétrie).

Le RADAR est donc un instrument d'alerte (détection) et de mesure (localisation).

Dans cette deuxième fonction, deux caractéristiques sont essentielles :

- précision, incertitude sur la valeur exacte de chaque paramètre de localisation.
- pouvoir séparateur, ou résolution : possibilité de distinguer et de localiser séparément plusieurs cibles.

Détection et localisation doivent être obtenues dans un cadre espace – temps :

- le volume surveillé (dans les quatre dimensions).
- la cadence à laquelle cette surveillance doit être renouvelée.

Dans ce premier chapitre nous allons aborder le radar sous l'aspect généralités afin de donner un maximum de connaissance au lecteur pour qu'il puisse se mettre dans le sujet et qu'il acquière les outils nécessaires pour pouvoir cadrer le problème.

## I. 2. Principe de fonctionnement

### I. 2. 1. Description du radar

La variation de la fréquence du signal sert à déterminer la vitesse relative de l'obstacle par rapport à la source (effet Doppler). La direction dans laquelle se trouve l'obstacle est obtenue en pointant une antenne à faisceau étroit dans la direction donnant le plus grand signal réfléchi. Le schéma de principe d'un radar est donné sur la figure (I. 1), dans laquelle sont représentés symboliquement tous les termes qui le caractérisent.

Les systèmes radar sont très largement traités dans des ouvrages spécialisés. Le radar fait usage de l'écho produit par un obstacle situé sur la trajectoire d'une onde électromagnétique. Dans la majorité des cas, l'émetteur et le récepteur sont connectés à une antenne commune. Le temps qu'il faut à une onde électromagnétique pour aller de l'émetteur à l'obstacle, puis de l'obstacle au récepteur est mesuré et permet de calculer la distance  $R$  qui les sépare [1]-[4].

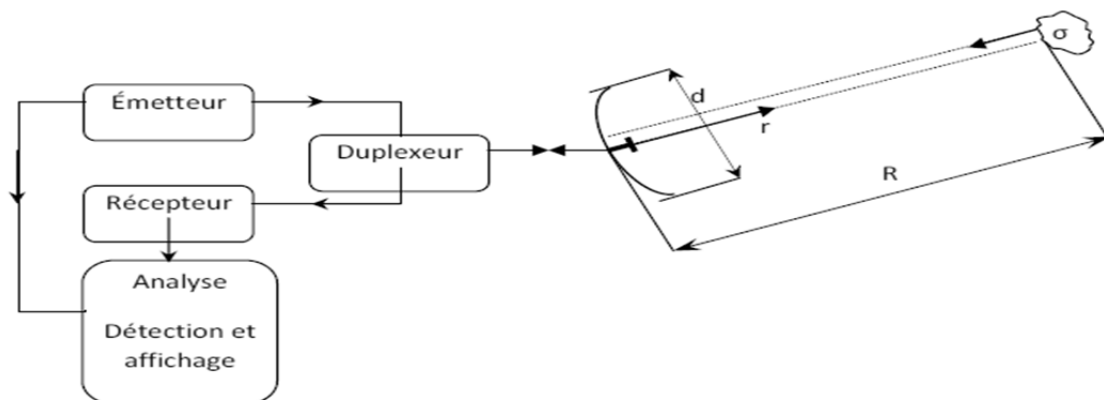


Figure I. 1 : Présentation schématique d'un système radar.

### I. 2. 2. Détection et localisation

Un émetteur rayonne un signal bref et un récepteur recueille l'écho engendré par la cible. Les radars les plus couramment employés pour la mesure de la distance font usage de brèves impulsions de durée de signal hyperfréquence qui sont émises avec une fréquence de répétition  $f_r$ . Cette méthode permet d'obtenir un signal hyperfréquences de haute puissance en utilisant une puissance moyenne raisonnable.

L'onde émise parcourt la distance  $R$  qui sépare l'émetteur de l'obstacle, puis revient vers le radar après un temps  $t_{ar}$  comme le montre la figure (I. 2). Comme il s'agit d'une onde électromagnétique se déplaçant à la vitesse de la lumière  $C$ , on trouve la distance  $R$  par la relation [1]-[4] :

$$R = \frac{C t_{ar}}{2}$$

Avec :

$R$  = distance [m]

$t_{ar}$  = temps mesuré [s]

$C$  = vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  m/s

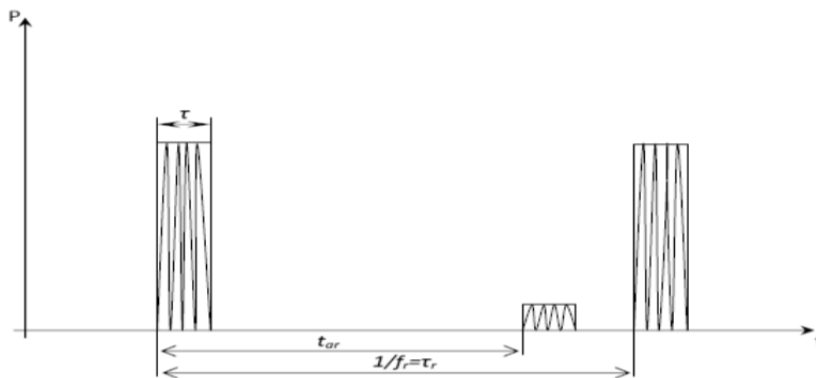


Figure I. 2 : Principe du radar à impulsions

La fréquence Doppler est positive quand observateur et source se rapprochent, et négative quand ils s'éloignent. Comme le montre la figure (I. 3), dans le cas du radar, la cible est l'observateur à l'illumination et perçoit donc  $f_0 + f_d$ , et réémet à la même fréquence vers le radar qui devient l'observateur et perçoit donc  $f_0 + 2 \cdot f_d$ . La fréquence Doppler affectant l'écho est donc égale à :

$$f_d = \frac{2 V_r}{\lambda}$$

$V_r$  : vitesse radiale de la cible.

$\lambda$  : longueur d'onde.

$f_d$  : fréquence Doppler.



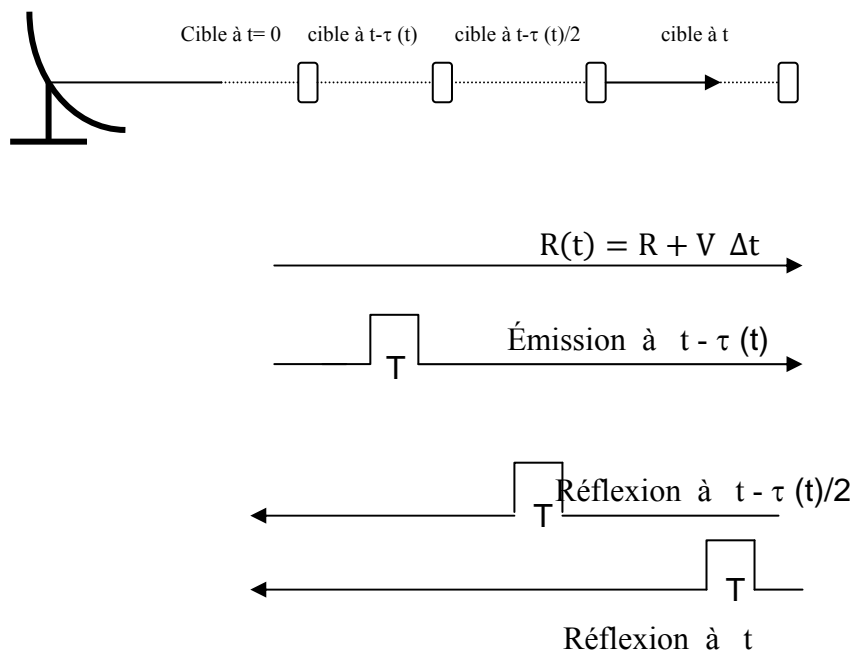


Figure I. 3 : Principe de l'émission/réflexion sur une cible

### I. 2. 3. Perturbations dues au bruit

Le récepteur génère un bruit propre, évalué par son facteur de bruit. Des sources extérieures sont constituées par les étoiles (radioastronomie) et des émissions, volontaires ou non, de signaux parasites. Le signal correspondant est aléatoire, généralement décrit comme gaussien, centré (valeur moyenne nulle) et blanc (spectre limité). C'est un vecteur dont l'amplitude est distribuée suivant une loi de Rayleigh et dont la phase est équiprobable.

Les échos parasites apparaissent de façon aléatoire, mais ne constituent pas toujours un bruit blanc suivant le domaine concerné.

L'écho utile s'ajoute au bruit. Pour détecter un écho, il faut éviter de :

- prendre une pointe de bruit pour un écho, ce qui provoque une fausse alarme.
- décider qu'il s'agit d'un bruit seul, alors qu'un écho a été reçu, manque de détection.

Le critère est constitué par le franchissement d'un seuil, fixé pour que la probabilité de dépassement par le bruit seul (probabilité de fausse alarme) soit très faible.

### I. 3. Notion sur les performances des radars

#### I. 3. 1. Portée

On appelle portée d'un radar, la distance maximale à laquelle on peut détecter ou poursuivre une cible donnée. La distance est obtenue en général par la mesure de délai entre l'émission et la réception de l'impulsion.

#### I. 3. 2. Localisation en angle

La directivité de l'antenne émettrice permet d'effectuer une localisation angulaire. L'antenne n'émet que dans un domaine angulaire restreint. Suivant l'écart relatif entre la direction vers laquelle est pointée l'antenne et celle de l'obstacle, l'intensité de l'écho capté varie et passe par un maximum lorsque ces deux directions sont confondues (Figure (I. 4)).

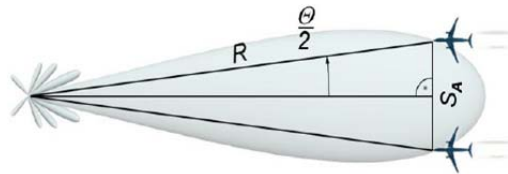


Figure I. 4 : résolution angulaire

Une remarque importante s'impose immédiatement : plus le lobe est étroit, plus la directivité de l'antenne est importante. La résolution angulaire rapportée à une distance entre deux cibles peut être calculée par la formule suivante :

$$S_A \geq 2 R \sin \theta/2$$

$S_A$  : distance entre deux cibles.

$R$  : distance qui sépare l'antenne de la cible.

$\theta$  : écart angulaire entre deux cibles.

#### I. 3. 3. Localisation en distance

Le retard dans la réception du signal retour permet d'opérer une localisation en distance (voir figure (I. 5)).

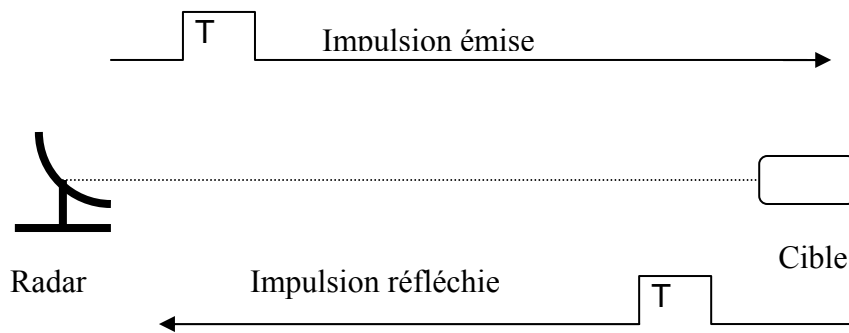


Figure I. 5 : Localisation en distance

L'impulsion revient après un temps :

$$\Delta t = \frac{2 R}{c}$$

Où :

- R est la distance radar-cible
- $\Delta t$  est le temps aller-retour sur le trajet radar-cible.

