

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**Département d'Aéronautique**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN AERONAUTIQUE**

Option : Installation

***THEME***

**SIMULATION ET GENERATION DES SIGNAUX  
RADAR METEOROLOGIQUE DOPPLER PAR DEUX  
METHODE PULSE PAIR ET FOURIER**

**Présenté par :**

**FAID Samira**

**BRAHMI Meriem**

**Encadré par :**

**Promoteur: Mr. Zabot Amar**

**Co-promoteur: Mr. Lagha mohand**

**2010-2011**

### ملخص

الهدف من دراستنا هو تقدير الظواهر الجوية باستعمال رادار الملاحة الجوية دوبلر Doppler وذلك باستخدام طريقتين لتقدير سرعة الرياح و خصائص إشارات الرادار ، الاولى زمنية 'puls pair' ، والثانية خوارزمية فورييه Fourier مبنية على أساس التردد.

### Résumé

L'objectif de notre étude est celui de faire des estimations des phénomènes météorologiques par le biais du radar à effet doppler et ça en appliquant deux méthodes d'estimation des vitesses du vent pour faire une simulation du spectre Doppler et les signaux radar , la première application temporelle utilisant la notion d'autocorrélation (méthode pulse pair) et la deuxième est fréquentielle utilisant l'estimation de la densité spectrale de puissance (l'algorithme de transformée de Fourier)

### Abstract

The objective of our study is that to make estimates of the weather phenomena with a Doppler meteorological radar by applying pulse pair algorithm and the Fourier algorithm to estimate speeds of the wind in order to simulate the Doppler spectrum and the radar signals,

# **Remerciement**

***Tout d'abord, on remercie « ALLAH » qui a insufflé en nous la vie et nous a comblées de ses bienfaits***

***On tient à remercies notre promoteur Mr ZABOT.A pour toute sa confiance et l'aide précieuse qu'il nous a apporté pour la réalisation de ce travail***

***On tient à remercies notre co-promoteur Mr LAGHA.M que notre travail n'aurait pas pu s'achever sans son aide dont les conseils et la présence nous ont dûment encouragées .Veuillez croire à notre immense reconnaissance***

***On tient à remercies, et exprimer notre respect aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre infinie gratitude et l'assurance de notre haute considération***

***On remercie Mr TEKHMIRINE et Mr RAHMOUNI qui nous ont beaucoup aidés***

***Parfois les mots ne suffisent pas pour exprimer nos sentiments, mais nous pensons pas moins pour autant...***

A decorative illustration on the left side of the page features several pink and white roses with green leaves. To the right, there are light blue flowers and a blue dragonfly with a green body and long tail. The background is a light purple color.

# **DEDICACE**

*Au bon dieu*

*A ma belle et douce maman, qui a toujours cru en moi malgré les obstacles que j'ai pu rencontrer tout au long de ce cursus universitaire, sans elle je ne serai rien et que j'aime éperdument...Et a la mémoire de mon père*

*A ma grand-mère « Zohra » Et a la mémoire de mon grand père  
A mes frères adorés Farid, Samir, Chacun de vous a contribué à ma réussite à sa manière, je vous en suis redevable et je vous aime tendrement...*

*A mes Tantes Fatiha, Zahia, Hakima, Saliha, Nora, Kahina et Karima*

*A mes oncles :Omar, Aami Omar, Mohamed et Rachid*

*A Jugurtha et Ali*

*A toute ma famille*

*A toute la famille « Ben Alia »*

*A toi ma chère « Mery » Meilleurs vœux de succès dans ta vie*

*A mes amies exceptionnelles Thanina, Fatiha, Kahina. A vous toutes mes délicieuses amies*

*A tous ceux qui m'ont fait confiance et m'ont encouragée...*

**FAID Samira**

A decorative illustration on the left side of the page features a vertical arrangement of flowers. At the top is a light blue flower, followed by a pink and white rose, and then three more pink roses. To the right of these flowers is a blue dragonfly with a green body. The background of the illustration is a light purple and blue gradient.

*DEDICACE*

*Je remercie en premier lieu, DIEU qui ma donner le courage et la volonté de bien terminer ce travail.*

*A mes chers parents que DIEU me les gardes*

*A ma grand- mère*

*A mes sœurs adorées*

*A mes amis*

*A tous ceux qui me sont chers*

*BRAHMI Meriem*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : DETECTION RADAR</b> .....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique des systèmes radars.....	3
I.3 Radar : définition et principe de base.....	4
I.3.1 Définition.....	4
I.3.2 Principe de base d'un radar.....	4
I.4 Composition d'un système radar.....	6
I.4.1 L'antenne.....	6
I.4.2 Le duplexeur.....	7
I.4.3 L'émetteur.....	7
I.4.4 Le modulateur.....	7
I.4.5 Le récepteur.....	7
I.4.6 Traitement et exploitation des informations .....	8
I.4.7 Synchronisation.....	8
I.4.8 Information de pointé angulaire.....	8
I.4.9 liaison duplexeur antenne.....	9
I.5 Classification des systèmes radar.....	9
I.5.1 Selon le type de cible.....	9
I.5.2 Selon la position relative de l'émetteur ou du récepteur.....	9
I.5.3 Selon l'objectif.....	9
I.5.4 Selon le type du signal.....	10
I.6 Principe du radar à impulsions.....	11
I.6.1 Mesure de la distance.....	12
I.6.2 Mesure des angles.....	13
I.7 Equation radar.....	15
I.8 Les sources d'interférences.....	16
I.8.1 Le bruit.....	16
I.8.2 Le brouillage.....	17
I.8.3 Les échos parasites.....	17
I.9 Détection radar.....	18
I.10 Conclusion.....	19

<b>CHAPITRE II : LE RADAR METEOROLOGIQUE DOPPLER.....</b>	<b>20</b>
II.1 Introduction.....	20
II.2 La météorologie.....	20
II.2.1 Prévisions météorologique.....	20
II.2.2 Les cibles météorologiques.....	21
II.2.3 Les cibles non météorologiques.....	24
II.3 Le radar météorologique Doppler.....	25
II.3.1 L'effet Doppler.....	25
II.3.2 Définition.....	27
II.4 Les fréquences radar .....	27
II.5 Principe du radar Doppler météorologique.....	28
II.5.1 Fréquence Doppler.....	29
II.5.2 Caractéristiques du signal radar.....	30
II.6 Equation du radar météorologique.....	33
II.7 Description du radar météorologique.....	35
II.8 Systèmes d'affichage.....	36
II.8.1 Conventions d'affichage.....	36
II.8.2 PPI Plan Position Indicateur (vue panoramique à angle d'élévation constant) .....	37
II.8.3 RHI.....	38
I.9 Conclusion.....	38
<b>CHAPITRE III : ESTIMATION DES MOMENTS SPECTRAUX.....</b>	<b>39</b>
III.1 Introduction.....	39
III.2 Le calcul de la réflectivité et l'estimation du taux de précipitation.....	39
III.2.1 La réflectivité (Z).....	39
III.2.2 l'estimation du taux de précipitation.....	42
III.2.2.1 Le principe de détection de précipitation.....	42
III.2.2.2 Estimation du taux de précipitation.....	43
III.2.3 La relation entre le taux de précipitation et le facteur de réflectivité.....	43
III.2.4 La mesure du taux de précipitation.....	44
III.2.4.1 Calibrage hydrologique.....	44
III.3 Estimation de la vitesse du vent.....	45

III.3.1 Le vent .....	45
III.3.2 Le cisaillement du vent.....	45
III.3.3 La mesure de la vitesse du vent par radar météorologique.....	46
III.4 Etude d'un processus stochastique.....	46
III.4.1 Moyenne.....	46
III.4.2 Variance.....	47
III.4.3 Notions de stationnarité et d'ergodisme.....	47
III.4.4 Fonction d'autocorrélation.....	48
III.5 Estimation des paramètres spectraux.....	48
III.5.1 Définition.....	48
III.5.2 Calcul des moments spectraux.....	49
III.6 Méthodes d'estimation spectrales .....	51
III.6.1 Méthode du PULSE PAIR.....	51
III.6.1.1 Estimation de la fonction d'autocovariance .....	53
III.6.2 Méthode de FOURIER.....	53
III.7 Conclusion.....	54
<b>CHAPITRE IV : SIMULATIONS ET COMMENTAIRES.....</b>	<b>55</b>
IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Estimation du spectre Doppler.....	55
IV.2.1 Génération des signaux I et Q.....	55
IV.2.2 Le bruit blanc.....	57
IV.2.3 Modélisation par la loi gaussienne.....	57
IV.3 Estimation temporelle.....	59
IV.3.1 Modélisation par loi gaussienne.....	61
IV.4 Estimation fréquentielle.....	64
IV.5 Conclusion.....	69
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>70</b>



A decorative vertical bar on the left side of the page, consisting of a dashed line and a solid blue bar. A horizontal blue bar crosses the vertical bar in the middle.

LISTES

DES FIGURES



LISTE

---

DES FIGURES

# LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

## CHAPITRE I

La figure	Le titre	La page
I.1	Principe de base du radar	5
I.2	schéma synoptique d'un radar	6
I.3	Signaux du radar à ondes continues	10
I.4	Signaux du radar à impulsion	10
I.5	Propagation du signal radar	11
I.6	Principe de la mesure de distance	12
I.7	Directivité d'une antenne	13
I.8	Principe de la détection	18
Tableau I.1	Hypothèses de détection	19

## CHAPITRE II

La figure	Le titre	La page
II.1	Quelques types de précipitations	21
II.2	Fonctionnement d'un radar Echos non météorologique réfléchit par des bâtiments	24
II.3	Occultation causée par la montagne Cambrian aux pays de galle	24
II.4	Echos non météorologique causés par les rubans métalliques anti radar	25
II.5	Effet Doppler	26
II.6	Principe d'un radar météorologique	28
II.7	Fréquence de répétition des impulsions	30
II.8	Ambiguïté sur la mesure de distance	31
II.9	Synoptique d'un signal doppler radar en émission	32
II.10	Spectre d'un signal Doppler	33
II.11	Schéma simplifié d'un system radar	35
II.12	Image d'un front d'orage en réflectivité, vu sur PPI	37
II.13	Ecran RHI	38

### CHAPITRE III

La figure	Le titre	La page
III.1	Type de la précipitation selon la structure thermique (bleu sous zéro degré Celsius et rouge au-dessus).	42
III.2	Spectre Doppler	49

### CHAPITRE IV

La figure	Le titre	La page
IV.1	Génération des séquences I et Q	56
IV.2	Simulation d'un spectre Doppler (modélisation Gaussienne)	58
IV.3	Simulation des séquences I et Q (modélisation gaussienne)	59
IV.4	Résumé des procédures de la méthode PULSE PAIR dans un organigramme	60
IV.5	L'évolution du profil des vitesses réelles	61
IV.6	Estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode du PULSE PAIR	62
IV.7	Comparaison entre l'estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode du PULSE PAIR	62
IV.8	Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode PULSE PAIR	63
IV.9	Résumé des procédures de la méthode FOURIER dans un organigramme	65
IV.10	Estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode de FOURIER	66
IV.11	Comparaison entre l'estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode de FOURIER et la vitesse réelle	67
IV.12	Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode de FOURIER	68



LISTE DES

ABREVIATIONS

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

**AR:** Auto Régressive.

**CAPPI:** Color Altitude Plan Position Indicator.

**DSP :** Densité Spectrale de Puissance.

**FFT :** Fast Fourier Transform.

**Fr :** Fréquence Radio.

**PRF :** Pulse Repetition Frequency.

**PRT :** Pulse Repetition Time.

**PPI :** Plan Position Indicator.

**RADAR :** Radio Detection And Ranging.

**RCS :** Radar Cross Section

**RDA:** Radar Data Acquisition.

**RDF:** Radio Derection Finding

**RDS:** Radar Cross Section

**RHI:** Range Height Indicator.

**SER:** Surface Equivalente Radar

**RPG :** Radar Product Generator.

**TFD :** Transformée de Fourier Discrète.

**TFtd :** Transformée de Fourier à temps discret.



# INTRODUCTION

## GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

---

Pendant longtemps, les accidents des aéronefs non loin des aéroports restaient imprévisibles et inévitables entraînant de considérables pertes humaines à cause des moyens d'observation et de détection qui étaient au stade primaire de leur développement. Ces derniers permettaient l'observation de plusieurs phénomènes météorologiques et l'estimation de leur taux de précipitation, mais à cette époque là, ils n'offraient pas la possibilité d'estimation de la vitesse et de l'étendue ainsi que d'autres paramètres caractérisant ces phénomènes

Pour leurs activités, les prévisionnistes ont un besoin évident d'observations météorologiques en quantité suffisante. Ces dernières doivent être fiables, précises et disponibles aussi vite que possible pour procéder à une synthèse et effectuer une extrapolation afin, par exemple, de prévoir l'arrivée des précipitations sur un site ou interpréter les modèles des vitesses des vents.

Au cours des deux dernières décennies, il ya eu le développement des radars météorologiques à effet Doppler terrestres. Ce type de radar est utilisé pour la détection et l'estimation des différents paramètres de ce phénomène (vitesse, largeur, direction, etc.).

L'élément clé de ce système est celui de la haute résolution obtenue par l'utilisation des techniques récentes du traitement numérique du signal, pour l'extraction et l'analyse des échos météorologiques reçus.

Ces radars utilisent l'effet Doppler qui permet de détecter le changement des fréquences lié aux perturbations atmosphériques et d'en estimer par la suite leurs vitesses de déplacement, leurs directions et leurs étendues



L'objectif de notre étude est celui de faire des estimations des phénomènes météorologiques par le biais du radar à effet Doppler

Le mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre fait état de la présentation de quelques notions utiles de télédétection radar. Le second chapitre étant une étude globale d'un radar Doppler météorologique terrestre.

Le troisième chapitre sera consacré à l'estimation des précipitations et l'interprétation des modèles des vitesses des vents.

Enfin, les résultats des simulations et leurs interprétations seront présentés dans le quatrième chapitre.

Finalement, une conclusion ressemblera les principaux résultats auxquels nous avons aboutit dans cette étude.



CHAPITRE I :

TELEDETECTION  
RADAR

---

**CHAPITRE I :****LA TELEDETECTION RADAR**

---

**I.1 Introduction**

Une connaissance précise de l'atmosphère est en effet essentielle pour pratiquer l'aviation. C'est dans l'atmosphère que se déplacent les aéronefs : ils y rencontrent une majorité de phénomènes gênants voire dangereux. À cette époque, l'essor phénoménal de l'aviation a conduit à la création des réseaux des instruments de mesure emportés par des ballons dans la haute atmosphère. De nos jours le radar (détection électromagnétique et mesure de la distance) reste un moyen de prévision incontournable en aviation.

**I.2 Historique des systèmes radars**

Les premières applications de la radioélectricité furent les télécommunications, puis la navigation, mais dès le début du siècle, des précurseurs envisagèrent la probabilité de détecter la présence d'un objet métallique par l'utilisation d'onde électromagnétique. Cette nécessité de détecter des objets sans leur contribution s'est faite sentir pour les besoins de la navigation notamment dans le domaine des transports maritimes. Mais c'est le besoin militaire qui fut le principal moteur de cette nouvelle technique.

Le terme radar, qui est universellement adopté pour désigner un matériel répondant à ces exigences est, un néologisme provenant de l'acronyme anglais : « **Radio Detection And Ranging** », que l'on peut traduire par « **détection et estimation de la distance par ondes radio** » ou plus simplement « radiorepérage ». Cet acronyme d'origine américaine a remplacé le sigle anglais précédemment utilisé : (RDF) « **Radio Direction Finding** ». Depuis, le mot "radar" est entré dans la langue usuelle, perdant donc son écriture en lettres majuscules. Il a été proposé par la marine américaine puis, progressivement adopté par les autres.