#### I. 3. 4. Résolution en distance

La figure (I. 6) montre qu'on a deux cibles situées dans la même direction mais à distances voisines. Ces deux cibles ne peuvent être discriminées que par la longueur  $\lambda_r$  de l'impulsion.  $\lambda_r$  est appelée la résolution en distance radar. Cette résolution en distance dépend de la largeur de l'impulsion et donc de sa durée.

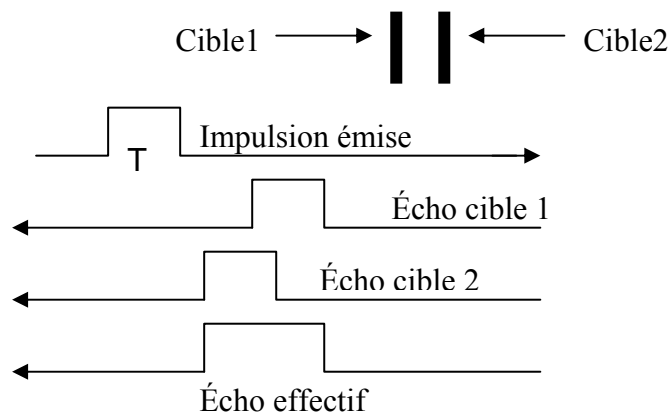


Figure I. 6 : Résolution en distance

#### I. 4. Equation des radars

L'émetteur fournit une puissance  $P_f$  à l'antenne, qui la rayonne dans l'espace en la concentrant dans une ou plusieurs directions privilégiées, effet qui est représenté par le gain de l'antenne  $G$ . La densité de puissance décroît proportionnellement à  $\frac{1}{4 \pi R^2}$ , où  $R$  est la distance à l'antenne. Une partie du signal atteint la cible, qui la réfléchit partiellement dans la direction de l'antenne.

La cible est représentée par sa surface réfléchissante effective  $\sigma$ . La densité de puissance réfléchie décroît à son tour inversement au carré de la distance [1]-[4]. L'antenne capte une partie du signal réfléchi. Elle est représentée par sa surface de captation  $A_e$ , elle-même liée au gain par le rapport :

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

Où :

$\lambda$  : est la longueur d'onde.

Le rapport entre la puissance reçue  $P_r$  et la puissance  $P_f$  fournie à l'antenne est donné par l'équation des radars :

$$\frac{P_r}{P_f} = G \frac{1}{4 \pi R^2} \sigma \frac{1}{4 \pi R^2} \frac{G \lambda^2}{4 \pi} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4 \pi)^3 R^4}$$

La puissance reçue est fournie au récepteur, également connecté à l'antenne. On néglige l'affaiblissement produit par les pertes atmosphériques.

#### I. 5. Surface réfléchissante effective

Un obstacle est caractérisé par sa surface réfléchissante effective  $\sigma$ , définie comme étant le quotient de la puissance réfléchie vers le radar par la densité de puissance incidente. La réflexion produite par l'obstacle peut, en théorie, être calculée au moyen des équations de Maxwell en présence des conditions aux limites de l'obstacle.

Les valeurs limitent présentées pour plusieurs géométries au tableau (I. 1), peuvent être employées en première approximation pour des objets grands par rapport à la longueur d'onde.

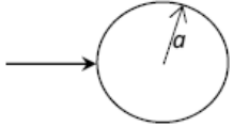

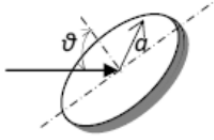
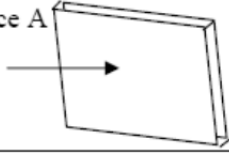
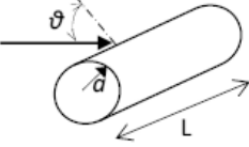
Cible		Surface réfléchissante effective $\sigma$ (limite optique)
Sphère		$\pi a^2$
Cône (Incidence axiale)		$\frac{\lambda^2 \text{tg}^2 \theta}{4\pi}$
Disque		$\pi a^2 \cot g \theta^2 \left( \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)$
Surface plane de grande dimension (incidence normale)	Surface A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

Tableau I. 1 : Valeur approchée de la surface réfléchissante effective d'une cible métallique

### I. 6. Paramètres de radar

On peut donner un certain nombre de paramètres du radar, qui sont :

- 1- la puissance  $P_f$  fournie par le générateur (W);
- 2- le gain de l'antenne  $G$ ;
- 3- la fréquence  $f$  (Ghz) ou la longueur d'onde (m);
- 4- la portée  $R_{\max}$  (m), qui est la distance maximale de détection;
- 5- la surface réfléchissante effective  $\sigma$  de la cible ( $m^2$ );
- 6- le rapport signal sur bruit ( $\frac{P_r}{N}$ ) minimum acceptable à l'entrée du récepteur ; grandeur spécifiée par le système d'analyse du signal;
- 7- la bande passante du récepteur  $B$  (Hz);
- 8- la température de bruit globale ramenée à l'entrée du récepteur ( $T_a + T_r$ ) en Kelvin.

Les trois premières grandeurs dépendent de l'émetteur, les trois dernières dépendent du récepteur. La portée et la surface réfléchissante effective définissent la cible à observer.

### **I. 7. Composantes d'un système radar**

Un radar est constitué de différentes composantes, à savoir [1]-[4] :

**Emetteur** : qui génère l'onde radio.

**Duplexeur** : commutateur électronique qui dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission ou le signal de retour depuis l'antenne vers le récepteur lors de la réception quand on utilise un radar mono-statique. Il permet donc d'utiliser la même antenne pour les deux fonctions : émission et réception. 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 d'une puissance de l'ordre de quelques nano-watts. Au cas où l'impulsion émise serait dirigée vers le récepteur, celui-ci serait instantanément détruit.

**Antenne radar** : Un conducteur parcouru par un courant électrique alternatif produit un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace environnant. Ainsi, un ensemble de conducteurs élémentaires, traversé par des courants variables puissants, forme une antenne radio éditrice. Selon l'alignement de ses conducteurs élémentaires, une antenne peut être plus ou moins directive.

L'antenne radar exploite les propriétés des ouvertures planes rectangulaires et diffuse l'onde électromagnétique vers la cible avec le minimum de perte. Sa vitesse de déplacement, rotation et/ou balancement, ainsi que sa position, en élévation comme en azimut, sont asservies, soit mécaniquement au moyen de moteur, soit électroniquement au moyen de pondération en amplitude et en phase.

**Récepteur** : Qui reçoit le signal incident (cible-antenne-guide d'ondes-duplexeur), le fait émergé des bruits radios parasites, l'amplifie et le traite.

**Etage de traitement de signal** : Permettant de traiter le signal brut afin d'en extraire des données utiles à l'opérateur (détection, suivi et identification de cible; extraction de paramètres météorologiques, océanographiques, etc.). Le tout est contrôlé par le système électronique du radar. Les données obtenues sont alors affichées aux utilisateurs.

## **I. 8. Classification des systèmes radar**

### **I. 8. 1. Radar primaire**

Un radar primaire émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés. Contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchi de son propre signal. Les radars primaires peuvent être de type deux dimensions (2D) donnant des mesures de distance et d'azimut ou trois dimensions (3D), une mesure complémentaire en angle de site (angle d'élévation dans le plan vertical) est alors disponible.

Pour les radars 2D, l'absence de toute mesure d'angle de site ne permet pas de discrimination en altitude. Ainsi, un avion comme un écho au sol ou un obstacle au sol dans le même azimut et à la même distance seront vus sans distinction. Sa fréquence varie entre 2.7 GHz et 3 GHz. On distingue deux types de radar primaire :

#### **a- Radars à impulsions**

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

#### **b- Radars à onde continue**

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

### **b. 1. Radars à onde continue non modulée**

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue ne permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par les forces de l'ordre pour les contrôles de vitesse sur les routes : cinémomètres radars.

### **b. 2. Radars à onde continue modulée**

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

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

## **I. 8. 2. Radar secondaire**

Avec ces radars, l'avion doit être équipé d'un transpondeur (transmetteur-répondeur) qui répond à l'interrogation du radar en générant un signal codé. Cette réponse peut contenir beaucoup plus d'informations que celles d'un radar primaire. Elle peut collecter par exemple l'altitude, un code d'identification, ou encore un rapport de problème à bord comme une panne totale des radiocommunications.

## **I. 8. 3. Comparaison entre radar secondaire et primaire**

Ces deux systèmes ont les avantages et les inconvénients des principes de fonctionnement qu'ils utilisent. Grâce au radar primaire, on obtiendra des informations fiables de direction, de hauteur et de distance de la cible, mais le radar secondaire pourra apporter des informations supplémentaires telles son identification ou encore son altitude. Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire



de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique). En effet, la puissance émise est un paramètre de l'équation du radar qui doit tenir compte du trajet de l'onde allé et retour dans le cas du radar primaire, mais uniquement d'un "aller simple" dans le cas du radar secondaire.

### I. 9. Radar Doppler

Quand un radar illumine un objet en mouvement, la fréquence du signal réfléchi est décalée par rapport à celle du signal incident d'une valeur proportionnelle à la vitesse radiale de l'objet [1]-[4]. C'est ce qu'on appelle l'effet Doppler, qu'on voit bien sur la figure (I. 7).

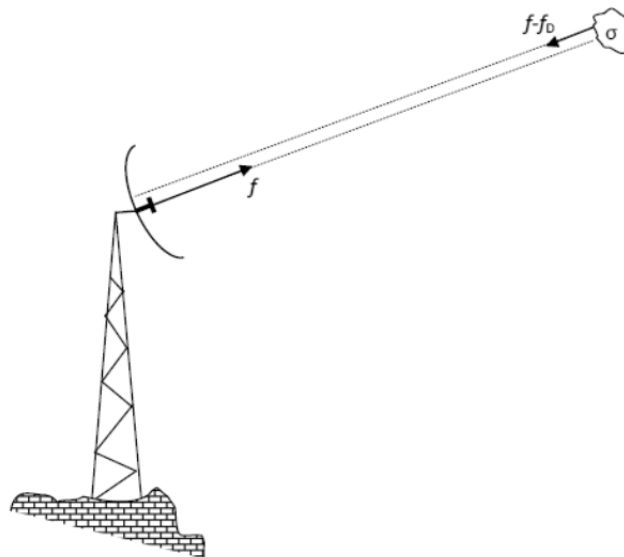


Figure I. 7 : Principe de l'effet Doppler.

Le radar Doppler sert à la mesure de la vitesse, notamment de véhicules dans le cadre de contrôles de police.

Le dispositif d'analyse doit séparer les échos de cibles mobiles de ceux provenant de cibles fixes ou se déplaçant très lentement (nuages). Cette séparation est effectuée par un filtre passe-haut ; les cibles fixes produisant un signal continu. La vitesse minimale que peut mesurer le système est limitée dans ce cas par la fréquence de coupure du filtre.

Pour des mesures précises de vitesse, il est indispensable que la fréquence fournie par le générateur soit très stable dans le temps. Il faut de plus que l'antenne de l'émetteur soit rigoureusement immobile. Si l'antenne vibre, sa propre fréquence de vibration est interprétée par le système comme une fréquence Doppler. Le radar voit alors tous les objets fixes comme s'ils étaient en mouvement, ce qui peut donner des résultats surprenants.

### **I. 10. Radar bistatique**

Un radar bistatique se compose de deux installations considérablement éloignée l'une de l'autre. L'un des sites abrite les équipements consacrés à l'émission, l'autre est consacré à la réception. Un tel radar utilise donc également deux antennes, une sur chaque site.

### **I. 11. Radar imageur et Radar non imageur**

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

Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars et les radioaltimètres. Ce type de radar est également appelé diffusmètre puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé. Les applications des radars secondaires non imageurs sont par exemple les dispositifs d'immobilisation antivols installés sur certains véhicules privés récents. Les radars couramment employés pour la surveillance aérienne et maritime comportent une antenne tournante. Le signal reçu est affiché souvent en coordonnées polaires sur un écran d'oscilloscope. On y voit directement, comme sur une carte de géographie, les obstacles et les aéronefs. Des écrans à rémanence permettent de distinguer les objets en mouvement des échos fixes.

## **I. 12. Applications des radars**

### **I. 12. 1. Surveillance**

Les radars de surveillance sont universellement utilisés dans l'aviation, la navigation et la surveillance de territoires [1]-[4]. Il faut citer notamment une série de radars de grande puissance et donc de grande portée.

### **I. 12. 2. Altimétrie**

Les altimètres classiques sont en fait des baromètres. Connaissant la pression locale et la pression au niveau de la mer, on peut déterminer l'altitude où l'on se trouve. A bord d'un avion, cette information n'est pas toujours suffisante. Des avions se sont en effet écrasés contre des montagnes, alors qu'ils volaient à la bonne altitude, mais au-dessus de la mauvaise topographie, suite notamment à des effets de dérive. L'altimètre à radar détermine directement l'altitude par rapport au sol. Il complète l'information donnée par l'instrument classique.

### **I. 12. 3. Mesure de niveau**

L'emploi de radars est particulièrement intéressant dans des environnements hostiles, poussiéreux, où ni les méthodes mécaniques (contact) ni les méthodes optiques (laser) ne sont satisfaisantes. Des appareils utilisant le principe du radar CHIRP permettent d'obtenir une précision de l'ordre du centimètre. Ils sont utilisés entre autres pour mesurer le niveau de métal en fusion dans des hauts fourneaux, celui de liquides corrosifs ou bien de minerais dans des mines.

## **I. 13. Perturbations à l'exploitation du radar**

### **I. 13. 1. Masque**

C'est l'effet classique de perte de détection derrière l'obstacle dû au masque physique à la propagation des ondes électromagnétiques. Cet effet est en réalité plus complexe à cause du phénomène de diffraction qui induit une courbure des trajets de propagation sur les bords et autorise une certaine visibilité dégradée derrière l'obstacle même. Les conséquences sont celui d'un affaiblissement des signaux en limite du volume masqué, allant jusqu'à la perte complète au centre de ce volume, derrière l'obstacle même. La configuration de l'obstacle au sol confine les difficultés

aux altitudes faibles. Sauf configurations particulières dues au relief, cette situation peut se rencontrer pour tout type d'obstacle. L'originalité est ici la hauteur et la finesse des structures étudiées qui favorisent l'effet de diffraction.

### **I. 13. 2. Fausses alarmes (faux échos)**

Plusieurs situations peuvent être à l'origine de la création de faux échos. Il peut s'agir de la réflexion du signal radar incident sur les surfaces de l'obstacle fixes ou mobiles. Il peut s'agir, beaucoup plus rarement, de la réflexion d'un signal à destination ou en provenance d'une cible utile. C'est un trajet multiple sur lequel les mesures de distance et d'azimut seront faussées. La génération de faux échos par réflexion sur les parties fixes de la structure est une situation classique d'échos fixes.

### **I. 14. Radar secondaire et ses évolutions**

Un des outils qui permettent aux contrôleurs aériens d'assurer la sécurité des avions en vol est le radar secondaire de surveillance (SSR). Ce radar ne détecte pas la réflexion d'un écho sur un avion comme le radar primaire, mais fonctionne sur un mode de questions-réponses. C'est la surveillance coopérative. Elle est assurée grâce à la participation active de la cible à la détection. Cette dernière est équipée d'un transpondeur. Ce transpondeur reçoit des interrogations du radar et répond. Les avions possèdent un transpondeur dont le but est de recevoir et de répondre aux requêtes du radar secondaire.

### **I. 15. Principe des traitements**

Nous citons ici quelques principes de traitements :

- Détection : Reconnaissance d'une structure de réponse émise uniquement par un transpondeur.
- Mesure de distance : C'est la mesure du temps de propagation des ondes radioélectriques en tenant compte du trajet aller-retour et du retard systématique introduit par le traitement du transpondeur.
- Mesure d'azimut : L'utilisation d'une antenne directive tournante permet de connaître la direction dans laquelle se trouve l'avion en mesurant la position de l'antenne par rapport au Nord Géographique.

- Identification et altitude de la cible : Ces deux fonctions sont permises grâce au décodage de la réponse du transpondeur.

## I. 16. Problèmes en radar secondaire

### I. 16. 1. Réponse sur lobes secondaires

Les lobes secondaires générés par l'antenne perturbent fortement l'exploitation du radar secondaire comme le montre la figure (I. 8) [1]-[4].

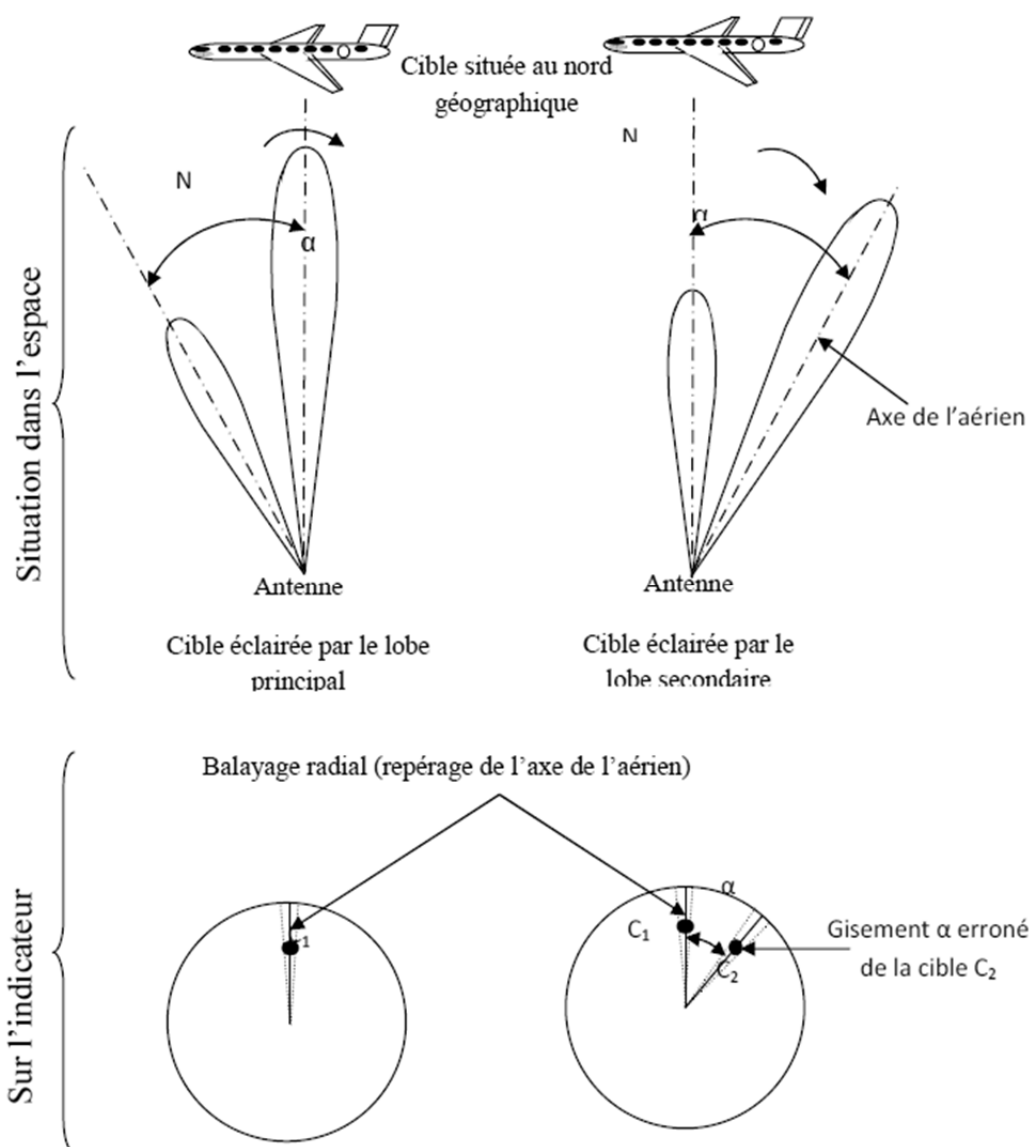


Figure I. 8 : Réponse sur lobes secondaires

La réflexion de l'onde émise par le radar sur un obstacle peut aller interroger un transpondeur qui n'est pas situé dans la direction du lobe principal de l'antenne. Cela se traduit par des avions fantômes sur l'écran du contrôleur.

### I. 16. 2. Trajets multiples

Pour lutter contre ce phénomène (figure I. 9), il est possible :

- D'améliorer la qualité des antennes ; principalement en direction des sites.
- D'utiliser des récepteurs à Gain Variable dans le Temps (GVT) numérique afin de diminuer la sensibilité du récepteur dans certaines directions dans lesquelles on a des obstacles réflecteurs. La couverture radar est alors divisée en secteurs azimutaux et à chaque secteur correspond une sensibilité propre.

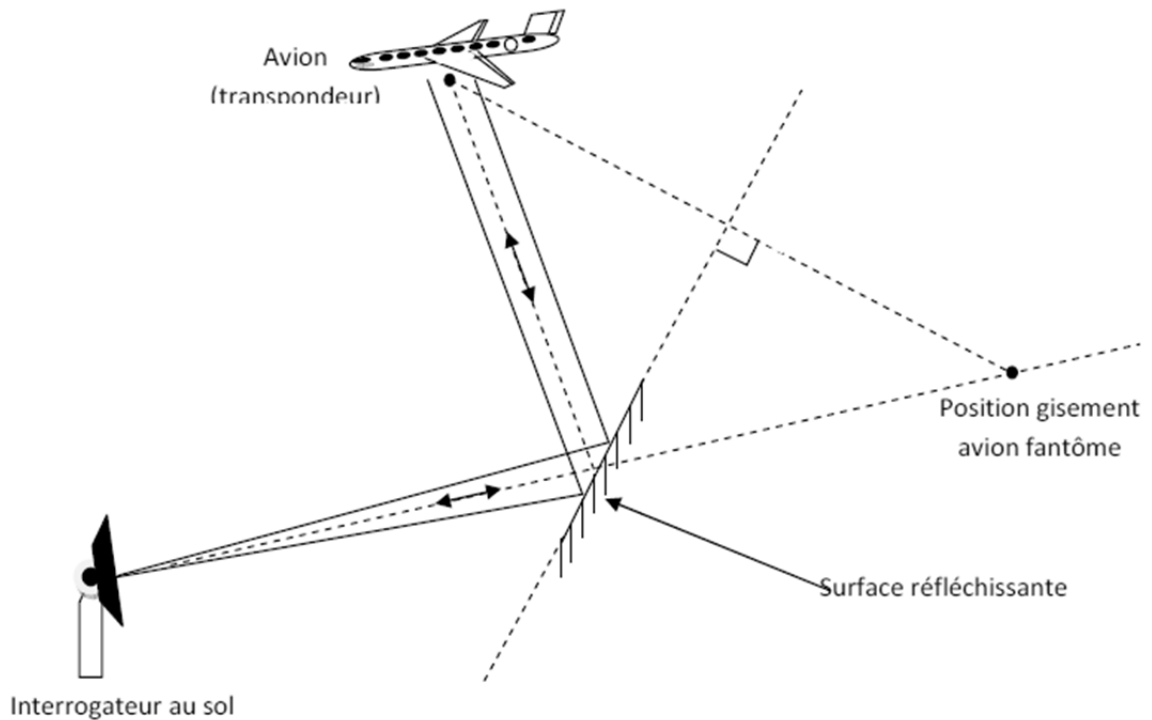


Figure I. 9 : Phénomène de trajets multiples

### I. 16. 3. Réponses asynchrones

Le phénomène est montré sur la figure (I. 10). Pour remédier à celui-ci, on peut :

- Régler la période de répétition à des valeurs légèrement différentes pour des radars proches.
- Faire un traitement de suppression des réponses sur lobes secondaires à la réception.