La première expérimentation concrète est due à Christian Hülsmeyer qui breveta, en 1904, son **télémbiloscope**, émetteur-récepteur radiofréquence utilisé pour la détection à distance d'objets métalliques, qui aurait été testé avec succès à Cologne avec des portées de

l'ordre de 3 km sur des bateaux. Ce même type d'expérience fut repris en 1916 par Hans Dominik et Richard Scherl. Dans les deux cas le signal émis provenait d'un générateur de « spark » : onde électromagnétique engendrée par l'amorçage d'un arc.

La véritable éclosion de cette technique se situe cependant entre 1930 et 1940 où des recherches et développements ont été menés simultanément dans de nombreux pays, notamment les États-Unis, la Grande-Bretagne, l'Allemagne et la France, mais aussi la Russie, l'Italie, la Hollande et le Japon. Le radar a vu ses premiers développements se concrétiser au cours de la Seconde Guerre mondiale. Depuis cette époque, cette technique n'a cessé de se perfectionner, tant au plan technologique, que par la variété des techniques mises en jeu qui toutes se rattachent à un même principe de base.

### **I.3 Radar : définition et principe de base**

#### **I.3.1 Définition du radar**

RADAR est un acronyme de **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging qui signifie « Détection et Télémétrie Radioélectriques »

Un radar est un système qui utilise la propriété des ondes électromagnétiques de se réfléchir (en totalité ou partiellement) sur tout obstacle, permettant ainsi de détecter des objets (cibles) qui sont situés à l'intérieur de son volume de couverture pour en extraire des informations comme la position, la vitesse, la forme.

#### **I.3.2 Principe de base d'un radar**

Le mot radar s'applique à une très vaste gamme de matériel et d'installation allant d'équipements de bords, de volume et poids réduits, à de très gros ensembles servis par plusieurs personnes. Cependant en dépit de cette extrême diversité d'aspects et d'emplois, les mêmes principes de base se retrouvent sur tous les types de radars (figure I.1).

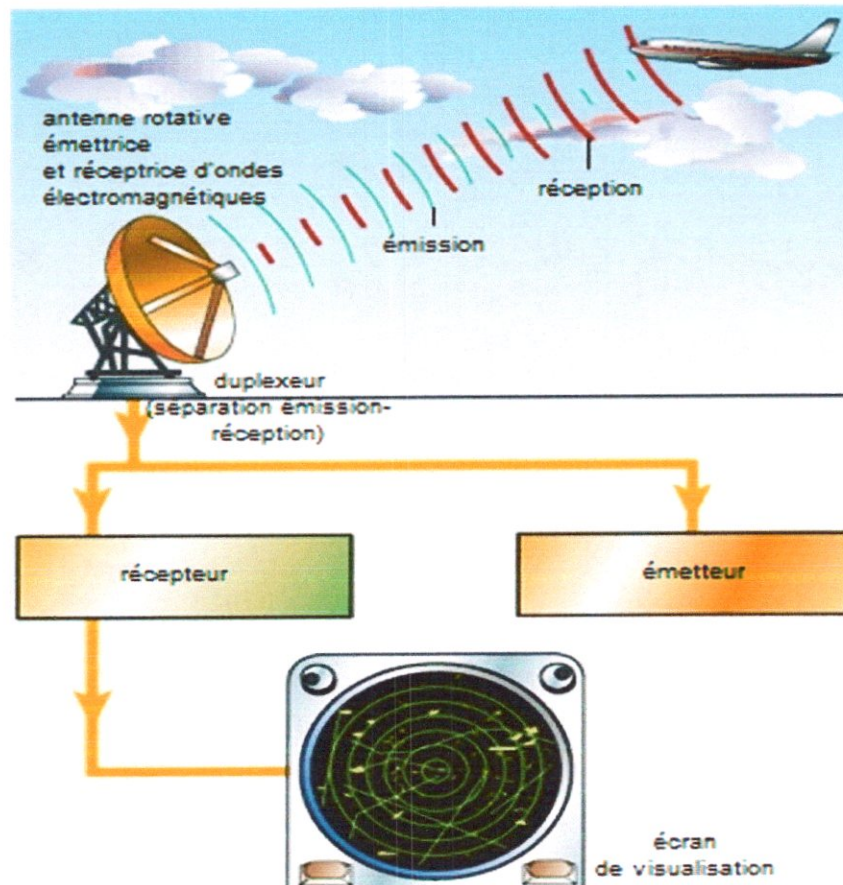


Figure. I.1 : Principe de base du radar

Pour détecter et localiser un objectif auquel on s'intéresse, le radar émet des ondes électromagnétiques puissantes, produites par un oscillateur radio et transmises par une antenne dans une direction ou dans une zone déterminée, là où l'objectif intéressant est supposé se trouver ; si c'est le cas ; une partie de l'énergie qui rencontre l'objectif est rayonnée par celui-ci dans toutes les directions et une partie de ce rayonnement revient vers l'antenne du radar, qui alimente encore un récepteur. 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. Le signal ainsi capté est appelé écho, cet écho va donc signaler la présence de l'objectif qui constitue la cible.

La localisation de la cible en direction est assurée à partir de l'antenne : si celle-ci rayonne un faisceau très fin, d'ouverture angulaire  $\theta$ , l'écho ne sera reçu que si l'antenne est dirigée vers la cible. Pratiquement  $\theta$  est l'ouverture à 3 dB du diagramme de rayonnement de

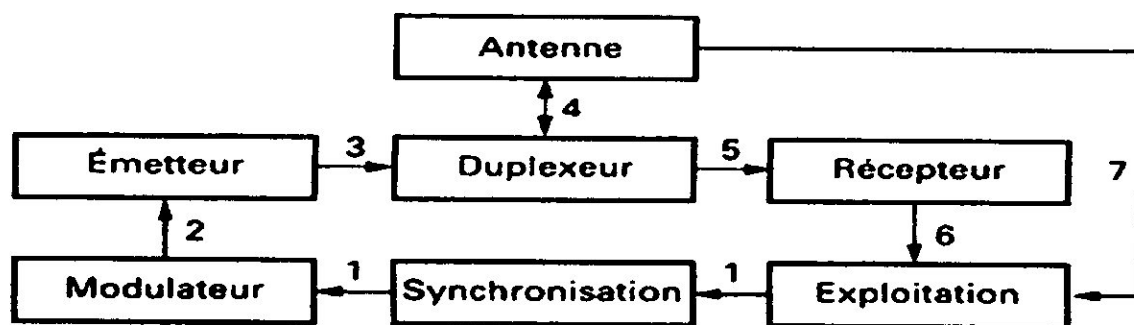
l'antenne. La direction de rayonnement de l'antenne indique la direction de la cible avec une certaine précision qui dépend de l'ouverture angulaire  $\theta$ .

#### I.4 Composition d'un système radar

Le radar est un instrument capable de fournir à l'utilisateur les informations suivantes :

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

Ces deux informations peuvent être complétées, suivant le cas, par d'autres portant sur la vitesse, l'étendue, voire la nature du corps détecté par le radar. Le diagramme fonctionnel type d'un radar est donné figure I.2. Examinons les principaux éléments fonctionnels d'un tel radar.



- 1 signaux de synchronisation
- 2 signaux de commande émission
- 3 signaux hyperfréquences émis
- 4 liaison duplexeur antenne
- 5 signaux hyperfréquences reçus
- 6 signaux traités par le récepteur
- 7 informations angulaires de *pointé*

Figure. I.2 : schéma synoptique d'un radar

##### I.4.1 L'antenne

L'antenne se compose généralement d'un radiateur et d'un réflecteur parabolique montés sur un support commun. L'antenne est reliée au duplexeur par un guide d'onde, elle permet la transmission des ondes venant de l'émetteur vers le milieu extérieur, ou de recueillir les ondes réfléchies et de les transmettre vers le récepteur.

### **I.4.2 Le duplexeur**

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

### **I.4.3 L'émetteur**

Cet élément qui est un oscillateur (magnétron) qui produit de l'énergie électromagnétique (ondes radio) sous forme continue ou d'impulsions courtes et puissantes.

Ces ondes seront après transportées dans des guides d'ondes vers le duplexeur.

### **I.4.4 Le modulateur**

Le modulateur constitue la partie active de l'émetteur. Il permet de stocker l'énergie pendant les périodes séparant deux émissions successives et de la restituer pendant le temps très bref de l'émission radar.

La qualité des signaux délivrés par le modulateur doit être très soignée pour permettre d'éviter des effets parasites sur le signal émis.

### **I.4.5 Le récepteur**

C'est l'élément le plus délicat, et souvent le plus complexe du radar. Lui incombent l'amplification et le traitement du signal radar. Il amplifie les signaux dans de très grandes proportions et doit le faire sans déformation du signal.

Le récepteur doit en outre effectuer le filtrage du signal et tous les autres traitements adaptés à l'information à obtenir (par exemple vitesse, position angulaire...), sa réalisation doit être particulièrement soignée pour réduire au minimum les perturbations dues au bruit qui accompagne le signal radar, et dont une partie au moins prend naissance dans les circuits de réception et doit donc être minimisée.

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

#### I.4.6 Traitement et exploitation des informations

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

- signal vidéo délivré par le récepteur ;
- signaux de synchronisation ;
- informations de position angulaire du faisceau d'antenne ;
- Éventuellement autres informations en provenance d'un traitement spécial à la réception, ou de sources extérieures.

Il permet de délivrer les plots radar qui seront pris en compte par le système d'exploitation.

Les informations sont présentées à un opérateur sous la forme d'une image radar adaptée à la situation à analyser. L'opérateur a alors à sa charge d'interpréter les informations qui sont ainsi visualisées et d'effectuer les opérations nécessaires (identification, guidage, anticollision...).

#### I.4.7 Synchronisation

Le synchronisateur est le cœur du système radar. Il délivre les signaux de base qui définissent les instants d'émission, et divers signaux annexes nécessaires à des opérations en temps réel.

Son élément de base est une horloge de très grande stabilité ( $10^{-5}$  à  $10^{-8}$ ) à partir de laquelle sont engendrés les signaux de synchronisation.

Ces signaux sont distribués aux différents éléments à piloter. Leur distribution doit être assurée avec une très grande reproductibilité sur chaque voie, de manière à ne pas fausser les mesures effectuées.

#### I.4.8 Information de pointé angulaire

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



#### **I.4.9 Liaison duplexeur antenne**

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

#### **I.5 Classification des systèmes radars**

Selon l'information recherchée, les radars possèdent différentes technologies. Différentes classifications sont utilisées en fonction de certains critères :

##### **I.5.1 Selon le type de cible**

###### **▪ Radars Primaires :**

Le signal reçu est uniquement le résultat de la réflexion de l'onde émise par le radar sur la cible.

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 réfléchie de son propre signal.

###### **▪ Radars Secondaires :**

Système d'identification des cibles où on émet un signal codé pour recevoir des réponses des avions.

##### **I.5.2 Selon la position relative de l'émetteur ou du récepteur**

###### **▪ Radars monostatiques :** émission et réception sur une antenne unique.

###### **▪ Radars multistatiques :** deux antennes ou plus émettrices et réceptrices séparées par une certaine distance.

##### **I.5.3 Selon l'objectif**

- Radar de veille ou de surveillance (à balayage) :** le radar explore en continu la zone de couverture
- Radar de poursuite :** le radar suit la cible en continu ou en discontinu (Track While Scan)

#### I.5.4 Selon le type du signal

- **A onde continue**

Le radar émet de façon continue un signal d'amplitude et de fréquences constantes. Ce type de radar est utilisé pour mesurer des vitesses (par exemple, dans le contrôle de la circulation routière) par utilisation de l'effet Doppler, voir figure. I.3.

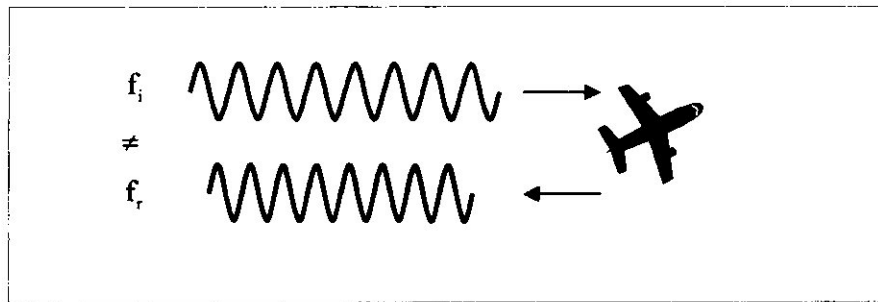


Figure. I.3 : Signaux du radar à ondes continues

- **A impulsions**

Ces radars émettent un signal formé d'impulsions de durée très brève de haute fréquence et de grande puissance. Après l'émission d'une impulsion, suit un temps d'écoute plus ou moins long durant lequel les échos éventuels sont reçus, avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. La direction, la distance et parfois la taille ou l'altitude de la cible peuvent être déterminées à partir du traitement des échos de retour (figure. I.4).

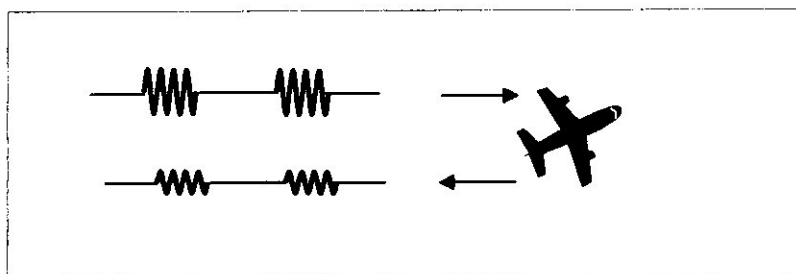


Figure. I.4 : Signaux du radar à impulsions

## I.6 Principe du radar à impulsions

Le radar est un ensemble comportant un **émetteur**, une **antenne**, un **récepteur** et un **système d'exploitation**. Il utilise la propriété des ondes électromagnétiques de se réfléchir sur tout obstacle, créant ainsi une onde de retour susceptible d'être décelée par un récepteur adapté à ce signal (figure. I.5).

Ce principe peut facilement être mis en évidence lorsque le signal émis est une suite d'impulsions électromagnétiques. Chaque impulsion de durée très brève  $\tau$  de l'ordre de quelques microsecondes se propage dans l'atmosphère à la vitesse de la lumière.

Une partie de ce signal est réfléchi par la cible, on dit quelquefois que la cible est illuminée et re-rayonne une partie de l'énergie émise sous la forme d'une onde de faible amplitude et de caractéristiques temporelles identiques à celle du signal émis. Différents paramètres peuvent ainsi être analysés.