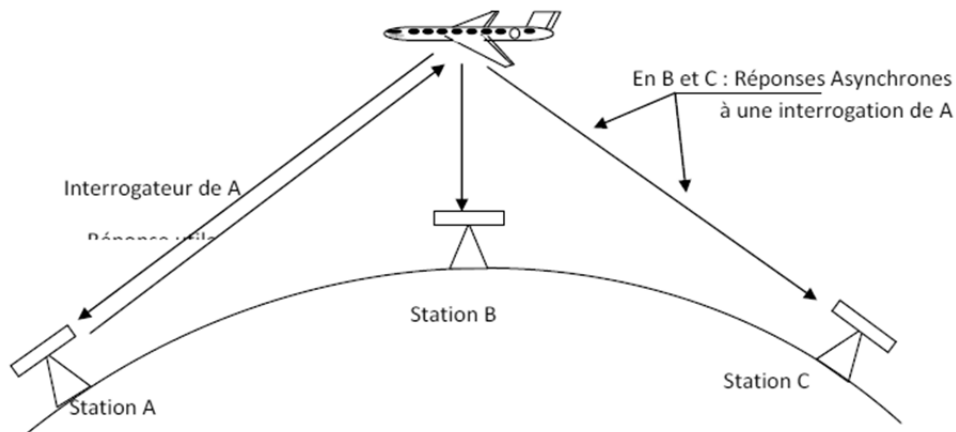


Figure I. 10 : Phénomène de réponses asynchrones

### I. 16. 4. Enchevêtrement des réponses (Garbling)

La séparation entre deux avions doit être de l'ordre de 3 Km ; ce qui correspond à la séparation de deux trains d'impulsions de longueur de 25  $\mu$ s. Le Garbling est le facteur limitatif le plus gênant pour le contrôle. Il peut subsister pendant plusieurs tours d'antenne successifs et entraîner des erreurs de poursuite radar (déclenchement de pistes radar). Pour résoudre ce problème plusieurs algorithmes ont été proposés pour séparer les réponses de plusieurs transpondeurs.

### I. 17. Radar monoimpulsion

L'idée du monoimpulsion consiste à exploiter la réponse d'une cible sur deux diagrammes différents afin de déduire la position exacte de la cible par une mesure des différences de phase ou d'amplitude des signaux reçus.

La mesure monoimpulsion est donc une mesure d'écart angulaire entre la direction de la réception et l'axe de l'antenne. Cette mesure se fait dans l'ouverture du lobe

principal du diagramme directif.

Au diagramme directif noté ( $\Sigma$ ) et appelé diagramme somme, est adjoint un diagramme supplémentaire noté ( $\Delta$ ) et appelé diagramme différence dont la pente est très forte de part et d'autre de l'axe (figure I. 11).

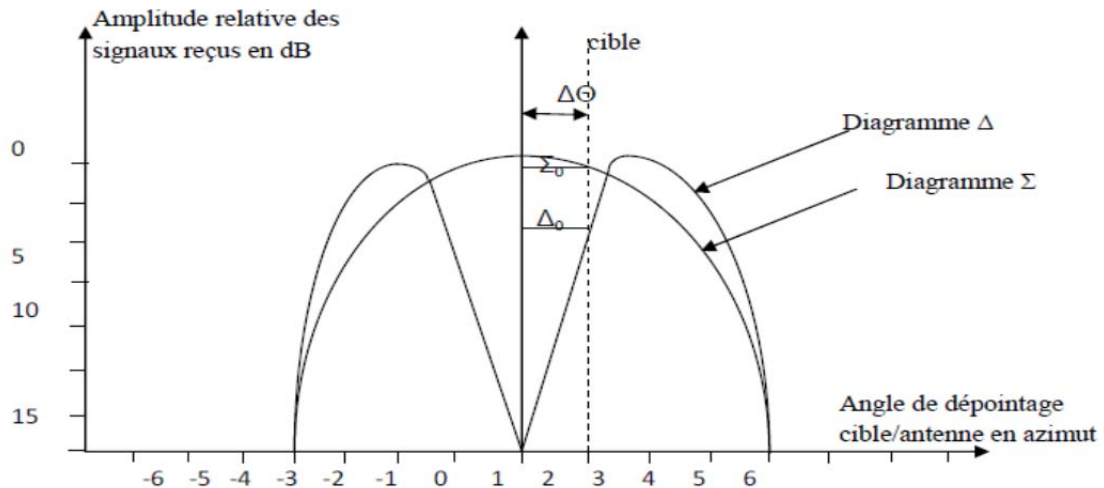


Figure I. 11 : Mesure d'écart angulaire entre la cible et l'axe d'antenne

Un signal reçu dans une direction, sera caractérisé par des niveaux  $\Sigma$  et  $\Delta$  sur les diagrammes ( $\Sigma$ ) et ( $\Delta$ ). Il reste à comparer  $\Delta$  par rapport à  $\Sigma$ , ce qui permettra ensuite d'obtenir  $\Theta$  par la fonction d'écartométrie :

$$f(\Theta) = \Delta / \Sigma.$$

Cela correspond à la caractéristique de l'antenne.

La mesure d'azimut (position de l'axe plus écart) peut se faire sur un seul signal ; donc dans l'application radar secondaire, sur une seule impulsion : d'où l'expression monoimpulsion.

**Avantage :**

- Réduction de la période de répétition  $T_r$ .
- Meilleure précision dans la mesure d'azimut.
- Démêlage (ou degarbling) possible grâce à l'information d'écartométrie : les impulsions d'un même code peuvent être regroupées si elles ont la même écartométrie. Il est ainsi possible de détecter dans la plupart des cas deux avions proches.



## **I. 18. Conclusion**

Pour bien conclure ce premier chapitre, nous pouvons dire que depuis leur apparition, les radars sont utilisés dans de nombreux domaines allant de la météorologie à l'astrométrie en passant par le contrôle routier et aérien.

L'invention du radar a ouvert la voie à l'obtention d'images radar à très haute résolution. La découverte de la transformée de Fourier rapide a pris tout son intérêt surtout lorsque l'informatique a commencé à devenir suffisamment performante. Cet algorithme est à la base de la plupart des traitements radar numériques d'aujourd'hui.

Un radar émet de puissantes ondes, produites par un oscillateur radio et transmises par une antenne. Bien que la puissance des ondes émises soit grande, l'amplitude du signal renvoyé est le plus souvent très petite. Néanmoins, les signaux radio sont facilement détectables électroniquement et peuvent être amplifiés de nombreuses fois. En analysant le signal réfléchi, il est possible de localiser et d'identifier l'objet responsable de la réflexion, ainsi que de calculer sa vitesse de déplacement grâce à l'effet Doppler. Le radar peut détecter des objets ayant une large gamme de propriétés réfléchives, alors que les autres types de signaux, tels que le son ou la lumière visible, revenant de ces objets, seraient trop faibles pour être détectés. De plus, les ondes radio peuvent se propager avec une faible atténuation à travers l'air et divers obstacles, tels les nuages, le brouillard ou la fumée, qui absorbent rapidement un signal lumineux. Cela rend possible la détection et le pistage dans des conditions qui paralysent les autres technologies.

La détection étant l'une des deux fonctions principales du radar avec la télémétrie, elle sera largement discutée dans le chapitre suivant.

# Chapitre II : Détection pour les Systèmes Radar

## II. 1. Introduction

La détection du signal réfléchi par une cible est entravée et limitée par la présence d'une variété de signaux indésirables; qu'ils soient internes ou externes, naturels ou artificiels. Tous ces signaux qui ne sont pas le signal espéré de la cible, seront considérés comme du bruit bien que certains d'entre eux n'ayant pas la nature aléatoire associée en générale au bruit. De plus, ces signaux sont considérés comme perturbateurs pour une certaine application, et utiles pour une autre. Un exemple est la réflexion par le sol ou écho atmosphérique qui constituent du bruit pour un radar de détection de cible aérienne mais qui seront des signaux très utiles pour le radar de cartographie de terrain ou pour le radar météorologique. Le bruit consiste en les composantes suivantes [3]-[4]:

- Bruit interne, en particulier le bruit thermique.
- Bruit externe naturel comme le bruit radiométrique.
- Bruit externe artificiel comme les signaux brouilleurs connus sous le nom de Contre Mesure Electronique (ECM) ainsi que l'interférence depuis d'autres radars.
- Faux échos créés par la réflexion des ondes transmises par le radar lui-même sur les surfaces réfléchissantes naturelles autour de la cible (sol, pluie, etc.)

Dans ce chapitre nous allons exposer la détection sous tous ses aspects. Nous allons définir les différentes probabilités liées à la détection ainsi que les méthodes employées pour son amélioration.

## II. 2. Détection en présence de bruit

Un diagramme bloc simplifié pour récepteur radar qui emploie un détecteur d'enveloppe suivi d'une décision à seuil est montré sur la figure (II. 1). Le signal à l'entrée du récepteur est composé du signal écho radar  $s(t)$  et d'un bruit Gaussien additif blanc  $n(t)$  à moyenne nulle et variance  $\Psi^2$  [3].

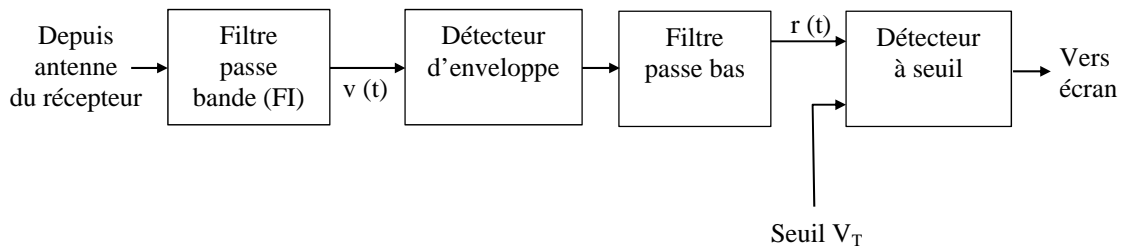


Figure II. 1 : diagramme bloc simplifié d'un détecteur d'enveloppe et récepteur à seuil

Le bruit d'entrée est supposé spatialement incohérent est non corrélé avec le signal utile. La sortie du filtre passe bande est le signal  $v(t)$ , qui peut être exprimé par [3] :

$$v(t) = v_I(t) \cos(\omega_0 t) + v_Q(t) \sin(\omega_0 t) = r(t) \cos(\omega_0 t - \varphi(t))$$

$$v_I(t) = r(t) \cos \varphi(t)$$

$$v_Q(t) = r(t) \sin \varphi(t)$$

(II. 1)

Où :

$\omega_0 = 2\pi f_0$  ; fréquence d'opération ou de travail du radar.

$r(t)$  est l'enveloppe de  $v(t)$ .

La phase est  $\varphi(t) = \text{atan}(v_Q/v_I)$ .

I, Q : sont de suite la composante en phase et en quadrature.

Une cible est détectée quand  $r(t)$  dépasse la valeur seuil  $V_T$  ; où les hypothèses de décision sont :

$$s(t) + n(t) > V_T \Rightarrow \text{Détection.}$$

$$n(t) > V_T \Rightarrow \text{fausse alerte.}$$

Avec :  $n(t)$  est le bruit.

Le cas où le bruit soustrait du signal en présence de la cible pour rendre  $r(t)$  inférieur au seuil est appelée faille. Les concepteurs de radar cherchent toujours à maximiser la probabilité de détection pour une probabilité de fausse alerte donnée. La sortie du filtre IF est une variable aléatoire complexe qui est composée soit du bruit seul ou bien du bruit plus le signal écho ; qui est de forme sinusoïdale d'amplitude A :

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t)$$

Les composantes correspondantes au premier cas sont données par :

$$\begin{aligned} v_I(t) &= n_I(t) \\ v_Q(t) &= n_Q(t) \end{aligned} \quad (\text{II. 2})$$

et pour le deuxième cas:

$$\begin{aligned} v_I(t) &= A + n_I(t) = r(t) \cos \varphi(t) \Rightarrow n_I(t) = r(t) \cos \varphi(t) - A \\ v_Q(t) &= n_Q(t) = r(t) \sin \varphi(t) \end{aligned} \quad (\text{II. 3})$$

Où les composantes du bruit  $n_I(t)$  et  $n_Q(t)$  sont non-corrélées et à moyenne nulle et variance  $\Psi^2$ .

La Fonction de Densité de Probabilité (FDP) associée ou conjointe des deux variables aléatoires  $n_I$  et  $n_Q$  est donnée par l'expression [3] :

$$\begin{aligned} f(n_I, n_Q) &= \frac{1}{2\pi\Psi^2} \exp\left(-\frac{n_I^2 + n_Q^2}{2\Psi^2}\right) \\ &= \frac{1}{2\pi\Psi^2} \exp\left(-\frac{(r \cos \varphi - A)^2 + (r \sin \varphi)^2}{2\Psi^2}\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 4})$$

La FDP associée des variables aléatoires  $r(t)$  et  $\varphi(t)$  (module et phase de  $v(t)$ ), sera donnée par :

$$f(r, \varphi) = f(n_I, n_Q) |J| \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial n_I}{\partial r} & \frac{\partial n_I}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial n_Q}{\partial r} & \frac{\partial n_Q}{\partial \varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -r \sin \varphi \\ \sin \varphi & r \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

Le déterminant de la matrice des dérivées est appelé le Jacobien et est égale dans ce cas à :

$$|J| = r(t) \quad (\text{II. 7})$$

La substitution des équations (II. 4) et (II. 7) à l'équation (II. 5) et la collection des termes donnent [3] :

$$f(r, \varphi) = \frac{r}{2\pi\psi^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\psi^2}\right) \exp\left(\frac{rA \cos\varphi}{\psi^2}\right) \quad (\text{II. 8})$$

La FDP pour  $r(t)$  est obtenue par intégration de l'équation (II. 8) sur le domaine de  $\varphi(t)$ , c'est à dire [3] :

$$f(r) = \int_0^{2\pi} f(r, \varphi) d\varphi = \frac{r}{\psi^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\psi^2}\right) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{rA \cos\varphi}{\psi^2}\right) d\varphi \quad (\text{II. 9})$$

Où l'intégrale de l'équation (II. 9) est connue sous le nom de la fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro (0), donnée par [3] :

$$I_0(\beta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{\beta \cos\theta} d\theta \quad (\text{II. 10})$$

Ainsi :

$$f(r) = \frac{r}{\psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\psi^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\psi^2}\right) \quad (\text{II. 11})$$

Qui n'est autre que la densité de probabilité de Rice.

En cas de bruit seul, c'est-à-dire  $A/\psi^2 = 0$ , alors l'équation (II. 11) devient la fonction de densité de probabilité de Rayleigh, donnée par :

$$f(r) = \frac{r}{\psi^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\psi^2}\right) \quad (\text{II. 12})$$

Dans le cas où le rapport  $(A/\Psi^2)$  est très grand, alors l'équation (II. 11) devient la fonction de densité de probabilité de Gauss de moyenne  $A$  et de variance  $\Psi^2$ , exprimée par :

$$f(r) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\Psi^2}} \exp\left(-\frac{(r-A)^2}{2\Psi^2}\right) \quad (\text{II. 13})$$

La fonction de densité de probabilité pour la variable aléatoire  $\varphi$  est obtenue par intégration sur la variable  $r$ , c'est à dire [3] :

$$f(\varphi) = \int_0^r f(r, \varphi) dr \quad (\text{II. 14})$$

Le développement de cette expression est très lourd et par conséquent nous en donnons directement le résultat [3] :

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(\frac{-A^2}{2\Psi^2}\right) + \frac{A \cos \varphi}{\sqrt{2\pi\Psi^2}} \exp\left(\frac{-(A \sin \varphi)^2}{2\Psi^2}\right) F\left(\frac{A \cos \varphi}{\Psi}\right) \quad (\text{II. 15})$$

Où :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\xi^2/2} d\xi \quad (\text{II. 16})$$

On note le cas de présence de bruit seul, c'est à dire  $A=0$ , alors l'équation (II. 15) se confond à une FDP uniforme sur l'intervalle  $[0, 2\pi]$ . Une bonne approximation pour la fonction  $F(x)$  est donnée par :

$$F(x) = 1 - \left( \frac{1}{0.661x + 0.339\sqrt{x^2 + 5.51}} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad x \geq 0 \quad (\text{II. 17})$$

Pour les valeurs négatives de  $x$ , on aura:

$$F(-x) = 1 - F(x) \quad (\text{II. 18})$$

### II. 3. Probabilité de fausse alerte

La probabilité de fausse alerte  $P_{fa}$  est définie comme étant la probabilité qu'un échantillon  $r_e$  du signal  $r(t)$  excèdera le seuil  $V_T$  en présence du bruit seul. Ceci dit que cette probabilité aura pour expression [3] :

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{r}{\psi^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\psi^2}\right) dr = \exp\left(\frac{-V_T^2}{2\psi^2}\right) \quad (\text{II. 19})$$

Ce qui donne encore :

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

Le temps de fausse alerte  $T_{fa}$  est lié à la probabilité de fausse alerte par :

$$T_{fa} = t_{int} P_{fa} \quad (\text{II. 20})$$

Où  $t_{int}$  représente le temps d'intégration radar ou le temps moyen pour lequel la sortie du détecteur d'enveloppe dépasse le seuil  $V_T$ . Etant donné que la bande opérationnelle du radar, notée par  $B$ , est l'inverse de  $t_{int}$ , alors par substitution de l'équation (II. 19) à l'équation (II. 20), on pourra écrire  $T_{fa}$  sous la forme [3] :

$$T_{fa} = \frac{1}{B} \exp\left(\frac{-V_T^2}{2\psi^2}\right) \quad (\text{II. 21})$$

Minimiser  $T_{fa}$  revient à augmenter la valeur du seuil  $V_T$  et le résultat serait que la sensibilité du radar diminuera. Alors, le choix d'une valeur acceptable pour  $T_{fa}$  devient un compromis dépendant du mode opérationnel du radar. Fehlner définit le nombre ou taux de fausses alertes par [3] :

$$n_{fa} = \frac{-\ln(2)}{\ln(1 - P_{fa})} \approx \frac{\ln(2)}{P_{fa}} \quad (\text{II. 22})$$



A part la définition de l'équation (II. 22), l'expression la plus commune utilisée pour le nombre de fausse alerte est celle introduite par Marcum. Celui-ci définit ce nombre comme étant l'inverse de la probabilité de fausse alerte  $P_{fa}$ .

#### II. 4. Probabilité de détection

La probabilité de détection  $P_D$  est la probabilité qu'un échantillon  $r_e$  du signal  $r(t)$  dépassera le seuil  $V_T$  en présence du bruit et du signal utile. Alors, cette probabilité aura pour expression [3] :

$$P_D = \int_{V_T}^{\infty} \frac{r}{\Psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\Psi^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\Psi^2}\right) dr \quad (II. 23)$$

Sachant que  $(V_T^2/2 \Psi^2) = \ln(1/P_{fa})$ , alors l'équation (II. 23) peut être mise sous la forme [3] :

$$P_D = \int_{\sqrt{2\Psi^2 \ln(1/P_{fa})}}^{\infty} \frac{r}{\Psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\Psi^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\Psi^2}\right) dr = Q\left[\sqrt{\frac{A^2}{\Psi^2}}, \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}\right] \quad (II. 24)$$

Avec :

$$Q[\alpha, \beta] = \int_{\beta}^{\infty} \zeta I_0(\alpha\zeta) e^{-(\zeta^2 + \alpha^2)/2} d\zeta \quad (II. 25)$$

Q est appelée la fonction Q de Marcum. Quand  $P_{fa}$  est faible et que  $P_D$  est relativement élevée de façon à ce que  $V_T$  soit aussi élevé, alors l'équation (II. 24) peut être approchée par :

$$P_D \approx F\left(\frac{A}{\Psi} - \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}\right) \quad (II. 26)$$

Où la fonction  $F(x)$  a été déjà donnée par l'expression (II. 16). Plusieurs approximations pour le calcul de l'expression (II. 24) ont été réalisées. Parmi celles-ci, on retrouve l'expression donnée par North :

$$P_D \approx 0.5 \times \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{\operatorname{SNR} + 0.5}) \quad (\text{II. 27})$$

Où le complémentaire de la fonction erreur est donnée par :

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (\text{II. 28})$$

L'intégrale donnée sur l'expression (II. 25) est très compliqué. En conséquence elle ne peut être calculée que par intégration numérique. C'est notre objectif principal dans ce mémoire, où l'on se propose un calcul numérique de l'expression (II. 25).

## II. 5. Intégration d'impulsion

Une fois le rapport signal sur bruit (SNR) est décidé, on sera en mesure de déterminer la meilleur forme d'impulsion qui satisfera ce SNR ou bien par équivalence la probabilité de détection  $P_D$ . Souvent, aucune forme d'impulsion n'est capable de répondre aux exigences et de garantir un SNR minimal pour une certaine portée. Dans ce cas, le radar devra attendre jusqu'à ce que la cible soit assez proche pour avoir une détection ! Heureusement qu'il y a une alternative à ceci. En effet l'intégration cohérente et non-cohérente d'impulsion est une technique qui améliore le SNR sans attendre que la cible se rapproche du radar.

Quand une cible est sur le faisceau du radar durant un balayage, elle réfléchira plusieurs impulsions. En additionnant ces échos, le SNR et par conséquent la sensibilité du radar, augmenterons. Le nombre d'échos ou d'impulsions retournées dépend de la fréquence de balayage et de la fréquence de répétition d'impulsions (PRF). Le procédé d'addition des échos est connu sous le nom d'intégration d'impulsion radar.

L'intégration d'impulsion peut être réalisée avant le détecteur d'enveloppe. On parle alors d'intégration cohérente ou d'intégration pré-détection. L'intégration cohérente préserve la relation en phase entre les impulsions reçues. Ainsi un accroissement dans l'amplitude du signal est réalisé. A l'inverse, l'intégration d'impulsion réalisée après le détecteur d'enveloppe, où la relation en phase entre impulsions est détruite, est appelée intégration non-cohérente ou intégration post-détection.

## II. 6. Intégration cohérente

En intégration cohérente, si un intégrateur parfait est utilisé, alors l'intégration de  $n_p$  impulsions amplifiera le SNR par le même facteur  $n_p$ . Dans le but de démontrer ceci, nous allons considérer le cas où le signal écho ou retour contient le signal utile  $s(t)$  et le bruit additif non corrélé  $n(t)$ .

Dans le cas où nous avons une seule impulsion, l'écho sera composé du signal  $s(t)$  et du bruit  $n(t)$ . Alors on exprimera le SNR par :

$$\text{SNR}_1 = \frac{E[s(t) * s^*(t)]}{E[n(t) * n^*(t)]} \quad (\text{II. 29})$$

E : espérance ou moyenne statistique.