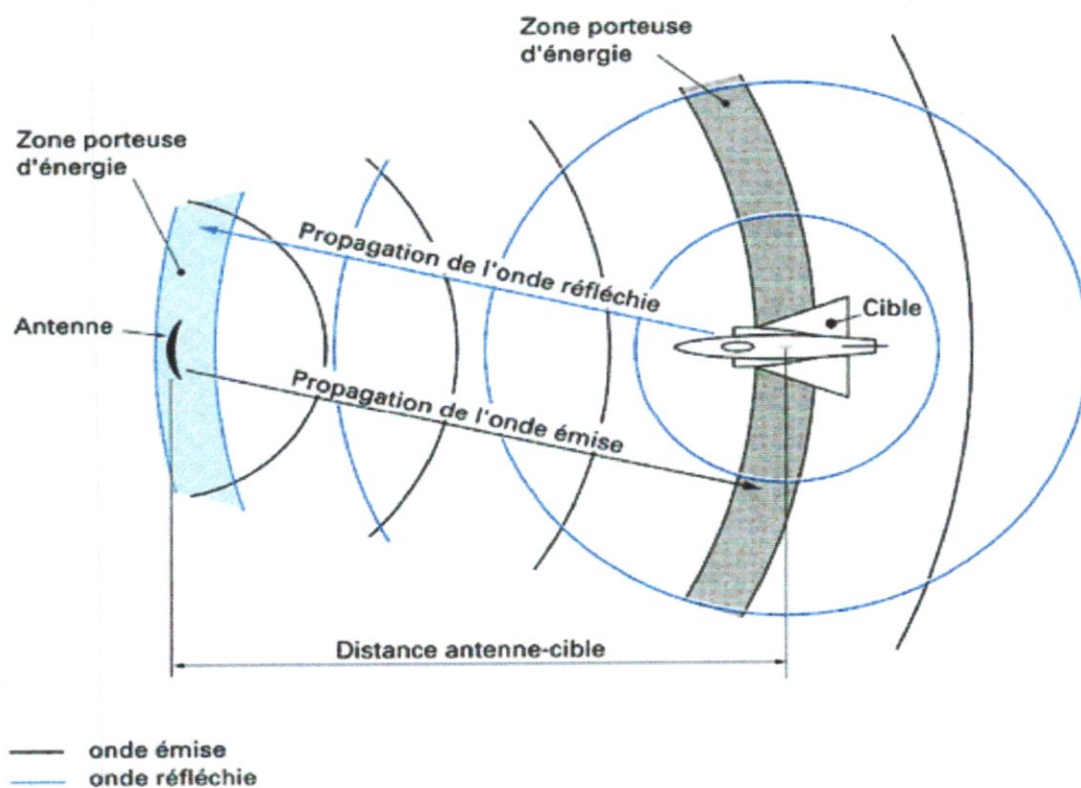


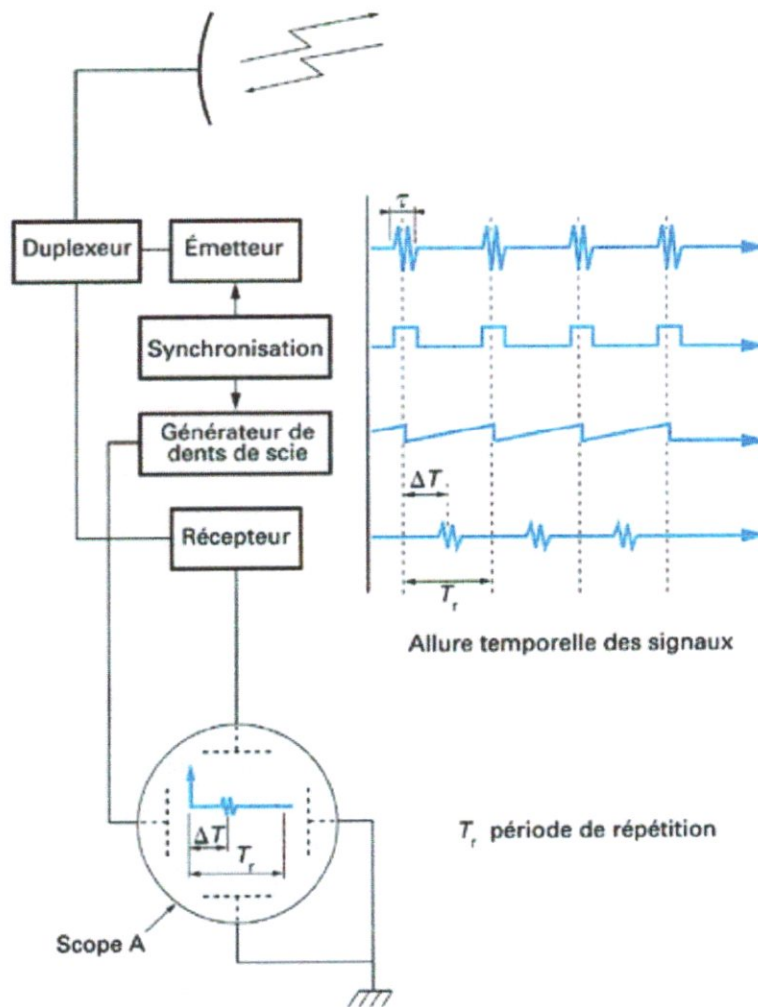
Figure. I.5 : Propagation du signal

**I.6.1 Mesure de la distance**

La mesure de la distance s'effectue par l'intermédiaire de celle du temps de trajet aller et retour de l'onde. En effet, si  $D$  est la distance du radar à la cible, et  $c$  la vitesse de propagation de l'onde, le temps de trajet aller et retour de l'onde est :

$$T = 2D / c \tag{I.1}$$

Le procédé le plus simple pour mesurer ce temps de trajet (et le premier employé) consiste dans l'utilisation d'un oscilloscope, appelé « scope A » selon le principe ci-après (Figure. I.6).



**Figure. I.6 : Principe de la mesure de distance**

Sur les plaques de déviation horizontale, on applique un signal en dents de scie dont le début est synchronisé avec l'impulsion d'émission. Sur les plaques de déviation verticale, on applique le signal perçu par le récepteur, convenablement amplifié.

Ainsi la position horizontale du spot sur le scope est proportionnelle au temps écoulé après l'émission, et une déviation verticale est le signe de la présence d'une cible.

La distance entre le radar et la cible étant une fonction linéaire du temps de trajet de l'onde, la position du signal sur l'axe horizontal du scope est bien proportionnelle à la distance radar-cible ; on peut donc graduer directement cet axe avec l'unité de distance convenable.

### I.6.2 Mesure des angles

La seule mesure de la distance est insuffisante pour localiser les objets. Elle est, dans les radars, combinée avec une mesure angulaire utilisant la directivité des antennes.

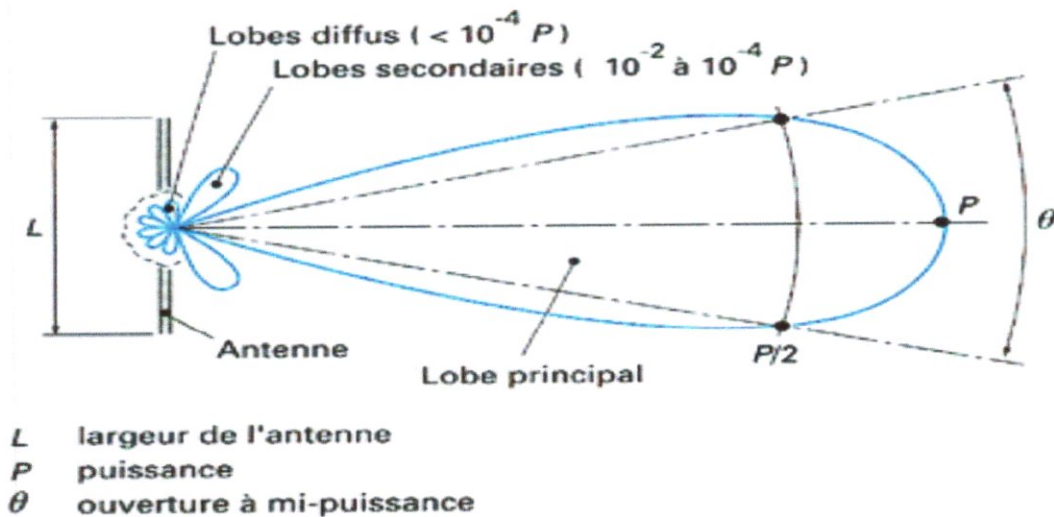


Figure. I.7 : Directivité d'une antenne

En effet, toute antenne ne répartit pas l'énergie uniformément dans toutes les directions ; en particulier une antenne de dimension  $L$  le long de laquelle on répartit l'énergie à émettre suivant une loi particulière, peut, par le jeu de la recombinaison spatiale des ondes, concentrer l'énergie émise dans un angle limité  $\theta$  (ou du moins la majeure partie de cette énergie).

Nous retiendrons la relation pratique suivante :

$$\theta = \frac{70 \lambda}{L} \quad (I.2)$$

Avec :

- $\theta (o)$  : ouverture en degrés à mi-puissance
- $\lambda$  (m) : longueur d'onde émise
- $L$  (m) : dimension de l'antenne.

$\theta$ , ouverture de l'angle dans lequel se concentre l'énergie, est également appelée, **ouverture du diagramme de l'antenne** (figure I.7).

Une telle antenne n'éclaire (ou n'envoie de l'énergie) de manière significative que dans le secteur  $\pm \theta / 2$ . Les autres secteurs sont également éclairés mais avec des niveaux beaucoup plus faibles d'un niveau relatif de  $10 - 2$  à  $10 - 4$  dans les lobes secondaires proches, inférieur à  $10 - 4$  dans les lobes diffus.

Le phénomène de propagation de l'onde étant, comme nous le verrons ultérieurement, réciproque, il en résulte que les niveaux d'énergie des signaux perçus par le radar en dehors de l'angle solide ( $\theta_s$ ,  $\theta_g$ ) seront plus faibles, toutes choses égales par ailleurs, que ceux perçus dans cet angle solide.

Ainsi donc, en associant une antenne directive à un émetteur-récepteur traitant des signaux impulsionnels, on peut mesurer simultanément la direction et la distance d'une cible, et ceci uniquement parce que cette cible réfléchit une partie de l'énergie dirigée vers elle.

Le même phénomène peut être reproduit dans le plan horizontal (ou plan de gisement) et dans le plan vertical (ou plan de site) en disposant d'antennes de dimensions horizontales et verticales adéquates.

La relation précédente s'écrira :

$$\begin{aligned} \theta_g &= \frac{70 \lambda}{L} \\ \theta_s &= \frac{70 \lambda}{h} \end{aligned} \quad (I.3)$$

Avec :

- $h$  : hauteur de l'antenne
- $L$  : largeur de l'antenne
- $\theta_g$  : ouverture de son diagramme dans le plan de gisement, à mi-puissance
- $\theta_s$  : ouverture de son diagramme dans le plan de site, à mi-puissance.

Dans ce cas, le rapport entre l'énergie émise à l'intérieur de l'angle solide ( $\theta_g, \theta_s$ ) et celle qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle (qui répartit également cette énergie dans toutes les directions), ou gain de l'antenne  $G$ , s'écrit en pratique :

$$G = \frac{K}{\theta_s \cdot \theta_g} \quad (I.4)$$

Avec :

- $K$  : coefficient compris entre 15 000 et 30 000
- $\theta_s$  et  $\theta_g$  : exprimés en degrés.

### I.7 Equation du radar

L'équation du radar traduit l'influence de phénomènes physiques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde, et jusqu'à la réception du signal réfléchi (écho). L'équation du radar permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar.

La puissance réfléchiée par la cible dépend des caractéristiques de cette cible. On utilise la notion de surface équivalente de la cible (SER) ou RCS (Radar Cross Section en anglais) pour représenter la capacité de la cible de capturer et re-rayonner la puissance dans la direction de l'antenne de réception

Par définition, la SER d'une cible, notée  $\sigma$ , est l'aire qui, placée à la même distance que la cible, intercepte une quantité de puissance incidente telle que si elle la rayonne de façon isotropique, elle produit, au niveau du récepteur radar, un écho égal à celui qu'il reçoit précisément de cette cible.

Ce qui se traduit par l'expression :

$$\sigma = \frac{4\pi \times \text{Puissance réfléchiée vers le radar} / \text{unité d'angle solide}}{\text{densité de puissance incidente}} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (I.5)$$

La SER dépend de la surface réelle de la cible, mais aussi d'un grand nombre de paramètres comme par exemple :

- Dimension de la cible par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$
- Structure aérodynamique de la cible (ailes, fuselage...)
- Angle d'illumination de la cible

- Polarisation de l'onde
- Matériau de fabrication de la cible...

L'équation du radar est donnée par l'expression :

$$P_r = \frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (\text{W}) \quad (\text{I.6})$$

Où :

$P_r$  : puissance totale captée par le radar

$P_c$  : puissance totale émise par le radar

$G$  : gain de l'antenne

$\lambda$  : longueur d'onde

$\sigma$  : Surface équivalente de la cible (SER)

$R$  : distance cible-radar

## I.8 Les sources d'interférences

Il existe de nombreuses sources de signaux malvenus, que les radars doivent pouvoir ignorer plus ou moins, afin de se focaliser uniquement sur les cibles intéressantes. Ces signaux malvenus peuvent avoir des origines internes et externes, passives et actives. La capacité d'un radar à surmonter ces nuisances définit son rapport signal à clutter (SCR) : plus le SCR est grand, plus le radar peut séparer efficacement une cible des signaux parasites alentours.

### I.8.1 Le bruit

Le bruit est un signal interne de variations aléatoires, que tous les composants électroniques génèrent de façon inhérente à différents degrés. Le bruit apparaît typiquement comme constitué de variations aléatoires superposées au signal d'écho reçu par le radar, lequel est celui qu'on recherche. Plus la puissance du signal désiré est faible, plus il est difficile de le discerner du bruit. Ainsi, les sources de bruit les plus importunes apparaissent au niveau du récepteur et beaucoup d'efforts sont faits pour minimiser ces facteurs.

Le bruit est aussi généré par des sources extérieures, principalement par les radiations thermiques naturelles de l'environnement entourant la cible du radar.



### I.8.2 Le brouillage

Le brouillage radar se réfère aux fréquences radios originaires de sources extérieures au radar, émettant à la fréquence du radar et masquant donc les cibles intéressantes.

### I.8.3 Les échos parasites

Les échos parasites sont des retours venant de cibles qui sont par définition inintéressantes pour l'opérateur radar. Les causes de ces échos sont :

- Des objets naturels tels que le sol, la mer, les forêts, les précipitations (telles que la pluie, la neige ou la grêle), les tempêtes de sable, les animaux (particulièrement les oiseaux en vol de groupe) et les turbulences atmosphériques.
- Des objets fabriqués par l'homme tels que les immeubles ou des paillettes métalliques lâchées intentionnellement comme contre-mesures dans la guerre électronique.
- Des réflexions venant de trajets par réflexions multiples sur une cible. Ainsi, le faisceau radar frappe une cible et comme l'onde émise est réfléchiée dans toutes les directions, une partie peut être réfléchiée sur une autre cible et retourner au radar. Comme le temps mis pour cette seconde réflexion pour atteindre le radar est plus long que le retour direct, elle sera placée au mauvais endroit. On peut ainsi obtenir deux cibles au lieu d'une.
- Des objets très réfléchissants visibles au travers d'un lobe secondaire de l'antenne, alors que l'antenne pointe vers une zone moins réfléchissante. On verra alors un fantôme dans la direction où pointe le lobe principal.

Ces échos parasites de tout objet autre qu'une cible, sont appelés fouillis, auxquels les anglo-saxons leurs consacrent le mot équivalent « clutter ».

Il est à noter que ce qui est un écho indésirable pour certains peut cependant être le but recherché pour d'autres. Ainsi les opérateurs à l'aviation veulent éliminer tout ce dont on vient de parler mais les météorologistes considèrent que les avions sont du bruit et ne veulent garder que les signaux provenant des précipitations.

### I.9 Principe de la détection radar

La première fonction d'un radar (radio detection and ranging) est, comme son nom l'indique, la détection de cibles, qui est un préalable à toutes les autres fonctions que peut remplir un radar moderne, de la localisation à l'imagerie ou à la classification de cibles. Pour remplir cette fonction, un radar émet une onde électromagnétique et analyse l'énergie rétrodiffusée à la recherche d'une éventuelle cible.

Si une cible est présente, elle réfléchira l'onde émise et renverra alors un écho vers le radar. Toutefois, même en l'absence de cible, des échos sont observés par le radar, dus au bruit thermique du récepteur, à la rétrodiffusion du milieu environnant (mer, sol, nuages), appelée fouillis, ou encore à un éventuel brouillage.

Le problème consiste alors à déterminer si le signal reçu est rétrodiffusé par une cible ou bien s'il n'est qu'un signal parasite. Dans ce but, le signal émis possède certaines propriétés afin de faciliter le traitement en vue de la détection.

Afin de pouvoir détecter une cible, il est nécessaire de pouvoir relier le signal qu'elle réfléchit à la forme d'onde émise.