Puisque  $s(t)$  est un signal déterministe et que  $n(t)$  est un signal aléatoire et sans corrélation excepté avec lui-même, alors on aura :

$$\text{SNR}_1 = \frac{s^2(t)}{n^2(t)} \quad (\text{II. 30})$$

Maintenant, nous allons considérer le cas de  $n_p$  impulsions où l'écho est composé de la somme de  $n_p$  copie du signal  $s(t)$  et de  $n_p$  bruits non corrélés. Dans ce cas nous pouvons écrire pour le SNR obtenu pour  $n_p$  impulsions :

$$\text{SNR}_{n_p} = \frac{E \left[ \sum_{i=1}^{i=n_p} s_i(t) * \sum_{j=1}^{j=n_p} s_j^*(t) \right]}{E \left[ \sum_{i=1}^{i=n_p} n_i(t) * \sum_{j=1}^{j=n_p} n_j^*(t) \right]} \quad (\text{II. 31})$$

Puisque  $s(t)$  est un signal déterministe et que  $n(t)$  est un signal aléatoire et sans corrélation ( $i \neq j$ ) excepté avec lui-même ( $i=j$ ), alors nous pouvons exprimer :

$$SNR_{n_p} = \frac{E[n_p s(t) * n_p s^*(t)]}{E[n_p (n(t) * n^*(t))]} \quad (II. 32)$$

Qu'on peut mettre sous la forme:

$$SNR_{n_p} = \frac{n_p^2 s^2(t)}{n_p n^2(t)} = n_p SNR_1 \quad (II. 33)$$

Ceci montre clairement que le SNR résultant de l'intégration de  $n_p$  impulsions est supérieur au SNR d'une seule impulsion dans le même rapport  $n_p$ .

Malheureusement, la connaissance exacte de la phase de chaque impulsion transmise ainsi que le maintien de la cohérence durant la propagation est un grand défi et une opération très coûteuse. Par conséquent, le radar ne peut utiliser l'intégration cohérente en mode recherche puisque la dynamique de la cible lui est entièrement inconnue.

## II. 7. Intégration non-cohérente

L'intégration non-cohérente est souvent mise en œuvre après le détecteur d'enveloppe, connu aussi sous le nom de détecteur quadratique. Le diagramme bloc d'un récepteur radar utilisant un détecteur à loi carré et une intégration non-cohérente est illustré sur la figure (II. 2).

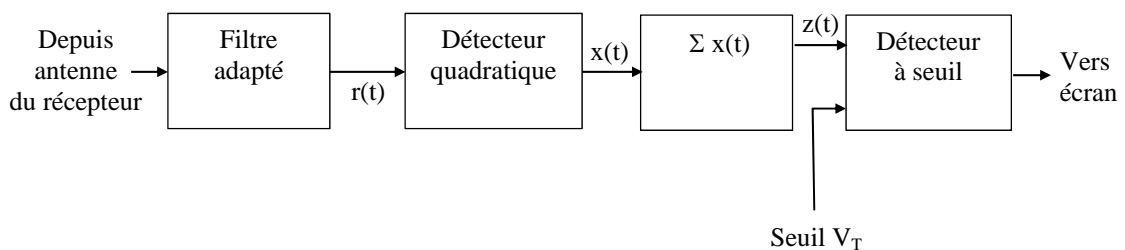


Figure II. 2 : diagramme bloc simplifié d'un détecteur à loi carré et intégration non-cohérente

La FDP du signal  $r(t)$  a été déjà définie dans l'équation (II. 11). Nous allons définir "y" comme étant la nouvelle variable sans dimensions :

$$y_n = \frac{r_n}{\Psi} \quad (\text{II. 34})$$

Ainsi que :

$$\mathfrak{R}_p = \frac{A^2}{\Psi^2} = 2SNR \quad (\text{II. 35})$$

Il s'ensuit que la FDP de la nouvelle variable sera donnée par [3] :

$$f(y_n) = f(r_n) \left| \frac{dr_n}{dy_n} \right| = y_n I_0(y_n \sqrt{\mathfrak{R}_p}) \exp\left(\frac{-(y_n^2 + \mathfrak{R}_p)}{2}\right) \quad (\text{II. 36})$$

La sortie du détecteur quadratique est proportionnel au carré de son entrée, qui après changement de variable dans l'équation (II. 40), sera proportionnel à  $y_n$ . Ainsi il serait plus judicieux de définir une autre nouvelle variable défini par :

$$x_n = \frac{1}{2} y_n^2 \quad (\text{II. 37})$$

La FDP de la nouvelle variable à la sortie du détecteur quadratique sera donnée par :

$$f(x_n) = f(y_n) \left| \frac{dy_n}{dx_n} \right| = \exp\left(-\left(x_n + \frac{\mathfrak{R}_p}{2}\right)\right) I_0(\sqrt{2x_n \mathfrak{R}_p}) \quad (\text{II. 38})$$

L'intégration non-cohérente de  $n_p$  impulsions est réalisée par :

$$z = \sum_{n=1}^{n_p} x_n \quad (\text{II. 39})$$

Puisque les variable aléatoire  $x_n$  sont indépendantes, alors la FDP de la variable  $z$  sera exprimée par :

$$f(z) = f(x_1) \cdot f(x_2) \cdot \dots \cdot f(x_{n_p}) \quad (\text{II. 40})$$

L'opérateur  $(\bullet)$  indique symboliquement le produit de convolution. Les caractéristiques des FDP individuelles peuvent être utilisées pour le calcul de la FDP conjointe donnée sur l'expression (II. 46). Le résultat final sera [3] :

$$f(z) = \left( \frac{2z}{n_P \mathfrak{R}_P} \right)^{(n_P-1)/2} \exp\left(-z - \frac{1}{2}n_P \mathfrak{R}_P\right) I_{n_P-1}(\sqrt{2n_P z \mathfrak{R}_P}) \quad (\text{II. 41})$$

$I_{n_P-1}$  est la fonction de Bessel modifiée d'ordre  $n_P - 1$ . Ainsi, la probabilité de détection est obtenue par intégration de  $f(z)$  depuis la valeur seuil  $V_T$  jusqu'à l'infini.

De la même façon, la probabilité de fausse alerte sera obtenue en laissant  $\mathfrak{R}_P$  tendre vers zéro et en intégrant la FDP depuis le seuil  $V_T$  jusqu'à l'infini.

Des expressions approximatives pour ces intégrales ne sont pas disponibles. En conséquence les techniques numériques sont souvent utilisées pour générer des tables à valeurs pour la probabilité de détection.

## II. 8. Facteur d'amélioration et perte d'intégration

On note par  $(SNR)_{NCL}$ , le SNR requis pour aboutir à une probabilité de détection spécifique  $P_D$  pour une certaine probabilité de fausse alerte  $P_{fa}$  quand  $n_P$  impulsions seront intégrées d'une manière non-cohérente. Ainsi, le SNR pour une seule impulsion noté  $(SNR)_1$  serait inférieur à  $(SNR)_{NCL}$ . Plus précisément, on écrit :

$$(SNR)_{NCL} = (SNR)_1 \times I(n_P) \quad (\text{II. 42})$$

Où  $I_{n_P}$  est appelé le facteur d'amélioration. Une expression empirique pour ce facteur a été dérivée [3] :

$$[I(n_P)]_{dB} = 6.79(1 + 0.235P_D) \left( 1 + \frac{\log(1/P_{fa})}{46.6} \right) \log(n_P) \\ (1 - 0.140\log(n_P) + 0.018310(\log n_P)^2) \quad (\text{II. 43})$$

La perte d'intégration est définie quant à elle par :

$$L_{NCI} = n_P / I(n_P) \quad (\text{II. 44})$$

Il s'ensuit que lors de l'utilisation de l'intégration non-cohérente, le SNR correspondant à l'aboutissement d'une certaine probabilité de détection  $P_D$  pour une certaine probabilité de fausse alerte  $P_{fa}$  sera donnée par l'expression:

$$(SNR)_{NCI} = (n_P \times (SNR)_1) / L_{NCI} \quad (\text{II. 45})$$

## II. 9. Conclusion

La détection dans les systèmes radar est une fonction essentielle qui sépare les cibles d'intérêt des fouillis (brouilleurs indésirables). Elle est matérialisée par la probabilité de détection pour une certaine probabilité de fausse alerte, et donc elle résulte d'un compromis entre une alerte permanente et une alerte absente.

Dans ce deuxième chapitre nous avons abordé cette détection avec un grand nombre d'expressions mathématiques qui décrivent bien le phénomène. Ceci reste nécessaire pour la compréhension et l'évaluation de cette entité. D'autres aspects liés à l'amélioration de cette détection notamment l'intégration d'impulsions ont été discutés dans ce chapitre.

Par ailleurs le calcul de la probabilité de détection reste très lourd et très complexe, chose qui nécessite le passage aux techniques numériques qu'elles soient de type algorithmes récursifs ou de type intégration numérique. C'est ce dernier choix que nous allons utiliser pour l'extraction de la probabilité de détection dont les résultats feront l'objet du troisième et dernier chapitre.

# Chapitre III : Simulations et Résultats



### III. 1. Introduction

Nous rappelons le fait que la détection est le résultat d'un compromis entre alerte permanente et absence totale de cette alerte. Ceci reste contrôlé par la valeur de seuil d'alerte dont la valeur sera choisie prudemment de sorte à aboutir à une détection optimale.

Nous avons aussi vu que la probabilité de détection définie pour une certaine probabilité de fausse alerte est une fonction mathématique lourde et complexe dont on ne serait venir à bout que par les méthodes numériques approchées ; qu'elles soient de type algorithme récursif ou de type intégral. Notre choix s'est porté sur ce dernier.

Dans ce troisième chapitre nous allons implémenter un code de calcul basé sur l'intégration numérique et tirer différents résultats qui nous intéressent et intéresse le lecteur.

### III. 2. Rappel

Nous rapportons ici par souci de convenance, l'expression de la probabilité de détection déjà donnée au chapitre deux [3] :

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

Et :

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

Avec :

$$\alpha = \frac{A}{\Psi} \text{ et } \beta = \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}$$

$$I_0(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{\rho \cos \theta} d\theta$$

Qui est la fonction de Bessel d'ordre 0 et d'argument  $\rho$  sous forme intégrale.

L'intégrale donnée sur l'expression (III. 1) est très compliqué. En conséquence elle peut être calculée par intégration numérique appliquée sur l'expression (III. 2).

### III. 3. Présentation de l'algorithme

Dans cette partie nous donnons la structure générale de notre algorithme destiné au calcul de la probabilité de détection  $P_D$ . Celui-ci est résumé sur la figure (III. 1).

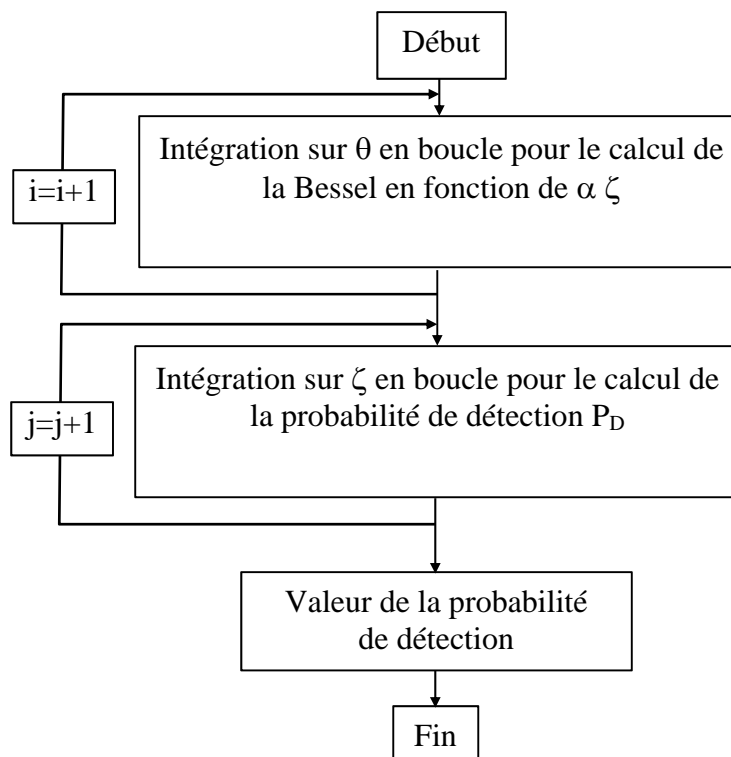


Figure III. 1 : structure de l'algorithme de calcul intégral de la probabilité de détection  $P_D$

Le calcul de la fonction de Bessel se fait par intégration numérique en boucle, réalisée sur un nombre de points nécessaire pour la précision. La même chose est réalisée pour le calcul intégral de la probabilité de détection qui sera réalisée sur zêta ( $\zeta$ ) sur le nombre de points nécessaires pour la convergence. De plus la borne supérieure d'intégration ne peut être l'infinie et donc elle sera remplacée par la variable  $\mu$ , prise comme valeur maximale.

### III. 4. Résultats de simulations

#### III. 4. 1. Convergence

Dans cette partie, nous allons donner le résultat concernant la convergence en fonction de la borne supérieure sur l'intégrale de la probabilité de détection pour le cas :

$$A = \Psi \Rightarrow \alpha = 1.$$

$$P_{fa} = 1/e^2 = 0.1353 \Rightarrow \beta = 2.$$

$$\mu = 5, \zeta \in [\beta, \mu] \Rightarrow \zeta \in [2, 5].$$

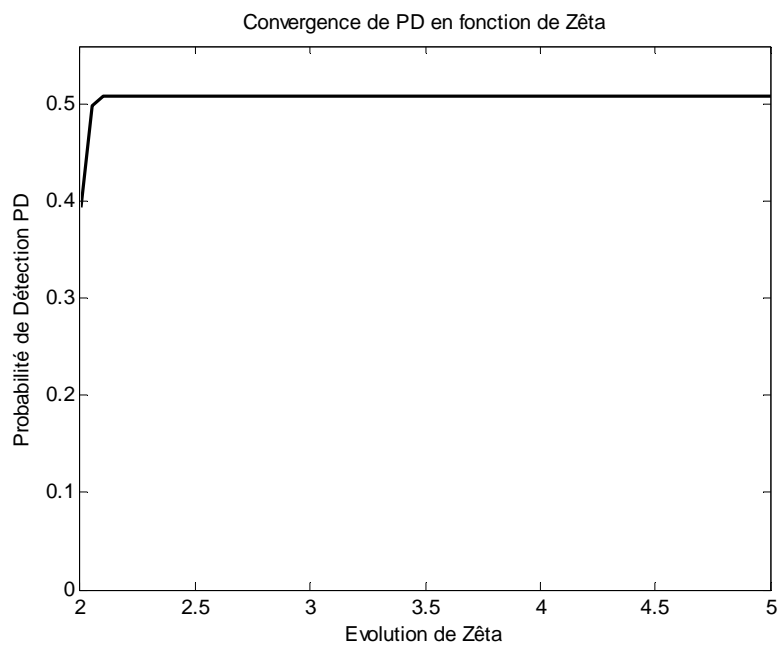


Figure III. 2 : convergence de  $P_D$  en fonction de Zêta

Dans cet exemple la condition sur la convergence est vérifiée presque immédiatement vu qu'elle est réalisée dès  $\zeta = 2.2$  pour une valeur de  $P_D = 0.52$ .

Nous allons maintenant donner le résultat concernant l'influence de l'ordre de grandeur de  $\alpha$ , en gardant  $\beta$ , sur la convergence pour le cas :

$$\alpha = 0.1, \beta = 2.$$

$$\mu = 12, \zeta \in [\beta, \mu] \Rightarrow \zeta \in [2, 12].$$

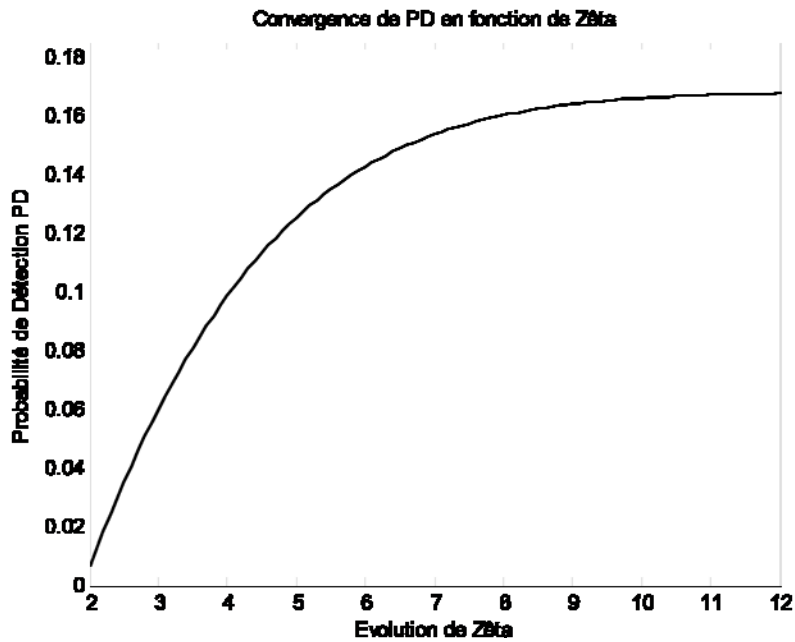


Figure III. 3 : convergence de  $P_D$   
en fonction de  $Z\hat{\epsilon}$

On voit clairement pour ce cas que la convergence est plus lente, c'est-à-dire aux environs de  $\zeta = 10$ . La convergence est très nette à partir de cette valeur pour laquelle la probabilité de détection est  $P_D = 0.166$ .

Si on regarde l'expression (III. 2), on se rend vite compte que l'amortissement de l'intégrale est exponentiellement proportionnelle au carré de  $\alpha$ . Cela dit, si  $\alpha$  est faible, alors la convergence est d'autant moins rapide. A conditions égales, ceci est bien vérifié sur les figures (III. 2) et (III. 3).

Nous allons maintenant donner le résultat concernant l'influence de l'ordre de grandeur de  $\beta$ , en gardant  $\alpha$ , sur la convergence pour le cas :

$$\alpha = 1, \beta = 0.2.$$

$$\mu = 20.2, \zeta \in [\beta, \mu] \Rightarrow \zeta \in [0.2, 20.2].$$

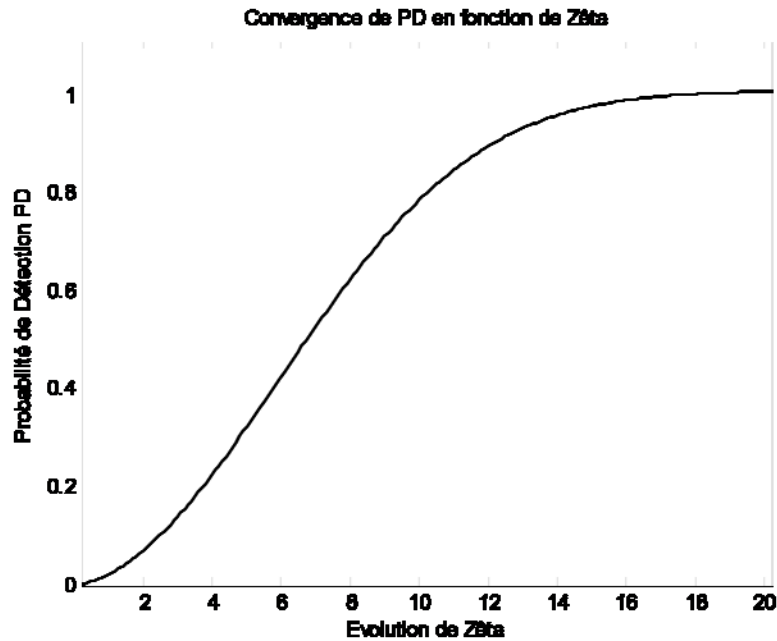


Figure III. 4 : convergence de  $P_D$  en fonction de  $Z\eta$

Pour cette application, la convergence reste plus lente que celle enregistré pour la figure (III. 2). Elle est quasi-linéaire à partir de  $\zeta = \beta = 0.2$  jusqu'à  $\zeta = 14$  puis stagne à partir de  $\zeta = 14$  pour situer la valeur de la probabilité de détection  $P_D$  un peu au-dessus de 1 qui est la valeur maximale pour une probabilité. Ce dépassement de la valeur de 1 est dû aux erreurs de discrétisation, d'arrondi et à la précision du calculateur.

Maintenant, si on analyse l'expression (III. 2), on comprend mieux pourquoi cette convergence est relativement plus lente en comparaison avec la figure (III. 2). En effet, plus  $\beta$  est faible et plus l'intervalle d'intégration est grand, ce qui retarde la convergence.

### III. 4. 2. Variation

Dans cette partie nous allons donner quelques résultats graphiques pour la variation de la probabilité de détection  $P_D$ . Nous allons commencer par la variation de  $P_D$  en fonction du paramètre  $\beta = \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}$  tout en gardant fixe le paramètre  $\alpha = \frac{A}{\Psi} = 1$ .

Sur la figure (III. 5), est illustrée la variation de  $P_D$  en fonction de  $\beta$  qui prend les valeurs dans l'intervalle  $[0, 5]$ , sachant que  $\alpha=1$ .

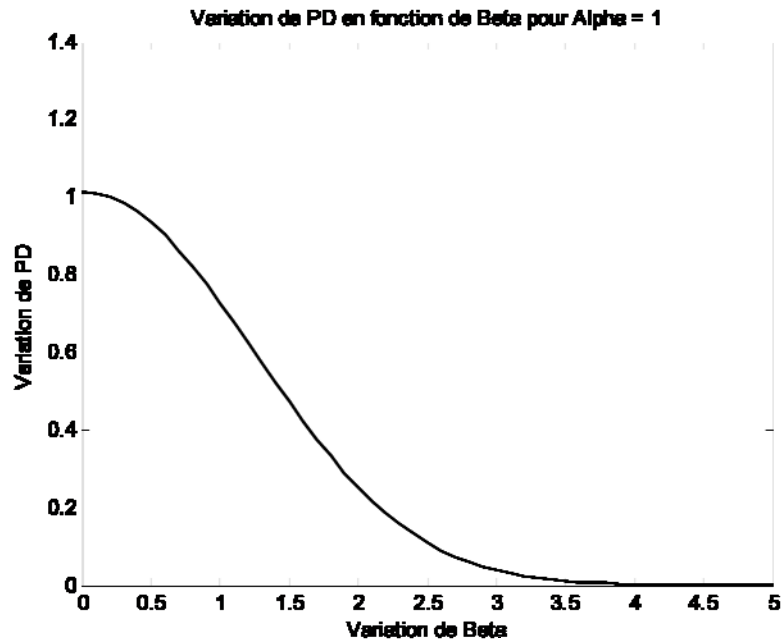


Figure III. 5 : variation de la probabilité de détection  $P_D$  en fonction de  $\beta$

D'après la figure (III. 5), nous pouvons dire que  $P_D$  enregistre un maximum pour  $\beta = 0$ , chose tout à fait logique puisque l'intervalle d'intégration est dans ce cas le plus grand, c'est à dire théoriquement  $[0, \infty]$ . La tendance est que  $P_D$  diminue au fur et à mesure que  $\beta$  augmente. Ceci est en nette concordance avec l'expression (III. 2), puisque plus  $\beta$  est grand et moins est l'intervalle d'intégration ; chose qui diminue la valeur de de la probabilité de détection  $P_D$ . Celle-ci est pratiquement nulle à partir de  $\beta = 3.5$ .