En radar, la décision est faite en comparant le signal reçu avec un seuil. Le choix du seuil est crucial si on veut faire une détection avec un minimum de fausses alarmes.

- Si le seuil est choisi trop haut, il y aura moins de fausses alarmes, mais certaines cibles de niveau faible risquent de ne pas être détectées,
- Si le seuil est trop bas, un pic de bruit peut donner lieu à une fausse alarme.

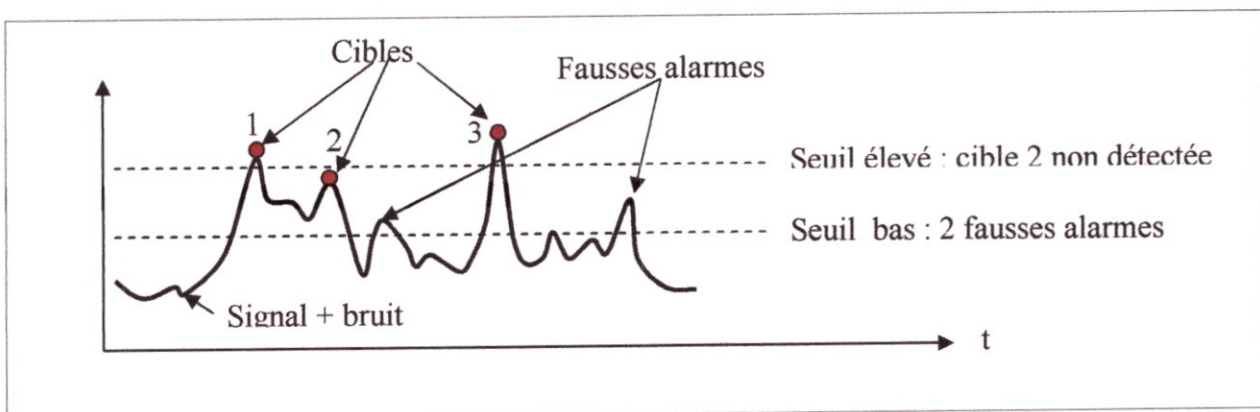


Figure I.8 : Principe de la détection

La décision est choisie parmi deux hypothèses mutuellement exclusives :

$$\begin{cases} H_0 : \text{cible absente} \\ H_1 : \text{cible présente} \end{cases}$$

A cause des interférences (bruit), cela peut conduire à quatre résultats possibles, chacun d'eux caractérisé par une certaine probabilité :

Décision	Hypothèse H0 (absence)	Hypothèse H1 (Présence)
H1 (Présence)	Décision incorrecte (fausse alarme): Proba de fausse alarme (Pfa)	Décision correcte : Proba de détection (Pd)
H0 (absence)	Décision correcte : Proba (1-Pfa)	Décision incorrecte : Proba (1-Pd)

**Tableau I.1 : Hypothèses de détection**

On utilise la théorie des probabilités pour déterminer le seuil optimum. La théorie la plus utilisée est développée pour la détection de signaux faibles dans un fond du bruit « blanc » avec une distribution gaussienne.

### I.10 Conclusion

Le premier chapitre a été réservé pour une introduction générale sur le radar : sa composition et son principe de fonctionnement, on a donné une classification des systèmes radars avec plus de détail pour le radar à impulsion qui fera l'objet de notre études au deuxième chapitre avec le radar météorologique doppler qui est un radar à impulsion.



CHAPITRE II :

*LE RADAR*  
*METEOROLOGIQUE*  
*DOPPLER*



# CHAPITRE III :

---

## ESTIMATION DES MOMENTS SPECTRAUX

---

## CHAPITRE III : ESTIMATION DES MOMENTS SPECTRAUX

---

### III.1 Introduction

Les mesures précises de précipitations et l'estimation des vitesses des vents jouent un rôle très important en prévisions météo. La première exigence du radar en hydrologie est de fournir une estimation de la quantité et de la distribution temporelle et spatiale des précipitations. Les estimations des précipitations des radars météorologiques assurent une source de données que d'autres moyens ne peuvent fournir.

Comme suite de notre travail, ce chapitre consiste à étudier les différentes mesures de radar météo Doppler tel que le taux de précipitation, la réflectivité et la vitesse de vent.

### III.2 Le calcul de la réflectivité et l'estimation du taux de précipitation

#### III.2.1 La réflectivité (Z)

L'onde électromagnétique émise par le radar se propage dans l'atmosphère et rencontre sur son passage des molécules de gaz atmosphériques, et éventuellement des gouttelettes nuageuses, des gouttes de pluie, des flocons de neige ou de la grêle.

L'absorption et la diffusion du rayonnement par ces gaz et particules produisent des ondes incidente et réfléchi.

L'écho de retour qui réfléchi par les cibles est également analysé pour son intensité afin d'établir le taux de précipitation dans le volume sondé. On utilise une longueur d'onde radar entre 1 et 10 cm afin que le retour agisse selon la loi de Rayleigh, c'est-à-dire que l'intensité de retour est proportionnelle à une puissance du diamètre des cibles en autant que celles-ci (pluie, flocons, etc.) soient beaucoup plus petites que la longueur d'onde du faisceau radar. C'est ce qu'on nomme la réflectivité (Z).

De nombreuses formules empiriques ont été proposées pour exprimer la distribution dimensionnelle des gouttes de pluie.

Pour Marshall & Palmer :

$$N(D) = N_0 \cdot \exp(-\Lambda D) \quad (\text{III.1})$$

$$N_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mn}^{-1}, \quad \Lambda = 4.1 \cdot R^{-0.21}$$

Où :

D : diamètre d'une goutte d'eau

$\Lambda$  : est la taille moyenne de la goutte

$N(D) \cdot dD$  : est le nombre de particules par unité de volume

$N(D)$  : est la distribution granulométrique des hydrométéores

$$\eta \text{ (La réflectivité radar)} = \sum \sigma_i / V$$

En utilisant l'approximation de Rayleigh :

$$\eta = (1/V) \cdot \int \sigma_i(D) \cdot N(D) \cdot dD \quad (\text{III.2})$$

L'intégrale du second membre donne le facteur de réflectivité radar :

$$Z = \int_0^{D_{max}} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD \quad (\text{III.3})$$

Le facteur de réflectivité s'exprime en  $\text{m}^6 \cdot \text{m}^{-3}$  généralement, il est ainsi exprimé en dBZ :

$$Z \text{ (dbz)} = 10 * \log_{10}[Z / Z_0]$$

Cependant la taille des éléments de précipitations étant de l'ordre du millimètre, De plus, la formule (III.3) ne tient pas compte de la nature de la cible. Pour obtenir la réflectivité équivalente ( $Z_e$ ) que voit le radar, on doit normaliser et multiplier par le carré de la constante diélectrique (K) de la cible pour tenir compte de son efficacité à réfléchir.

$$Z_e = |K|^2 \left( \frac{Z}{Z_0} \right) = \left( \frac{|K|^2}{Z_0} \right) \left( \int_0^{D_{max}} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD \right) \quad (\text{III.4})$$

$\left\{ \begin{array}{l} Z_0 = 1 \text{ mm} \text{ soit le retour équivalent d'un volume rempli de gouttelettes avec } D=1 \text{ mm.} \\ |K|^2 = 0,93 \text{ pour l'eau et } 0,24 \text{ pour la neige.} \end{array} \right.$

- La variation de diamètre et la constante diélectrique entre les différents types de précipitations (pluie, neige, bruine, grêle, etc.) est très grande et la réflectivité équivalente est donc exprimée en dBZ.
- L'antenne tourne sur son axe à un angle d'élévation donné mais émet un grand nombre d'impulsions dans chaque angle de visée. La réflectivité équivalente revenant de chaque impulsion pour chacun des volumes de cibles est donc notée pour calculer une intensité moyenne de sondage pour ce volume.

Le radar mesure la puissance de l'écho renvoyé par les cibles présentes dans l'atmosphère. La puissance reçue par le radar ( $P_r$ ) est reliée à une quantité  $Z$ , le facteur de réflectivité par l'équation radar suivante:

$$\overline{P_r} = \frac{C Z_e}{r^2} \quad (\text{III.5})$$

Où:

$P_r$  : puissance reçue par le radar

$Z_e$  : la réflectivité équivalente

$r$  : distance cible-radar

Dans cette expression,  $C$  est la constante radar qui dépend d'un certain nombre de caractéristiques intrinsèques du radar (la puissance émise, le gain de l'antenne...),  $r$  est la distance de la cible et  $K$  est la constante diélectrique de la cible. La constante diélectrique dépend de la phase des hydrométéores (eau liquide ou glace).

Une mesure correcte de la puissance reçue et de la réflectivité qu'on en déduit nécessite un étalonnage précis des systèmes d'émission et de réception du radar. Il est par exemple impératif de bien contrôler le gain des différents amplificateurs présents dans la chaîne de réception. Un étalonnage absolu de toute la chaîne d'émission et de réception est extrêmement difficile à réaliser car cela nécessiterait d'utiliser une cible extérieure dont la réflectivité est connue avec précision. Un entretien régulier du radar permet néanmoins d'assurer une grande stabilité du niveau d'étalonnage et de garantir ainsi la répétitivité des mesures.



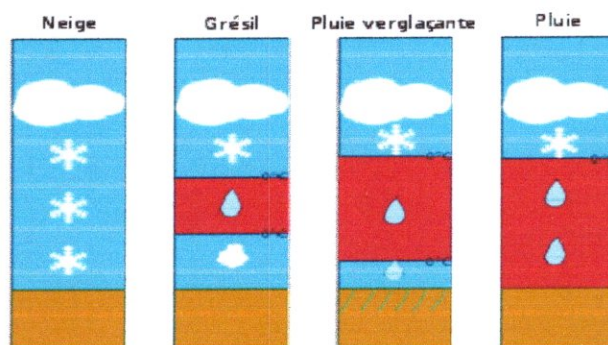
### III.2.2 L'estimation du taux de précipitation

En météorologie, le terme précipitation désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol.

La fréquence et la nature des précipitations dans une région géographique donnée sont des caractéristiques importantes de son climat. Elles contribuent de façon essentielle à la fertilité et à l'habitabilité des zones tempérées ou tropicales, dans les zones polaires, elles aident au maintien des calottes glaciaires. La précipitation peut prendre les formes suivantes (parfois mélangées):

Liquide: Pluie , Bruine, Pluie verglaçante/Bruine verglaçante

Solide: Neige, Grésil, Grêle (figure III.1)



**Figure III.1 : Type de la précipitation selon la structure thermique (bleu sous zéro degré Celsius et rouge au-dessus).**

#### III.2.2.1 Le principe de détection de précipitation

L'intensité du signal reçu par le radar météo Doppler est quant à elle proportionnelle à la puissance 6 de la taille des particules ainsi qu'à leur nombre. Il est donc possible de distinguer la bruine (faiblement visible), de la pluie, de la grêle, qui est composée de grosses et nombreuses particules, ou de la neige. Connaissant la taille des gouttes et leur nombre, il y a la possibilité, après calibrage, d'utiliser une échelle de couleur pour représenter l'intensité des précipitations.

Les gouttes de pluie, les flocons de neige et les grêlons réfléchissent les ondes électromagnétiques émises par le radar (écho) de manière proportionnelle à leur taille. La neige renvoie un écho faible, la pluie un écho plus fort et la grêle mouillée un signal très fort. Les gouttelettes d'eau constituant les nuages sont, en générale, trop petites pour être détectées par un radar normal.

La représentation des échos sur une carte montre la répartition géographique des précipitations, ainsi que leur intensité, indiquée par un code de couleurs. Cependant l'image radar est perturbée par des obstacles fixes comme les montagnes ou les constructions au voisinage immédiat de l'antenne, qui renvoient des échos parasites et masquent les zones situées au-delà. L'implantation des radars doit être précédée d'une étude de site qui prenne en compte ces éléments, afin d'assurer à cet instrument une efficacité optimale

### III.2.2.2 Estimation du taux de précipitation

La connaissance de la distribution des gouttes de pluie dans un nuage peut servir à faire un rapport entre ce qui est noté par un radar météorologique et ce qu'on obtient au sol comme quantité de précipitations.

Les premières mesures de cette distribution ont été faites de façon assez rudimentaire par Palmer, l'étudiant de Marshall, en exposant un carton recouvert de farine à la pluie durant une courte période. La marque laissée par chaque goutte étant proportionnelle à son diamètre, il peut déterminer la distribution en comptant le nombre de marques correspondant à chaque grosseur de goutte.

Le taux de précipitation ( $R$ ) est égal au nombre de particules ( $n(D)$ ), leur diamètre ( $D$ ) et leur vitesse de chute ( $v(D)$ ):

$$R(\text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}) = \frac{3.14}{3} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 \cdot n(D) \cdot v(D) dD \quad (\text{III.6})$$

### III.2.3 La relation entre le taux de précipitation et le facteur de réflectivité

La distance de la cible étant connue et en supposant que les hydrométéores sont des gouttes de pluie, la puissance mesurée par le radar peut être convertie en réflectivité en utilisant l'expression (III.3). Le radar permet donc de mesurer la réflectivité de la cible. Or, la

grandeur que l'on souhaite estimer est le taux de précipitations  $R$  exprimé en mm/h. Il n'existe pas de relation directe entre la réflectivité et le taux de précipitations. Cette relation dépend de la distribution en taille des gouttes qui est inconnue et extrêmement variable. Dans la plupart des centres météorologiques opérationnels, la même relation Z-R est utilisée:

$$Z = aR^b \quad (\text{III.7})$$

La relation Z-R a été obtenue en faisant l'hypothèse que la distribution en taille des gouttes est décrite par la relation de Marshall et Palmer (1948).

D'après Marshall et Palmer  $a$  et  $b$  sont des constantes qui dépendent du type de précipitation (pluie, neige, convective ou stratiforme)

Pour des pluies stratiforme :  $a=200$  et  $b=1.6$  (Marshall & Palmer 1948)

Pour les pluies convectives :  $a=486$  et  $b=1.37$  (Jones 1956)

La caractérisation de la distribution en taille a fait l'objet de multiples recherches et de nombreuses relations Z-R ont été proposées dans la littérature. Jusqu'à présent, ces recherches n'ont cependant pas permis de proposer des solutions satisfaisantes pour améliorer de manière substantielle l'estimation des précipitations dans des conditions opérationnelles.

### III.2.4 La mesure du taux de précipitation

La mesure des précipitations est l'une des plus complexes en météorologie car on observe une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie et les obstacles géographiques locaux gênant sa captation.

#### III.2.4.1 Calibrage hydrologique

L'application importante du radar est la mesure sur des grandes étendues, à l'aide d'un seul capteur de la quantité de précipitation atteignant le sol. Généralement on utilise deux principes pour la quantification des précipitations :

- a. La mesure de la réflectivité radar (rétrodifusion)
- b. L'atténuation du rayonnement au cours de la propagation dans le milieu diffusant.

La méthode de l'atténuation est basée sur la relation quasi linéaire entre l'intensité de pluie (R) et l'atténuation  $a_p = kR^\gamma$ .

La mesure de l'atténuation avec précision étant difficile à réaliser et peu compatibles avec les conditions d'une mise en œuvre opérationnelle.

La méthode qui est généralement utilisée pour la quantification des précipitations est la méthode de la mesure de la réflectivité radar (rétrodiffusion). La relation entre l'intensité de pluie (R) et le facteur de réflectivité radar est définie précédemment de la façon suivante :

$$Z = aR^b$$

Où : a et b sont des coefficients qui dépendent de la nature et des caractéristiques des précipitations observées.

L'objectif du calibrage hydrologique en utilisant la méthode de mesure par rétrodiffusion est la détermination d'un facteur de correction de l'intensité mesurée par le radar ou la détermination des coefficients a et b de la relation Z-R.

### **III.3 Estimation de la vitesse du vent**

#### **III.3.1 Le vent**

Le vent est un mouvement de l'atmosphère. Il peut apparaître sur n'importe quelle planète disposant d'une atmosphère. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués par deux phénomènes se produisant simultanément : un réchauffement inégalement réparti de la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète.

Les vents sont une source d'énergie renouvelable, et ont été utilisés à travers les siècles à divers usages, par les moulins à vent, la navigation à la voile, le vol à voile ou plus simplement le séchage. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre mais peut être estimée par une manche à air, un drapeau, etc.

#### **III.3.2 Le cisaillement du vent**

Le cisaillement du vent est une différence de la vitesse ou la direction du vent entre deux points suffisamment proches de l'atmosphère. Selon que les deux points de référence

sont à des altitudes différentes ou à des coordonnées géographiques différentes, le cisaillement est dit vertical ou horizontal.

Le cisaillement peut être décrit par ses composantes horizontales et verticales. Le cisaillement du vent horizontal observé à proximité des côtes (brise de mer/brise de terre) et des fronts de perturbation, et les cisaillements du vent vertical apparaissant typiquement près du sol.

### III.3.3 La mesure de la vitesse du vent par le radar météorologique Doppler

La force et la direction du vent à différentes altitudes peuvent être obtenues grâce aux mesures effectuées par le radar météorologique, il mesure le vent par effet Doppler, en d'autres termes la mesure de  $\omega = 2\pi f$  dans une fonction variant avec le temps de la forme  $y = \cos\omega t$ . Ceci est équivalent à une mesure de vitesse puisque la fréquence est liée linéairement à la vitesse par l'équation Doppler.

Le calcul de vitesse du vent est une estimation de la covariance du signal Doppler représenté par les signaux vidéo : I (Signal en phase) et Q (Signal en quadrature de phase). Le signal complexe est indispensable pour mesurer le signe de la fréquence Doppler, dans la direction du vent les fréquences sont donc abaissées, tandis que contre le vent les fréquences sont rehaussées (la longueur d'onde est augmentée dans le premier cas, diminuée dans le second).

### III.4 Etude d'un processus stochastique

Les processus déterministes et aléatoires sont les deux grandes classes de processus apparaissant selon l'évolution temporelle de ces derniers.

Les processus déterministes sont des processus parfaitement déterminés pouvant être décrits par des modèles mathématiques conformes. Tandis que les processus aléatoires appelés aussi stochastiques suivent une évolution imprévisible caractérisée par des propriétés statistiques du fait de l'impossibilité de les reproduire et de les représenter analytiquement.

#### III.4.1 Moyenne

On peut définir deux types de moyennes :

- **Moyenne statistique** : appelée aussi espérance mathématique

$$M_X(t_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} X_i(t_0) \quad (\text{III.8})$$

- **Moyenne temporelle** : Donnée par la formule :

$$\langle X_i \rangle = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta T} \cdot \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} X_i(t) \cdot dt \quad (\text{III.9})$$

Les moyennes statistiques ou temporelles sont souvent appelées moments du premier ordre.

### III.4.2 Variance

La variance représente la moyenne quadratique de l'écart à la moyenne des variables aléatoires considérées, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \text{var } X(t_0) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [X_i(t_0) - m_X(t_0)]^2 \\ \text{var } X(t_0) &= \sigma_X^2 \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

$\sigma$  est l'écart type appelé aussi moment du second ordre

### III.4.3 Notions de stationnarité et d'ergodisme

Un processus aléatoire est stationnaire si ses propriétés statistiques d'ensemble ne dépendent pas de l'instant choisi.

La stationnarité au premier ordre se traduit au niveau des moyennes par :

$$\forall t_1, t_2, \dots, t_i : m_X(t_1) = m_X(t_2) = \dots m_X(t_i) \quad (\text{III.11})$$

La stationnarité au deuxième ordre se traduit au niveau des variances par :

$$\forall t_1, t_2, \dots, t_i : \text{var } X(t_1) = \text{var } X(t_2) = \dots \text{var } X(t_i) \quad (\text{III.12})$$

La stationnarité au sens strict est difficile à vérifier. Par contre il est possible de considérer qu'un phénomène est stationnaire si ses propriétés statistiques d'ensemble ne dépendent pas de l'instant choisi sur un intervalle de temps grand devant celui du processus.

Un processus aléatoire est ergodiques si les moyennes statistiques et temporelles sont identiques.

$$\forall t_0 \text{ et } \forall k, \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} X_i(t_0) = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} X_k(t) \cdot dt \quad (\text{III.13})$$

### III.4.4 Fonction d'autocorrélation

Considérons une fonction aléatoire  $X(t)$  et la valeur de deux échantillons  $X(t_1)$  et  $X(t_2)$  aux instants  $t_1, t_2$ . La covariance est définie par :

$$C_{XX}(t_1, t_2) = E[X(t_1).X(t_2)] \quad (\text{III.14})$$

Introduisons le décalage  $\tau$  entre les instants d'observation :  $\tau = t_2 - t_1$ . La covariance s'exprime alors par :

$$C_{XX}(t_1, \tau) = E[X(t_1).X(t_1 + \tau)] \quad (\text{III.15})$$

La fonction d'auto corrélation est la covariance d'une fonction aléatoire stationnaire au deuxième ordre :

$$C_{XX}(\tau) = E[X(t).X(t + \tau)] \quad (\text{III.16})$$

La fonction d'auto corrélation d'un processus stochastique ergodique est l'une des propriétés les plus remarquables contribuant à l'extraction de l'information et l'interprétation des processus. Des valeurs de corrélation proches de l'unité indiquent de faibles changements d'un échantillon à un autre avec très peu de nouvelles informations alors que des valeurs de corrélation proches de zéro indiquent des changements considérables d'un échantillon à l'autre avec de nouvelles informations.

### III.5 Estimation des paramètres spectraux

Les méthodes classiques d'estimation de la densité spectrale de puissance ou spectres d'un processus remontent à très longtemps, elles sont fondées sur des procédures qui emploient la transformée rapide de Fourier (FFT), or l'expérience a montré que ces méthodes sont limitées considérablement. De ce fait, les méthodes qui circonviennent la résolution limitée sont d'intérêt.

#### III.5.1 Définition

Les signaux réels sont en effet rarement stationnaires sur une longue période alors nous sommes souvent contraints de limiter le signal à une fenêtre d'observation où il apparaît

comme quasi stationnaire, cette fenêtre peut parfois être excessivement courte, alors les coefficients d'auto corrélation  $R(m)$  qui sont les versions discrétisées de l'auto corrélation, le spectre  $S(f)$  ne peuvent être qu'approximativement connus, ces conditions affectent la qualité du spectre et nous parlons d'estimation spectrale.

Les méthodes non paramétriques sont les méthodes classiques d'estimation de la densité spectrale de puissance, elles consistent à bâtir des estimations point par point de l'auto corrélation et du spectre. La démarche usuelle en estimation spectrale non paramétrique consiste à un estimateur naturel qui est le periodogramme, module carré de la transformée de Fourier de l'échantillon.

Les méthodes paramétriques sont une perspective moderne de l'estimation spectrale, elles consistent à ajouter un modèle aux données observées, les paramètres du modèle caractérisent le signal, nous avons ainsi une connaissance à priori sur le processus physique qui a engendré le signal observé.

### III.5.2 Calcul des moments spectraux

Dans un volume illuminé et à une certaine vitesse radiale moyenne, les cibles météorologiques ayant des mouvements relatifs entre elles engendrent un spectre Doppler (figure III.2) spécifié par un étendu Doppler nommé variance et par une fréquence moyenne décalée par rapport à celle émise.

La puissance reçue, la vitesse moyenne ainsi que la variance sont les trois moments spectraux à estimer par intégration des échantillons du processus stochastique.

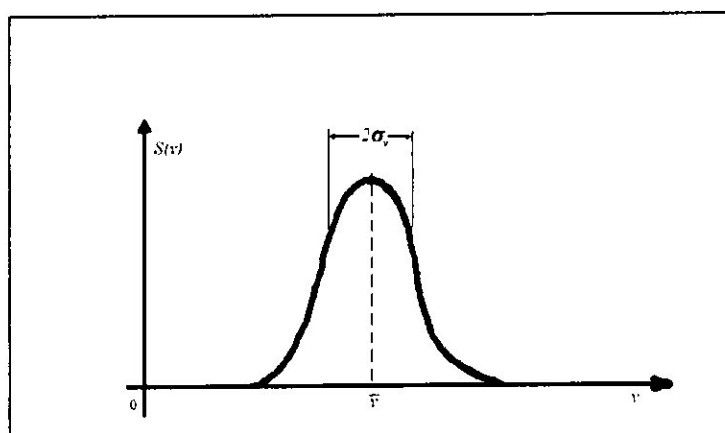


Figure III.2 : Spectre Doppler



On peut aisément montrer que le signal réfléchi de cibles météorologiques est de nature est bien représenté par un processus Gaussien. Ceci est une conséquence directe du fait que :

- 1- Le nombre de réflecteurs dans le volume d'impulsion est grand ( $> 10^6$ );
- 2- Le volume d'impulsion est grand comparé à la longueur d'onde émise
- 3- Le volume d'impulsion est rempli de réflecteurs induisant toutes les phases de 0 à  $2\pi$  à être réfléchies ; et
- 4- Les particules sont en mouvement en respect l'une pour l'autre à cause de la turbulence, le cisaillement du vent, et leurs vitesses de chute variables.

La superposition des champs électriques réfléchis d'un grand nombre de particules (chacune de phase aléatoire) tend à travers le théorème central limite à un signal de distribution Gaussienne. Vu que les particules sont en mouvement en respect l'une pour l'autre, il y a également un étalement Doppler souvent référé à la variance du spectre Doppler. Enfin, puisque toutes les particules à l'intérieur du volume d'échantillonnage se meuvent avec une certaine vitesse radiale, il ya une fréquence moyenne du spectre Doppler qui est décalée de la fréquence émise.

La densité spectrale de puissance d'un signal météorologique est schématisée sur la figure suivante et peut être interprétée comme suit :

La puissance reçue est tout simplement l'intégrale sous la courbe donnée par l'expression :

$$P_r = \int S(f)df = \int S(v)dv \quad (\text{III.17})$$

La vitesse moyenne est représentée par le premier moment spectral :

$$\bar{v} = \frac{\int v S(v)dv}{\int S(v)dv} \quad (\text{III.18})$$

Le second moment spectral  $\sigma_v^2$  est donné par :

$$\sigma_v^2 = \frac{\int (v - \bar{v})^2 S(v)dv}{\int S(v)dv} \quad (\text{III.19})$$

Où  $\sigma_v$  est la largeur de vitesse.

Les météorologistes définissent  $\sigma_v^2$  comme étant la variance à cause de son équivalence computationnelle à une variance d'une variable aléatoire continue.  $S(v)$  est analogue à une fonction densité de probabilité de  $v$ . Il est clair que le spectre Doppler contient l'information nécessaire pour la mesure d'importants paramètres spectraux.

Dans le cas le plus général, une détection en quadrature de phase est utilisée pour obtenir les parties réelles et imaginaires de l'enveloppe du signal complexe. Ils sont usuellement numérisés en un grand nombre de portes de distance (environs 1000) à la fréquence de répétition des impulsions du radar. Les séries temporelles complexes résultantes dans chaque porte peuvent être traitées grâce à la transformée de Fourier rapide (FFT) pour obtenir une estimation du spectre Doppler à partir duquel la vitesse moyenne et la variance peuvent être obtenues.

### III.6 Méthodes d'estimation spectrales

#### III.6.1 Méthode du PULSE PAIR

L'estimateur pulse pair (pp) fut décrit par Rummler en 1968, c'est une technique efficace d'estimation des paramètres du spectre doppler à savoir : la puissance, la fréquence (vitesse moyenne) et sa variance. Il est fondé sur la fonction d'auto covariance des échantillons complexes recueillis à la sortie du récepteur doppler.

Nous considérons l'estimateur à autocovariance ou nous utilisons la fonction d'auto corrélation à décalage  $T_s$ .

Nous supposons que le spectre doppler du retour météorologique est inclus dans la bande radar non ambiguë  $[-\frac{PRF}{2}, \frac{PRF}{2}]$ , la fonction d'auto corrélation est reliée à la densité spectrale de puissance  $S(f)$  du signal météorologique par :

$$\hat{R}(T_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi f T_s} df \quad (\text{III.20})$$

La vitesse et la fréquence sont reliées par la relation :

$$f_d = \frac{2}{\lambda} v_r \quad (\text{III.21})$$

Alors :

$$\hat{R}(T_s) = \frac{2}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} S(v_r) e^{jT_s v_r \frac{4\pi}{\lambda}} dv_r \quad (\text{III.22})$$

Tenant compte de l'égalité (III.23), la vitesse maximale doppler non ambiguë est limitée dans

$[-\frac{\lambda}{4T_s}, \frac{\lambda}{4T_s}]$ , d'où :

$$\hat{R}(T_s) = \frac{2}{\lambda} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} T_s v_d} \int_{-\frac{\lambda}{4T_s}}^{\frac{\lambda}{4T_s}} S(v_r) e^{j\frac{4\pi}{\lambda} T_s (v_r - v_d)} dv_r \quad (\text{III.23})$$

$S(v_r)$  étant symétrique par rapport à la vitesse moyenne, l'intégrale dans (III.23) est réelle et l'auto corrélation s'écrit :

$$\hat{R}(T_s) = |\hat{R}(T_s)| e^{j\frac{4\pi}{\lambda} T_s v_d} \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$$|\hat{R}(T_s)| = \frac{2}{\lambda} \int_{-\frac{\lambda}{4T_s}}^{\frac{\lambda}{4T_s}} S(v_r) e^{j\frac{4\pi}{\lambda} T_s (v_r - v_d)} dv_r \quad (\text{III.25})$$

Par conséquent :

$$v_d = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \arg(\hat{R}(T_s)) \quad (\text{III.26})$$

Sa variance est donnée par :

$$\sigma_v^2 \approx \frac{\lambda^2}{8\pi^2 T_s^2} \left[ 1 - \frac{R(T_s)}{R(0) - N} \right] \quad (\text{III.27})$$

La largeur spectrale est donnée par :

$$W_v = \frac{\lambda}{2\pi T_s} \left[ 1 - \frac{\hat{R}_{ZZ}(T_s)}{\hat{R}_{ZZ}(0)} \right] \quad (\text{III.28})$$

### III.6.1.1 Estimation de la fonction d'autocovariance

La classe des processus aléatoires stationnaires et ergodiques est suffisamment large pour contenir la plupart des processus utiles en pratique. Cette hypothèse conduit aux formules suivantes d'estimation de la moyenne et de la fonction d'auto covariance :

$$\begin{cases} \hat{m} = \frac{1}{l} \sum_{t=0}^{l-1} x(t) \\ \hat{R}(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \sum_{t=0}^{l-t-\tau} x_c(t+\tau)x_c^*(t) \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Avec :

$$x_c(t) = x(t) - \hat{m} \quad (\text{III.30})$$

### III.6.2 Méthode de Fourier

La DFT peut être calculée en utilisant un algorithme FFT. Toutefois, la DFT possède deux inconvénients inhérents à son approche. Le premier est que la résolution en fréquence est limitée par l'inverse de la largeur des échantillons enregistrés. Cela gêne beaucoup l'habileté de la DFT à résoudre deux ou plusieurs signaux qui sont étroitement espacés en fréquence.

Le second inconvénient implique l'utilisation d'échantillon limité en longueur pour la représentation de signaux d'étendues infinies. En assumant que les séquences seront nulles en dehors de l'intervalle fini, cela sous entend un fenêtrage des données qui sera imposé. Il est équivalent à la multiplication des données par une fenêtre rectangulaire d'amplitude unité. Dans le domaine fréquentiel, le résultat est similaire à une convolution d'un spectre avec une fonction sinc.