De la même manière, nous allons maintenant donner la variation de la probabilité de détection  $P_D$  en fonction du paramètre  $\alpha$ . Nous donnons un exemple où la variation de ce paramètre est prise dans l'intervalle  $[0, 8]$  et où le paramètre  $\beta$  est constant et égale à 4. Le résultat en question est montré sur la figure (III. 6).

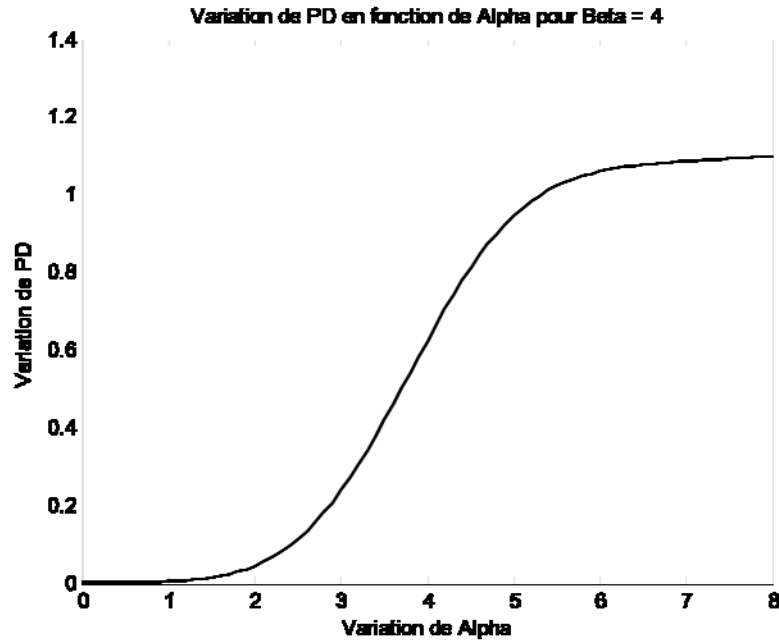


Figure III. 6 : variation de la probabilité de détection  $P_D$  en fonction de  $\alpha$

Nous constatons que la probabilité de détection  $P_D$  converge vers une valeur un peu supérieure à 1 à partir de  $\alpha = 6$ . La valeur maximale est un peu supérieure à 1 à cause toujours des erreurs de discrétisation, d'arrondis et la précision du calculateur. Nous constatons aussi la présence d'un point d'inflexion, où la courbe change d'allure, repérée par  $\alpha = 4$  et  $P_D = 0.6$ .

Par ailleurs, on note, et ceci à conditions égales avec la figure (III. 2), le fait que plus  $\alpha$  augmente et plus  $P_D$  augmente. Ceci est en nette concordance avec l'expression (III. 2), puisque la valeur de la Bessel augmente en fonction de  $\alpha$  et en conséquence la probabilité de détection  $P_D$  augmente elle aussi.

### III. 4. 3. Evolution 3D

Sur l'expression (III. 2) on peut bien voir que la probabilité de détection varie en fonction de deux paramètres :  $\alpha$  et  $\beta$ . Nous pouvons donc passer à une représentation tridimensionnelle de la probabilité de détection  $P_D$  en fonction de  $\alpha = \frac{A}{\Psi}$  et de  $\beta = \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}$ . Les valeurs de  $\alpha$  et de  $\beta$  sont présent dans l'intervalle  $[0, 8]$ . Sur la figure (III. 7) qui va suivre, nous donnons une représentation en 3D de la probabilité de détection  $P_D$  en fonction de  $\alpha$  et de  $\beta$ .

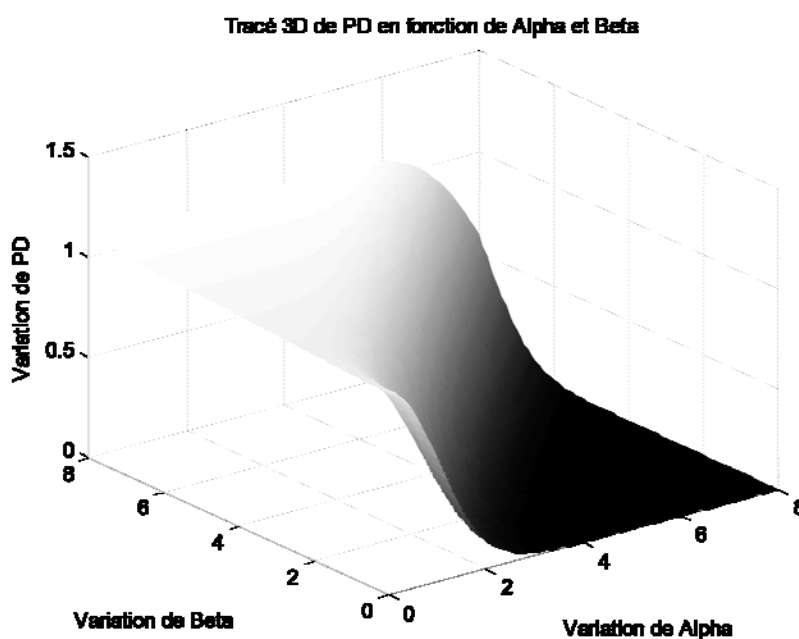


Figure III. 7 : Représentation 3D de la variation de la probabilité de détection  $P_D$  en fonction de  $\alpha$  et de  $\beta$

Cette dernière figure illustre d'une manière plus globale la variation de la probabilité de détection. En effet la représentation en 3D reste plus significative et plus attrayante.

### III. 5. Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré aux différentes simulations réalisées sur notre code de calcul. Après un bref rappel sur l'expression de la probabilité de détection, nous avons donné différents résultats.

Nous pouvons toujours diversifier ces résultats car le module de calcul est très bien adapté à tous les changements de valeurs des variables. Seulement, nous nous sommes contentés de quelques uns ; les plus significatifs.

Trois types de ces résultats ont été rapportés, à savoir la convergence de la valeur de la probabilité de détection en fonction de la borne supérieure d'intégration, sa variation 2D en fonction des paramètres d'intégration et son évolution 3D en fonction de ces mêmes paramètres.



L'outil de simulation réalisé à base d'intégration numérique, est très utile pour le calcul simplifié de la probabilité de détection et sera sans aucun doute intégré à d'autres modules de calcul dans le cadre de l'étude des systèmes radar.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Les radars dans leur conception ont vu leur évolution intégrer le logiciel pour les fonctions de test et d'opération. Leur intégration a connu un grand succès dans la surveillance, l'armement, et les systèmes de contrôle de trafic aérien.

Dans certains cas ces radars restent incomplets dans leur conception de sorte que leurs caractéristiques ne sont pas toutes définies. Dans d'autres cas, où le radar est construit et est opérationnel, les détails de sa conception et de son opérationnalité sont si complexes que le temps nécessaire pour leur analyse et leur modélisation reste prohibitif. A cause de la complexité des interactions entre le radar, capteurs, cibles et environnement, les simulations sur calculateurs sont souvent utilisées pour l'analyse de l'ensemble du système.

Plusieurs modèles sont utilisés pour les simulations afin de déterminer les performances des radars. Quelques-unes de ces simulations utilisent des modèles simples, où le radar est supposé détecter toutes les cibles sur une distance définie. D'autres utilisent des représentations de la conception du matériel radar et des descriptions des différents modes opératoires.

Les ingénieurs devront accepter le fait que certains aspects de la théorie des radars ont été simplifiés, chose qui les rend inappropriés pour tous les types de radar. Ces modèles peuvent être modifiés et élargies dans le but d'incorporer des caractéristiques désirés dans des analyses spécifiques ou bien pour simuler de nouvelles configurations radar.

Les radars sont de plus en plus utilisés comme partie intégrante de systèmes complexes. En exemples et pas des moindres, nous pouvons citer : trafic aérien, systèmes de défense à missiles balistiques, systèmes de défense aérien et systèmes de suivi de cibles pour attaque terrestre.

Dans ce manuscrit, nous avons permis au lecteur de :

- Connaître le radar, ses composants, ses limites et ses applications.
- Comprendre le concept opérationnel du radar, les fonctions réalisées par le radar et ces particularités.
- Avoir une idée sur les différents modèles qui caractérisent la probabilité de détection.

Nous avons parlé de l'équation du radar et du rapport signal à bruit ainsi que d'autres paramètres. La détection a été largement évoquée avec ses contraintes et son amélioration par différentes techniques d'intégration d'impulsions. Le rapport signal à bruit quant à lui, fournit une mesure de performances du radar. Il détermine la capacité du radar à détecter les cibles et à les traquer.

Dans le même contexte et à travers le chapitre deux, nous avons bien abordé :

- Le processus de détection et de choix de la valeur seuil en milieu bruité.
- Le calcul de la probabilité de fausse alerte et de son taux, en utilisant différentes lois qui régissent les probabilités.
- L'évaluation de l'impact de l'intégration d'impulsions cohérente et non-cohérente et la détection cumulative sur la probabilité de détection et sur le rapport signal à bruit.

Sachant que l'écho radar et le bruit résultent de processus aléatoires, alors la détection serait sujette à des considérations probabilistes et statistiques. En détection, l'amplitude du signal reçu serait comparée à un seuil. Ce seuil est choisi de sorte à exclure la plus grande partie des signaux de bruit et d'interférence. Si le signal dépasse ce seuil, alors la détection de la cible sera manifeste.

Malheureusement le caractère aléatoire du bruit, complique la tâche du moment où celui-ci, seul, peut dépasser le seuil et déclencher par la même occasion ce que l'on appelle une fausse alerte. De la même manière le retour ou écho peut rester en

dessous de ce seuil et par conséquent la détection serait absente. Donc nous pouvons parler de performance de radar mesurée par la probabilité de détection et par la probabilité de fausse alerte. Ceci dépend des valeurs du seuil de déclenchement et du rapport signal à bruit. Si nous fixons tous les autres facteurs, alors la diminution du seuil augmentera la probabilité de détection au dépend d'une augmentation évidente de la probabilité de fausse alerte et vice versa.

Ayant pris connaissance des modèles approchés pour le calcul de ces deux probabilités, qui sont dépendantes mutuellement, nous avons fait le choix d'une programmation à base d'intégration numérique pour le calcul de la probabilité de détection. Celle-ci dépend, pour un modèle de bruit blanc Gaussien additif, de la variance de ce bruit et de l'amplitude du signal écho pour une probabilité de fausse alerte exigée.

Nous avons réalisé le module de calcul et nous avons extrait un grand nombre de résultats très variés. Ces résultats vont de la représentation bidimensionnelle de la variation de la probabilité de détection en fonction du rapport amplitude du signal/variance de bruit et de la probabilité de fausse alerte à une représentation tridimensionnelle de cette même variation en passant par la convergence pour les valeurs de cette probabilité de détection.

En perspective, ce code de calcul de la probabilité de détection sera intégré avec d'autres codes afin de créer un module complet de calcul pour les systèmes radar. L'ensemble constituera un outil de simulations et d'aide à la conception.

# Références

## Références

- [1] M. I. Skolnik, “Radar Handbook”, Third Edition, *McGraw-Hill Companies*, 2008.
- [2] P. Fombonne, “Radiolocalisation. Radionavigation”, *Techniques de l’Ingénieur-Traité Télécoms*.
- [3] D. K. Barton, S. A. Leonov, “Radar Technology Encyclopedia”, *Artech House*, 1998.
- [4] G. R. Curry, “Radar System Performance Modeling”, Second Edition, *Artech House*, 2005.