Ce phénomène est connu sous le nom de pertes spectrales parce que l'énergie du signal ne sera pas représentée dans tout le domaine des fréquences.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a traité deux types de mesures que fait le radar météorologique Doppler. Ces mesures, sont les mesures de taux de précipitation et estimation de vitesse de vent. Ces mesures jouent un rôle très important dans la prévision météorologique et l'hydrologie.

Le radar météorologique ne calcule pas le taux de précipitations directement, mais il estime plutôt ce taux à partir de l'énergie réfléchiée des particules de précipitations dans un volume élevé « la réflectivité ».



# CHAPITRE IV :

## SIMULATIONS ET COMMENTAIRES

## CHAPITRE IV : SIMULATIONS ET COMMENTAIRES

---

### IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application, sous l'environnement Matlab, de deux méthodes d'estimation des vitesses du vent pour faire une simulation du spectre Doppler et les signaux radar, en utilisant deux applications :

- La première application temporelle utilisant la notion d'autocorrélation (l'algorithme pulse pair)
- La deuxième application fréquentielle utilisant l'estimation de la densité spectrale de puissance (l'algorithme de transformée de Fourier)

Pour cela, dans un premier temps, on s'intéressera à la génération des signaux I et Q d'un radar à effet Doppler météorologique.

### IV.2 Estimation du spectre Doppler

#### IV.2.1 Génération des signaux I et Q

Le signal radar, souvent sous forme de train d'impulsions courtes, est généré par l'émetteur et rayonné dans l'espace par une antenne directive qui concentre l'énergie dans un faisceau étroit.

Le cerveau humain est un excellent processeur pour traiter les informations présentées en paires. Nous avons deux yeux et deux oreilles. Généralement on préfère observer avec les deux yeux ouverts et écouter avec les 2 oreilles. Ceci nous procure un champ de vision élargi et une capacité d'écoute tridimensionnelle qui nous permet ainsi de trier les différentes informations de l'environnement qui nous entoure.

La combinaison oreilles/cerveau peut être utilisée pour traiter les signaux d'entrée des détecteurs I-Q comme indiqué sur la figure (IV. 1).

Le signal d'entrée est décomposé en deux signaux et mixé avec une paire d'oscillateurs locaux avec une différence de phase de  $90^\circ$ . Ceci implique 2 signaux : le signal

I en phase sous forme d'onde cosinus, le signal Q en quadrature de phase représenté par une onde sinusoïdale.

Pour la modélisation Gaussienne, on génère deux séquences d'échantillons déphasées de 90°.

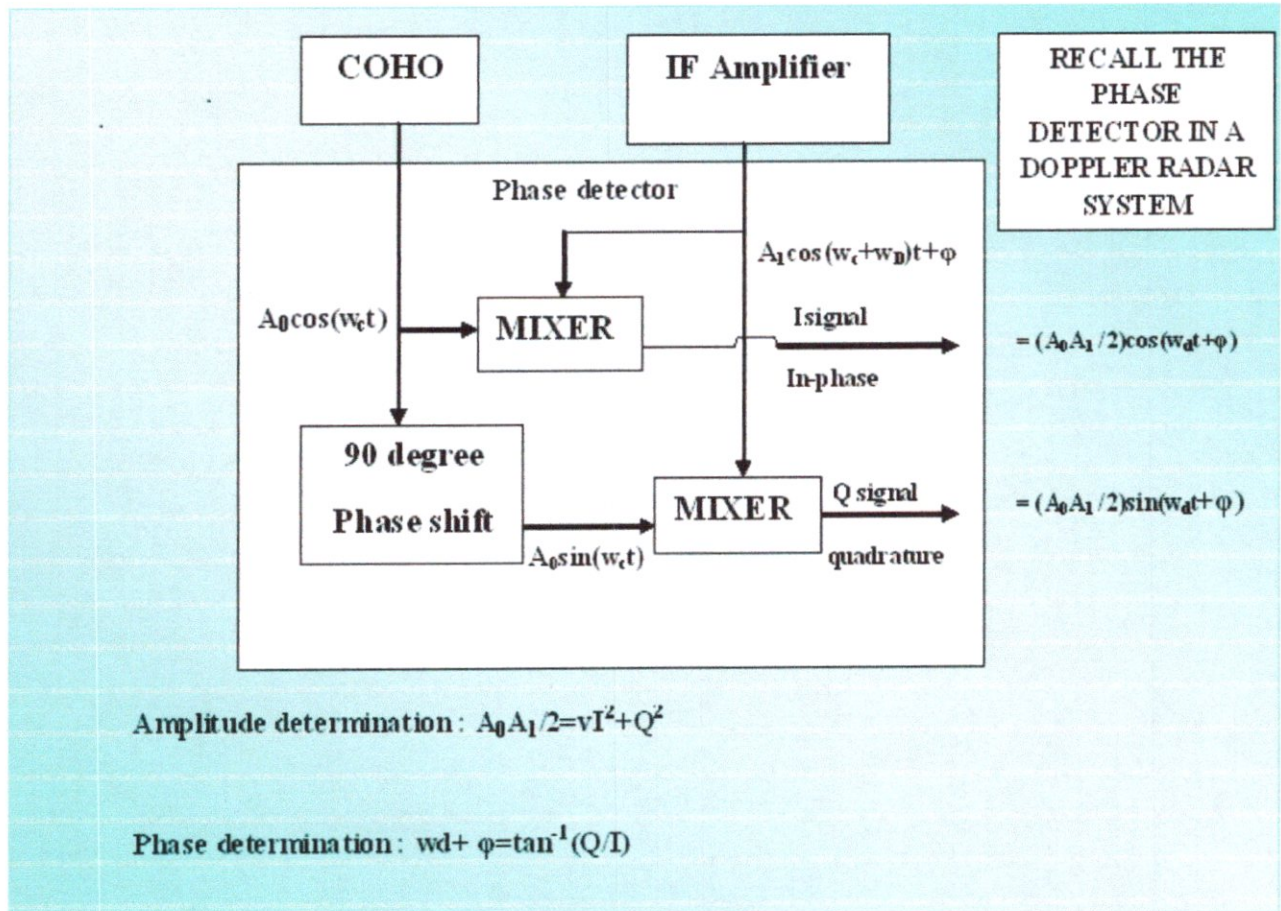


Figure IV.1 : Génération des signaux I et Q

L'estimation de spectre Doppler peut se faire par deux méthodes l'une temporelle et l'autre fréquentielle, avant d'entrer dans les détails de ces estimations nous définissons le bruit blanc et les deux signaux radar I et Q ;



### IV.2.2 Le bruit blanc

Le bruit à la réception peut être d'origine interne (générée par le mouvement des électrons) et externe capté par l'antenne avec les échos utiles, ou même provenant des nuisances externes et/ou thermiques.

Les sources de bruit externe sont diverses : bruit atmosphérique, bruit solaire... etc. Aux fréquences radar, le bruit externe reste négligeable et la sensibilité du radar sera déterminée par le bruit interne et principalement par le bruit thermique.

Généralement, en télécommunications et en radar, un bruit blanc est un bruit dans lequel la densité spectrale de puissance sera la même pour toutes les fréquences, c'est l'écart entre le signal utile transportant l'information qui intéresse le destinataire et le signal reçu effectivement, son effet se fait sentir par une diminution qualitative et quantitative de l'information contenue dans le message.

On parle souvent de *bruit blanc Gaussien*, il s'agit d'un bruit blanc qui suit une loi normale de moyenne et variance données.

### IV.2.3 Modélisation par loi gaussienne

Un signal dont la densité spectrale de puissance suit une loi de distribution gaussienne a été généré ceci étant le cas idéal où le signal est pur, cette situation est représentée par le spectre « en rouge » de la figure (IV.2), or la réalité est tout autre vu la nature omniprésente du bruit, ce qui nous a amené à bruiteur notre spectre par un bruit blanc, la superposition du signal et du bruit est donnée par le spectre « en bleu » de la figure (IV.2).

Notons que ces opérations ont lieu dans le domaine fréquentiel d'où le passage vers le domaine temporel exige l'application de la transformée de Fourier inverse donnant naissance aux séries temporelles I et Q illustrées dans la figure (IV.3).

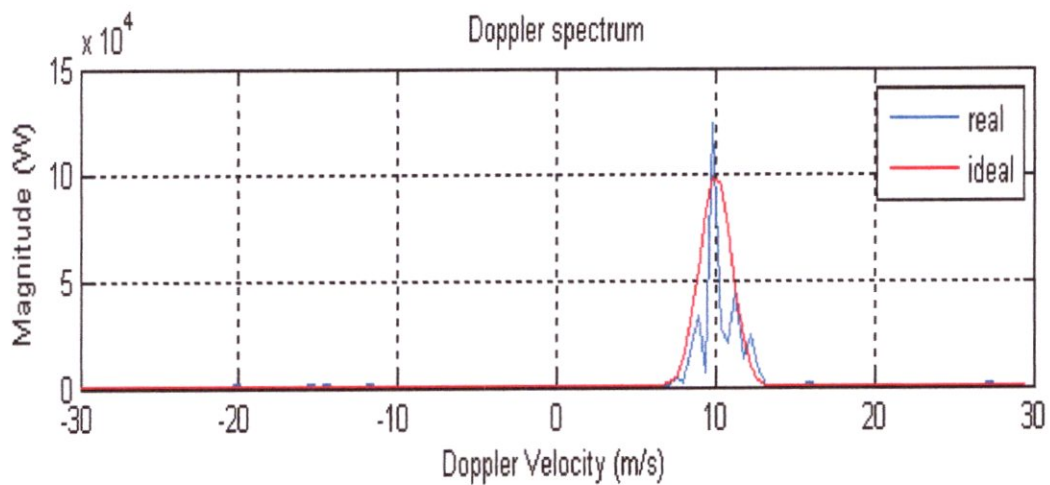
En probabilité, on dit qu'une variable aléatoire réelle  $X$  suit une loi Gaussienne, d'espérance  $\mu$  et d'écart type  $\sigma$  strictement positif (donc de variance  $\sigma^2$ ) si cette variable aléatoire réelle  $X$  admet pour densité de probabilité la fonction  $p(x)$  définie, pour tout nombre réel  $x$ , par :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{IV.1})$$

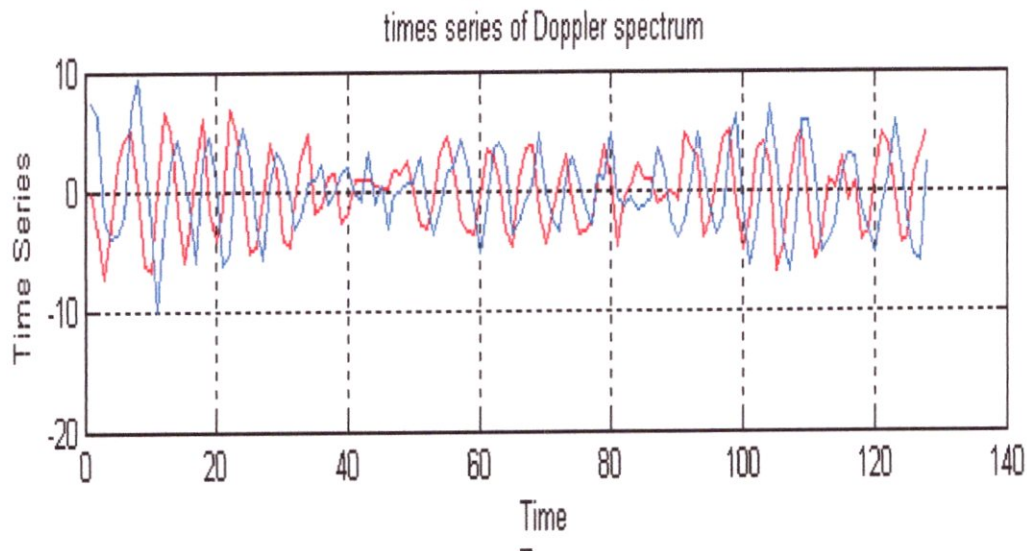
On donne également les caractéristiques radars utilisés pour la simulation :

- $f_i = 5.6 \cdot 10^9$  Hz (fréquence du signal émis)
- $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f_i$  m (longueur d'onde du signal émis)
- $T_s = 1/2000$  s (période d'échantillonnage PRF)
- SNR = 10 dB (Rapport signal sur bruit)
- $n_{data} = 128$  (Nombre de points (échantillons))
- $V_r = 5 \text{ ms}^{-1}$  (vitesse radiale de l'écho)
- $V_a = \lambda/4 T_s = 26.78 \text{ ms}^{-1}$  (Vitesse ambiguë)
- $\text{Sig} = 1 \text{ ms}^{-1}$  (largeur du spectre Doppler)
- $p_p = 250 \cdot 10^3$  Watt (puissance du signal émis)

#### ▪ Les résultats



**Figure IV.2 : Simulation d'un spectre Doppler (modélisation gaussienne)**



**Figure IV.3 : Simulation des séquences I et Q (modélisation gaussienne)**

Les travaux élaborés par R.J.Kepler et R.E.Passarelli, ont démontré que le modèle de distribution Gaussienne n'est pas toujours recommandé pour la modélisation d'un écho radar météorologique en basse altitude et en présence d'un bruit impulsif provenant des véhicules même des objets présents sur les aérodromes. Tout bruit sera représenté sur le spectre Doppler par des imperfections spectrales.

### IV.3 Estimation temporelle

L'estimation temporelle d'un spectre Doppler est réalisé par plusieurs méthodes, la méthode que nous allons utiliser est la méthode pulse pair, algorithme d'estimation des moments d'ordre zéro, un et deux qui fut décrit par Rummler en 1968, c'est une technique efficace d'estimation des paramètres du spectre Doppler à savoir : la puissance, la fréquence (vitesse moyenne) et sa variance. Elle est basée sur l'autocorrélation des signaux radar complexes  $Z(kTs)$ .

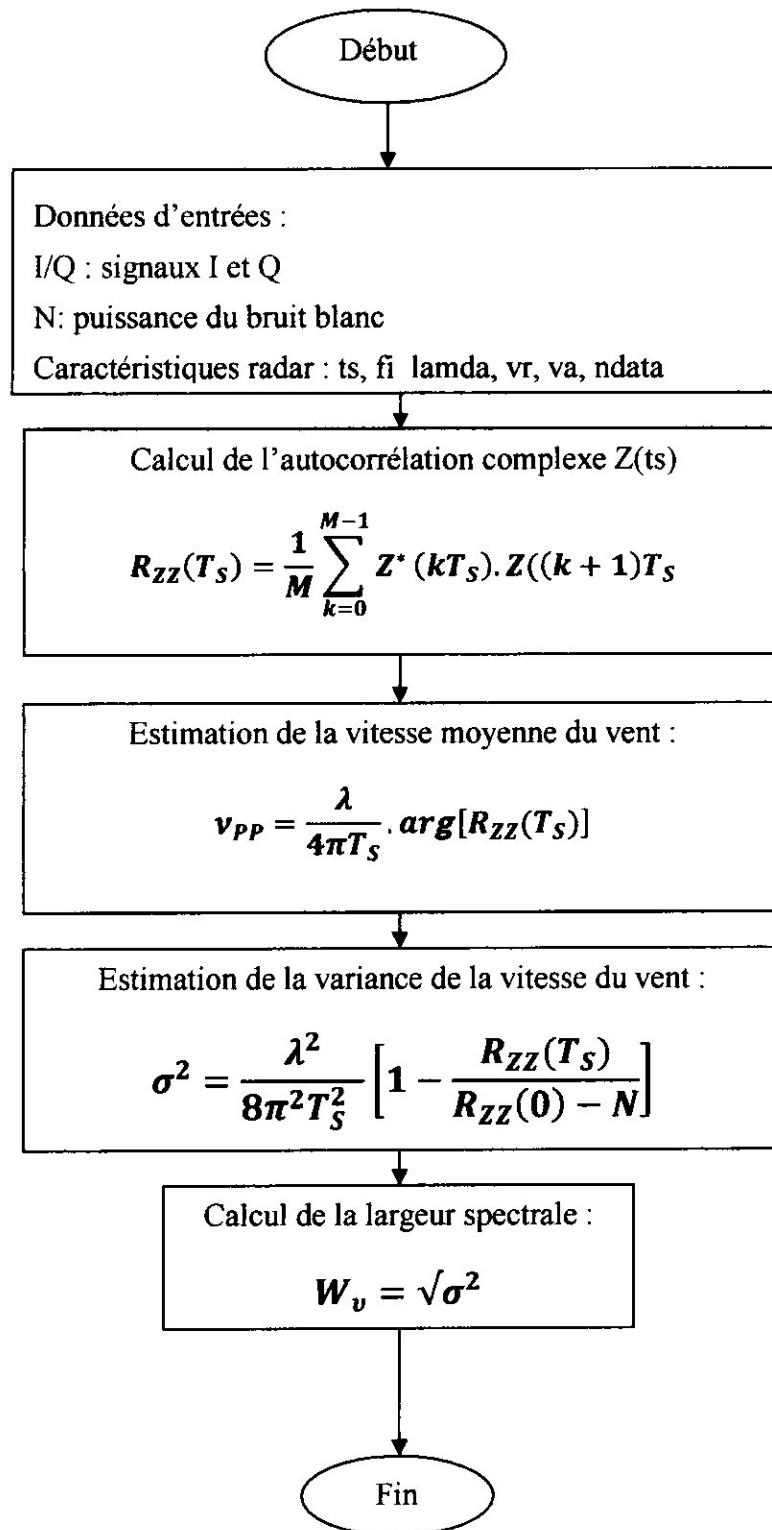
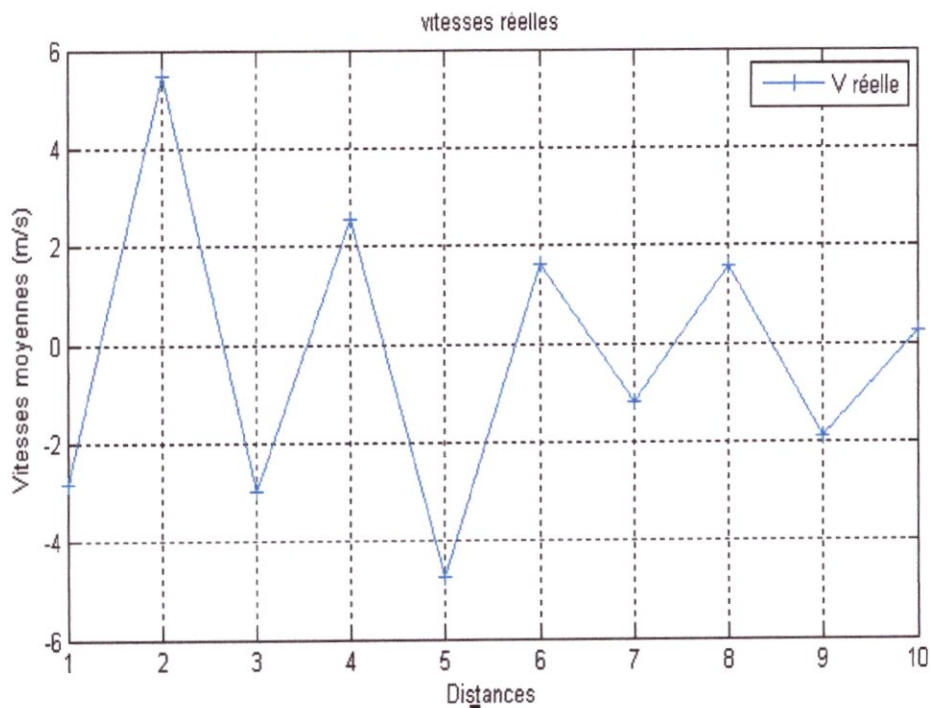


Figure IV.4 : Résumé des procédures de la méthode PULSE PAIR dans un organigramme

### IV.3.1 Modélisation par loi gaussienne

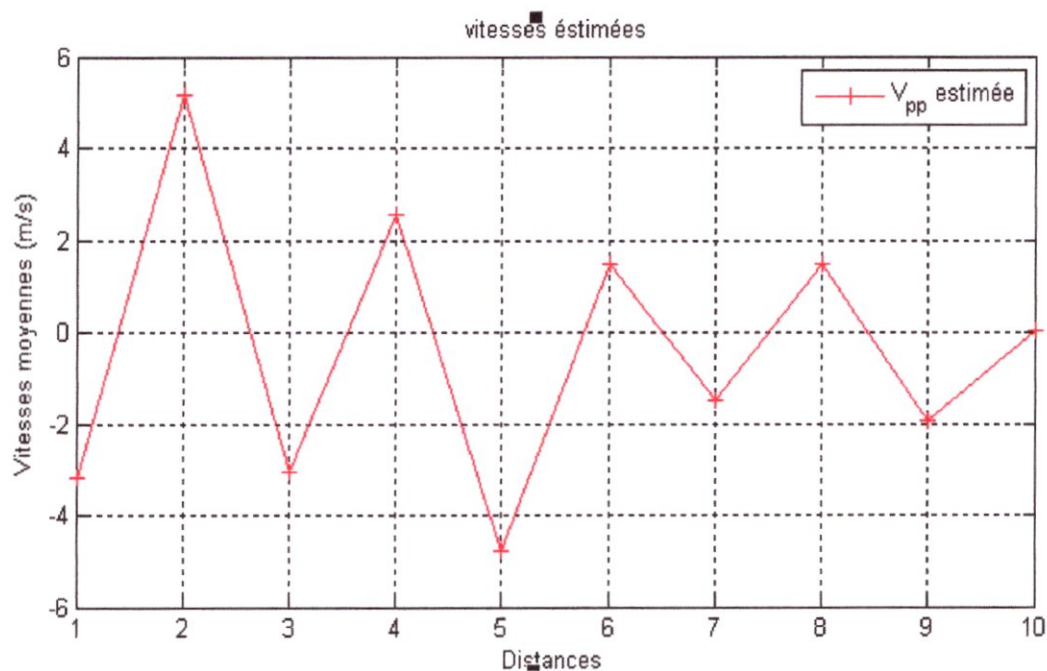
Nous donnons dans la figure (IV.5) la représentation des vitesses radiales réelles. En effet un programme de simulation sous Matlab nous permet de générer des cellules de distances radar (10 cellules), sur chaque cellule on peut introduire une vitesse de vent radiale réelle. Ce qui nous permettra par la suite de faire les estimations des vitesses moyennes du vent par la méthode pulse pair.

- **Les résultats**

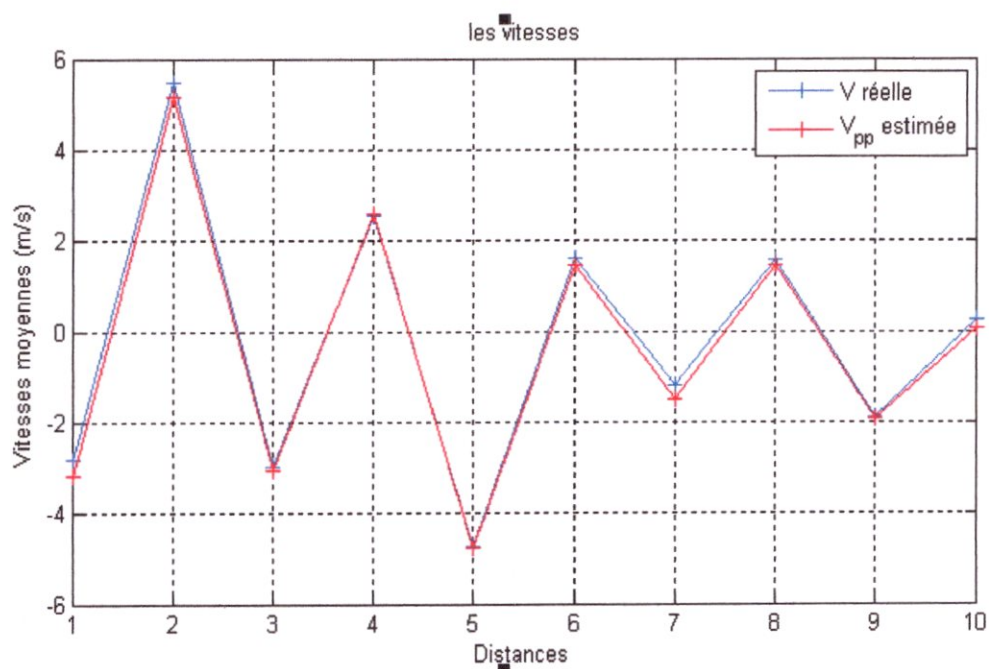


**Figure IV.5 : L'évolution du profil des vitesses réelles**

La figure (IV.6) représente l'estimation de la vitesse moyenne du vent, par la méthode pulse-pair. A première vue, nous remarquons que ces estimations suivent et ont le même profil que les vitesses réelles.



**Figure IV.6 : Estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode du PULSE PAIR**

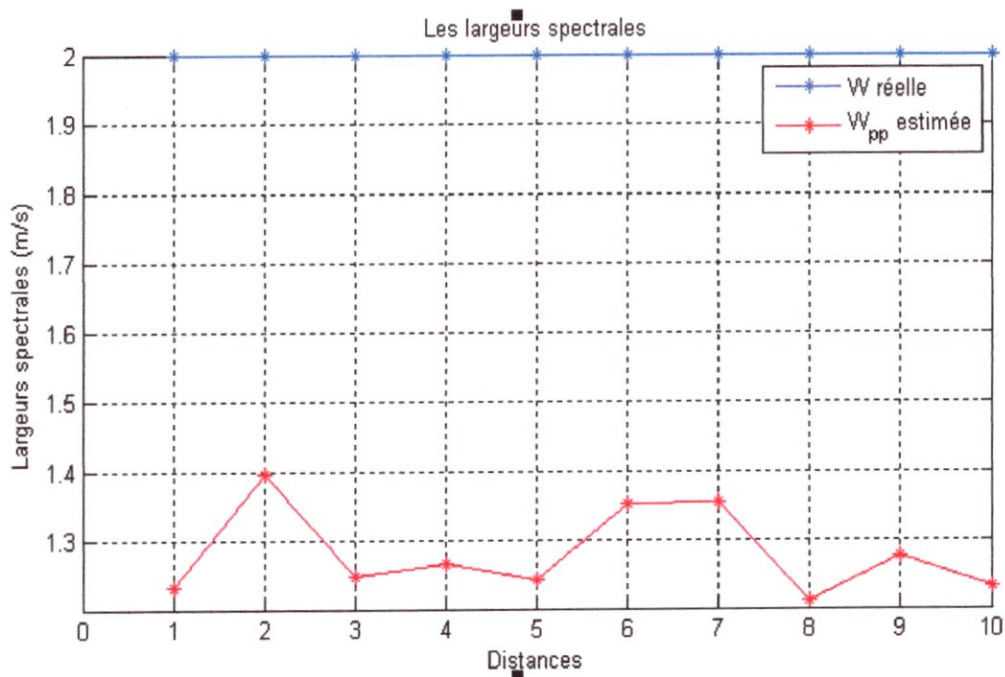


**Figure IV.7 : Comparaison entre l'estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode du PULSE PAIR et la vitesse réelle**

D'après la figure, nous remarquons que l'estimation faite par la méthode pulse paire pour l'estimation de la vitesse moyenne, est proche de la vitesse réelle. Notons également que cette méthode est très rapide pour le calcul de l'ensemble des paramètres à estimer, ce temps est évalué à 2.36 sec pour l'ensemble des opérations. la vitesse de convergence de cette méthode est également rapide, car l'ensemble convergent dès la 4<sup>ème</sup> itération. Seul inconvénient c'est que les termes d'autocorrélation sont difficiles à interpréter.

De même on peut aussi faire la représentation de la variance des vents estimés, seulement en prenant la racine carrée de la largeur spectrale. Rappelons aussi que si la variance estimée est très élevée, cela signifie que le modèle est sensible au bruit.

Sur la figure (IV.7), on a représenté le profil des vitesses estimées et réelles afin de bien voir leurs évolutions. Nous remarquons qu'ils ont la même évolution et qu'ils ne sont pas très éloignés.



**Figure IV.8 : Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode PULSE PAIR**

#### IV.4 Estimation fréquentielle

L'algorithme d'estimation des moments d'ordre un et deux (algorithme de Fourier DFT), pour l'estimation de la vitesse radiale moyenne de la microrafale de vent, de sa variance et de la largeur spectrale Doppler dans le domaine fréquentiel, est donné ci-dessous par l'organigramme.



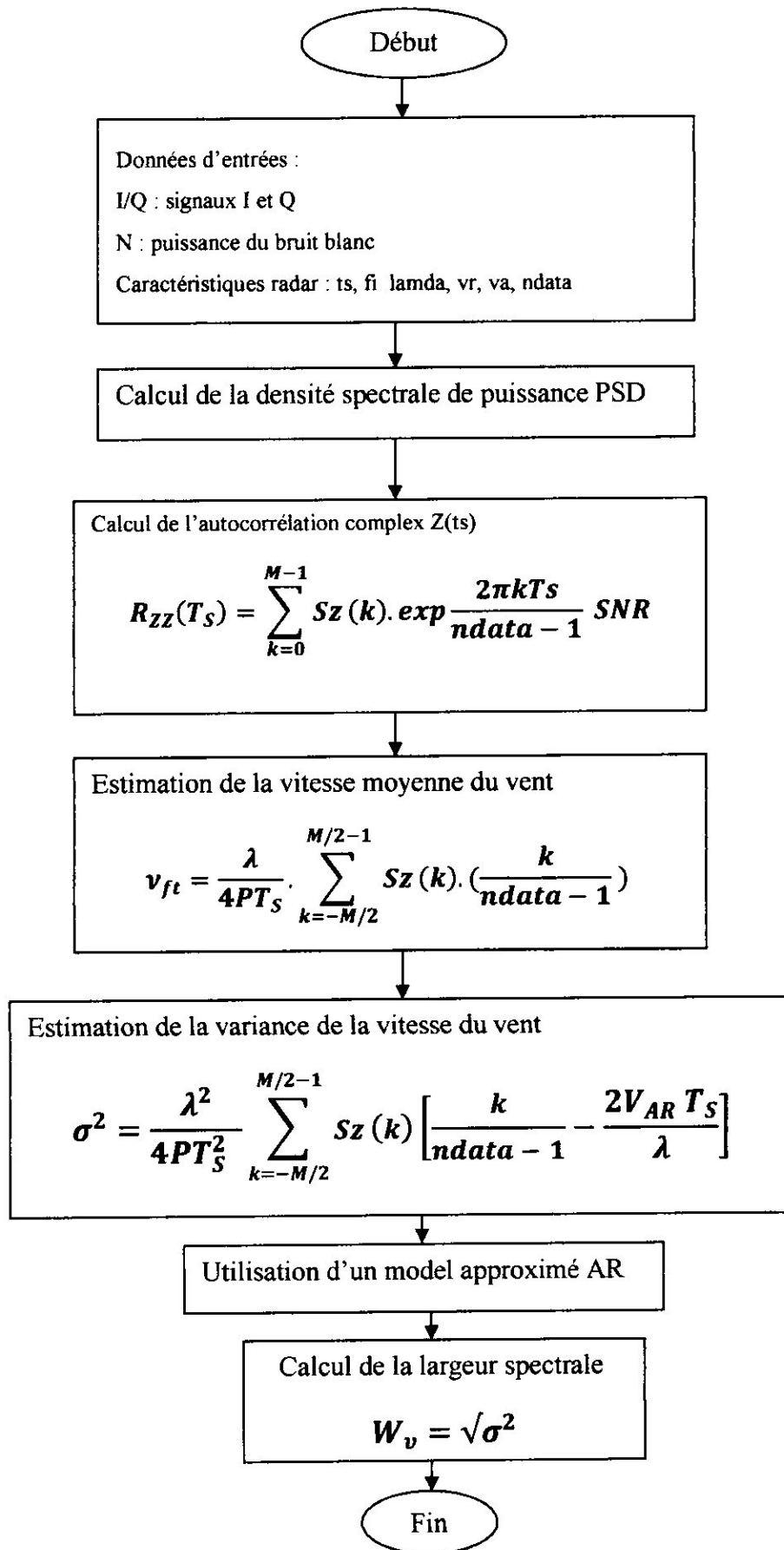


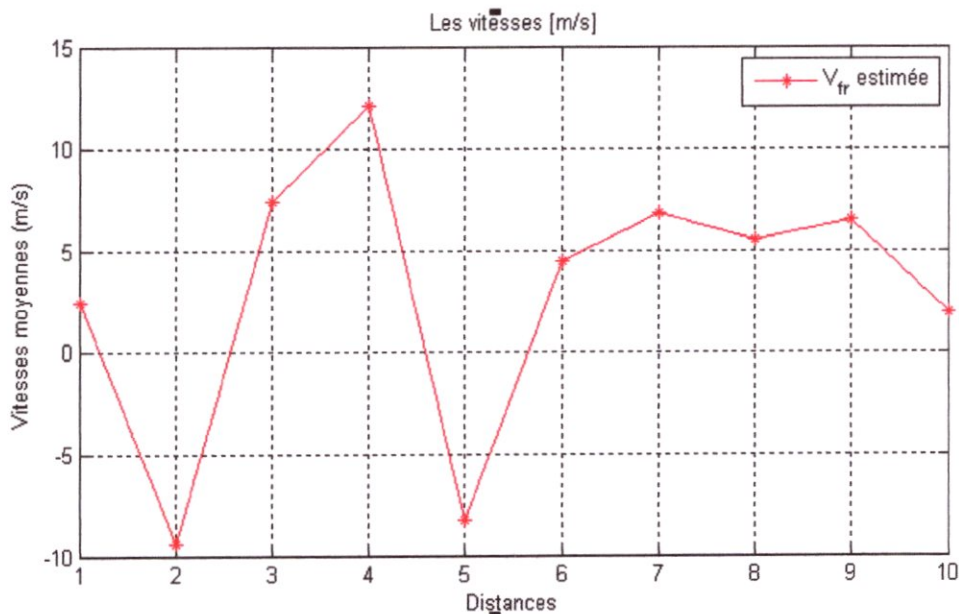
Figure IV.9 : Résumé des procédures de la méthode FOURIER dans un organigramme

L'algorithme utilisé pour la simulation de cette méthode d'estimation fréquentielle des moments d'ordre un et deux du spectre Doppler, est basée sur l'évaluation de la fonction de densité spectrale de puissance (DSP) des signaux radar reçu.

D'après la figure, nous remarquons que l'estimation faite par la méthode Fourier pour l'estimation de la vitesse moyenne, est proche de la vitesse réelle. Notons également que le temps de calcul de cette méthode qui est évalué à 4.06 sec pour l'ensemble des opérations et qui est supérieur par rapport au temps utilisé par la méthode pulse-pair. la vitesse de convergence de cette méthode est également lente, car l'ensemble des estimations convergent dès la 10<sup>ème</sup>.

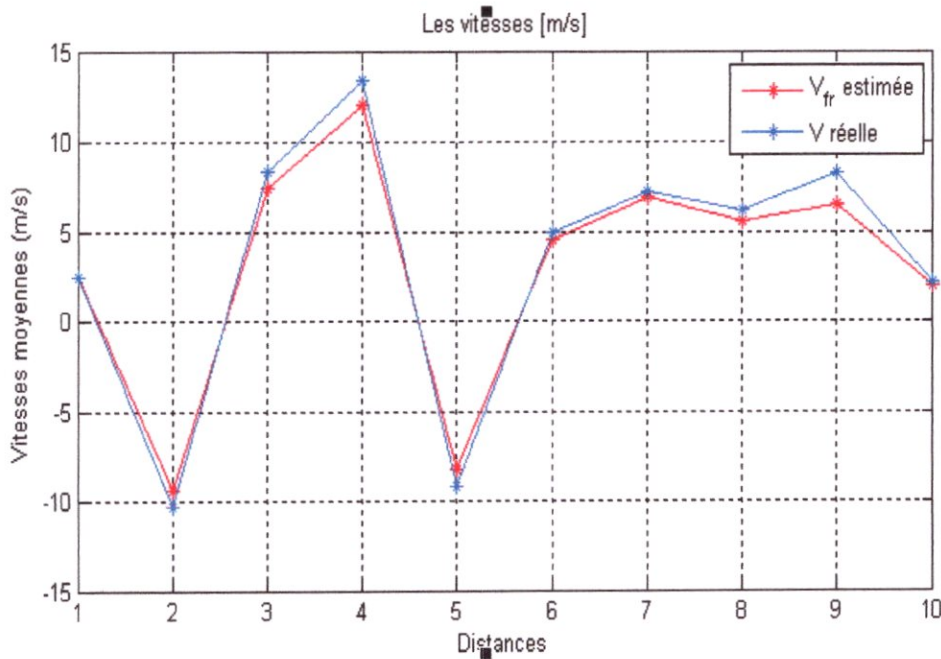
De même on peut aussi faire la représentation de la variance des vents estimés, seulement en prenant la racine carrée de la largeur spectrale. Rappelons aussi que si la variance estimée est très élevée, cela signifie que le modèle est sensible au bruit.

La figure (IV.10) représente l'estimation de la vitesse moyenne du vent, par la méthode Fourier. A première vue, nous remarquons que ces estimations suivent et ont le même profil que les vitesses réelles.



**Figure IV.10 : Estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode de FOURIER**

Sur la figure (IV.11), on a représenté le profil des vitesses estimées et réelles afin de bien suivre leurs évolutions. Nous remarquons qu'ils ont la même évolution et qu'ils ne sont pas très éloignés.

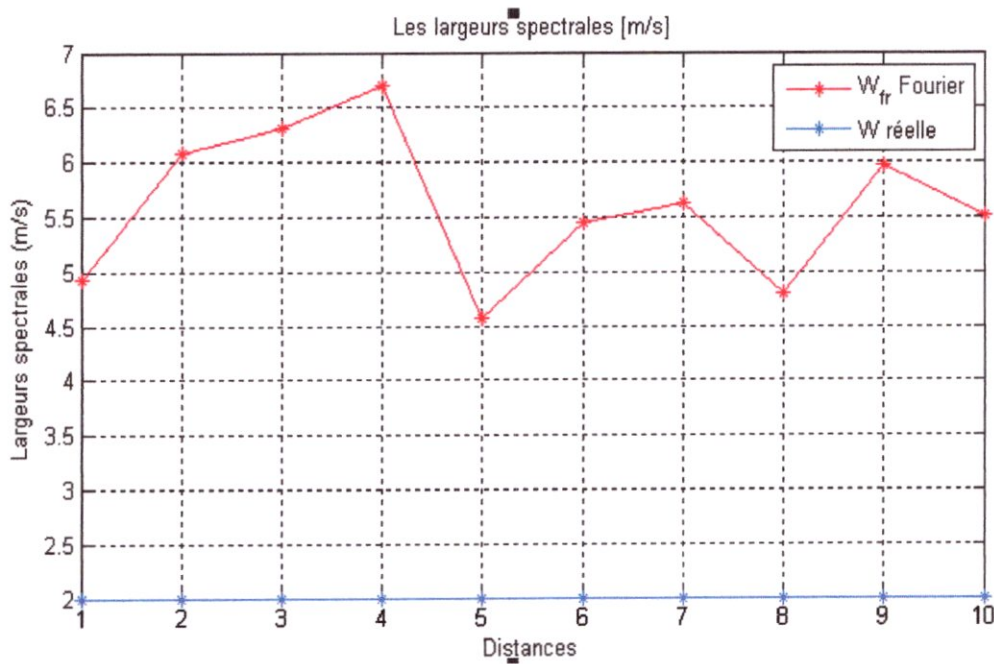


**Figure IV.11 : Comparaison entre l'estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode de FOURIER et la vitesse réelle**

D'après la figure (IV.11), nous remarquons que l'estimation faite par la méthode Fourier pour l'estimation de la vitesse moyenne, est proche de la vitesse réelle. Notons également que cette méthode d'estimation des moments d'ordre un et deux du spectre Doppler basée sur l'évaluation de la fonction de densité spectrale de puissance (PSD) des signaux radar reçus.

Le temps du calcul de cette méthode qui est évalué à 4.06 sec pour l'ensemble des opérations, et qui est supérieur par rapport au temps utilisé par la méthode pulse-pair. La vitesse de convergence de cette méthode est également lente, car l'ensemble des estimations convergent dès la 10<sup>ème</sup> itération. Seul inconvénient c'est que les termes d'autocorrélation sont difficiles à interpréter.

De même on peut aussi faire la représentation de la variance des vents estimés, seulement en prenant la racine carrée de la largeur spectrale. Rappelons aussi que si la variance estimée est très élevée, cela signifie que le modèle est sensible au bruit.



**Figure IV.12 : Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode de FOURIER**

La méthode d'estimation temporelle Pulse-pair est une simple méthode à programmer vue qu'elle ne fait appel qu'au calcul de la fonction d'autocorrélation des signaux complexes  $Z(kTs)$  de l'écho radar Doppler reçu.

C'est une méthode très rapide, car le temps d'exécution de l'ensemble de ces instructions pour toute la portée radar nécessite un temps de 2.36 sec.

Sa vitesse de convergence est aussi très remarquable. L'estimation faite par cette méthode pour la vitesse radiale moyenne du cisaillement du vent du spectre Doppler, est très proche de la vitesse réelle.

L'estimation de la variance  $\sigma_v^2$  (m/s)<sup>2</sup> et de la largeur spectrale  $W$  (m/s), sont nettement plus faibles en les comparant par rapport à celles de la méthode spectrale FFT. son seul inconvénient est que les résultats liés à la fonction d'autocorrélation sont difficiles à interpréter, contrairement à ceux des méthodes spectrales qui utilisent des densités de puissances, faciles à lire et à interpréter.

La méthode d'estimation spectrale de Fourier (FFT) est moins précise que la méthode Pulse-pair, car elle estime les vitesses radiales du cisaillement du vent au-dessous de la valeur réelle.

Le temps d'exécution est nettement supérieur à celui de la méthode Pulse-pair. Ceci est évident du fait qu'elle utilise le calcul de densité spectrale de puissance (PSD) pour l'estimation des moments spectraux d'ordre un et deux.

La remarque qu'on peut donner par rapport à cette méthode spectrale DFT est que l'estimation de la variance et la largeur spectrale de la vitesse moyenne sont trop importantes avec un rapport signal sur bruit bas ( $SNR=10\text{db}$ ), en les comparant avec celles estimées par la méthode Pulse-pair.

#### IV.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, on a fait des simulations des moments spectraux du radar Doppler météorologique utilisant deux méthodes d'estimation.

L'application des deux méthodes pour l'estimation des caractéristiques spectrales de l'écho météorologique du cisaillement du vent, à savoir la vitesse radiale moyenne du cisaillement de vent, sa variance et sa largeur spectrale nous mené a déduire que :

- L'algorithme d'estimation pulse paire est un algorithme simple à programmer qui ne considéré que les autocorrélations des signaux complexes des échos radar reçus. Mais cet algorithme est difficile à interpréter.
- La méthode d'estimation spectrale de Fourier (FFT) est moins précise que la méthode Pulse-pair, car elle estime les vitesses radiales du cisaillement du vent au-dessous de la valeur réelle.



CONCLUSION



GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

---

Dans cette étude on s'est intéressé à l'estimation des propriétés spectrales du spectre Doppler reçues par un radar terrestre météorologique. L'intérêt de ces estimations est celui de donner une marge de temps pour avertir les aéronefs d'une éventuelle perturbation pouvant engendrer des catastrophes aériennes.

Deux méthodes ont été utilisées à cet effet, et qui sont :

- la méthode pulse pair (domaine temporel)
- la méthode de Fourier (domaine fréquentiel)

L'estimateur temporel pulse pair est le plus rapide car il utilise les autocorrélations des signaux I et Q pour le calcul de la vitesse moyenne du vent et sa variance contrairement à l'estimateur fréquentiel Fourier qui emploie la transformée de Fourier pour le calcul de la densité spectrale de puissance PSD du spectre Doppler reçu, qui est nécessaire pour les estimations.

La méthode de Fourier est l'une des méthodes spectrales les plus utilisées, elle utilise également le calcul de la fonction d'autocorrélation des signaux, mais de façon indirecte, car dans cette méthode on doit d'abord passer par le calcul de la densité spectral de puissance PSD. Son inconvénient majeur réside dans le fait qu'elle a un temps d'exécution plus important.

Le choix de l'estimateur à utiliser est un compromis entre un temps de calcul réduit (traitement en temps réel) et des erreurs d'estimation minimales, par conséquent et d'après les résultats des simulations, l'estimateur pulse pair est considéré comme étant le meilleur estimateur dans le domaine temporel.

Les études dans le domaine du traitement du signal radar météorologique sont toujours d'actualité et en développement perpétuel, les prévisionnistes sont de plus en plus exigeants

en matière de précision et de volume d'informations, développant ainsi la prévision d'ensemble plus apte à prévoir les phénomènes météorologiques dangereux que la prévision classique (l'exemple du réseaux radars NEXRAD), bien que gourmande en calcul, cette technique de prévision du temps pourrait donc devenir un excellent outil de gestion du risque météorologique.

L'aspect imprévisible des phénomènes météorologiques et des changements climatiques fait de la météorologie un domaine très sensible, la prévision est indispensable pour alerter les populations en cas de catastrophes naturelles (cyclones, tornades...), dans ce but des investissements en matière de matériels de prévision sont indispensables, avec l'installation de radar météorologiques surtout en zones de forte perturbations climatiques, l'amélioration des méthodes de traitement de données radars pour offrir une meilleur précision et même d'intégrer le traitement Doppler dans radar hydrologique.



A decorative graphic on the left side of the page consists of a vertical dashed line, a solid dark blue vertical bar, and a solid light blue vertical bar. A horizontal dark blue bar crosses these vertical elements. The word 'BIBLIOGRAPHIE' is centered to the right of these elements.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] SKOLNIK Merrill I « RADAR HANDBOOK »MecGraw-Hill companies, second edition 1990.
- [2] Mr MEGUELATI « cour RADAR »
- [3] Mr LAURENT Déjean « Détection de petites cibles marines en milieu côtier par radar aéroporté », thèse de Doctorat présenté à Telecom Bretagne, 2009.
- [4] Mr LAGHA « Estimation de la vitesse moyenne et de la variance d'un cisaillement de vent a basse altitude via des méthodes spectrales » thèse Magister, 2003.
- [5] M<sup>elles</sup> HAREDJ Lynda et LEBAL Naima « Simulation des échos et calcul de réflectivité pour radar météorologique », promotion 2008-2009.
- [6] M<sup>elles</sup> GUETTAF Iman et BOUGUEDJANI Amel « Simulation et génération des signaux radar météorologique Doppler par deux modélisations gaussienne et extrême value », promotion 2009-2010.
- [7] MAUPRIVER , Michel SANDRA ,Jean Pierre.les profileurs de vent à vocation opérationnelle météorologie société Météorologique de France, Novembre 2002.
- [8] <http://www.Wikipedia.com/Météologie aéronautique>.
- [9] <http://www.Wikipedia.com/radar météorologique>.
- [10] <http://www.Radartutorial.eu>
- [11] <http://www.Techniques de l'ingenieur.com>