

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DEHLEB BLIDA



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Aéronautique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention

Du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique

Option : installations

## **THEME**

# **SIMULATION ET GENERATION DES SIGNAUX RADAR METEOROLOGIQUE DOPPLER PAR DEUX MODELISATIONS GAUSSIENNE ET EXTREME-VALUE**

**PRESENTE PAR :**

✚ GUETTAF Iman  
✚ BOUGUEDJANI Amel

**ENCADRE PAR :**

-M<sup>r</sup>: LAGHA Mohand  
-M<sup>r</sup>: SAIDANI Amar

2009-2010



## *Remerciements*

*Ils vont, tout d'abord, à Allah qui a insufflé en nous la vie et nous a comblées de ses bienfaits.*

*Ils vont aussi à chers parents qui furent un exemple d'agrégation et de sacrifice pour que ce travail puisse voir le jour.*

*Ils vont à notre promoteur M.LAGHA Mohned qui nous a constamment soutenu.*

*Ils vont également à Monsieur NAILI directeur général de l'Office National de la Météorologie qui nous a ouvert les portes de l'ONM.*

*Ils vont aussi à Monsieur SAIDANI Amar, ingénieur au Centre National de la Maintenance et d'Installations Météorologiques (CNIM) d'avoir accepter de nous encadrer et de nous porter son aide pendant toute la durée du stage à l'Office National de la Météorologie (ONM).*

*Ils vont à Monsieur BOULOUD le sous directeur de la zone de maintenance de l'aéroport HOUARI Boumadiane.*

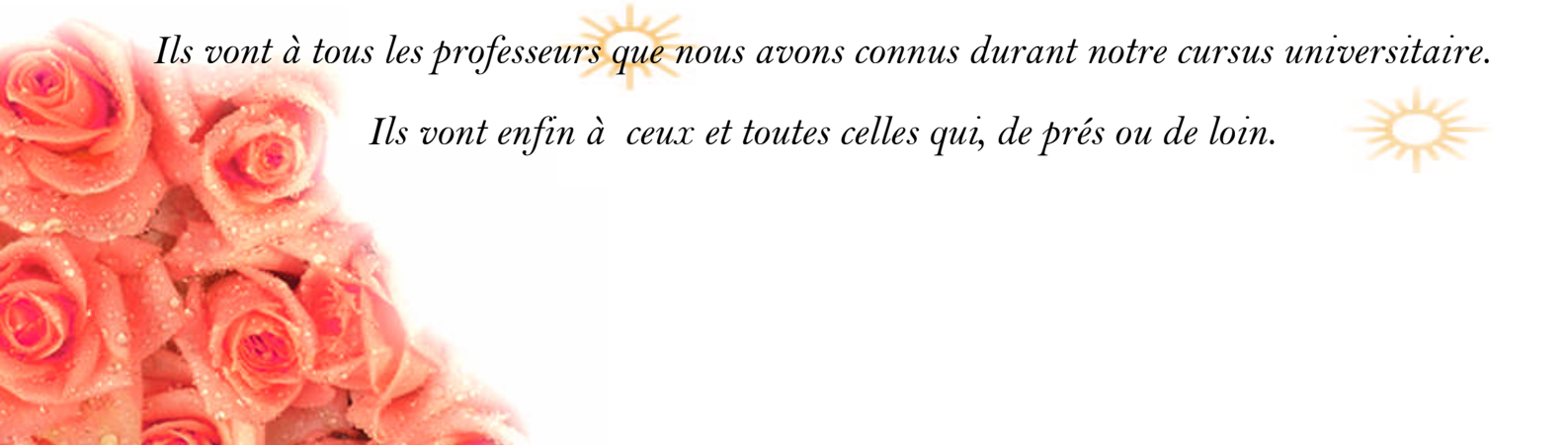
*Ils vont à Monsieur BOUKAZATA le chef de département d'électronique de la zone de la maintenance de l'aéroport HOUARI Boumadiane.*

*Ils vont à toute les travailleurs de la zone de la maintenance de l'aéroport HOUARI Boumadiane surtout : Monsieur YAHIA, Monsieur MAKID Abd Arahman, Monsieur BADJI Laid, Monsieur DJAKHDJOKH, Monsieur BACHTA Nourdine.*

*Ils vont à Monsieur SEFRIOU Toufik qui nous aide et encourage à l'aboutissement de ce travail.*

*Ils vont à tous les professeurs que nous avons connus durant notre cursus universitaire.*

*Ils vont enfin à ceux et toutes celles qui, de près ou de loin.*





# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail particulièrement à :*

*Mon père, qui n'a jamais cessé de m'encourager à poursuivre mes études en  
m'apportant le soutien moral, financier et matériel,*

*Ma mère qui a toujours cru en moi malgré les obstacles que j'ai pu rencontrer tout au  
long de ce cursus universitaire,*

*Mes frères et sœurs, merci pour votre assistance et le réconfort que vous m'avez  
toujours apporté en dépit des distances qui nous séparent,*

*Toutes les autres personnes que je porte dans mon cœur et qui ont sans le savoir  
participé de manière considérable à ma réussite,*

*À ceux que ma plume a oublié.*



*Bouguedjani Amel*

# Dédicace

Avant tout je remercie Dieu ; qui ma donner le courage, la confiance,  
la sagesse de bien terminer ce travail.

Nul ne peut égaler la tendresse et la gentillesse des parents, nul ne peut  
savourer le succès de quelqu'un autant que les parents, pour cette raison;

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ma donner le courage d'aller jusqu'au  
bout de ce travail :

Mon père : Amar et Ma mère : Rabiha... (que Dieu mes les gardes).

Sans oublier beau père Mohammed et belle mère Massouda.

Je le dédie à L'homme de ma vie ; mon époux : Sefriou Toufik.

Je dédie ce mémoire à tout:

- Mes chers frères : Abdelghani et Sami.
- Mes sœurs qui ont fait mon bonheur : Sabrina ; Siham; Nadjet;  
Basma ; Randa ; Faten; Dikra.
- Mes chers oncles et tantes et surtout mes chers neveux mino  
mohamed, abdelali et ma nièce lina.

Je n'oublie pas de le dédier à ma binôme Amel et surtout

Mr Saidani Amar et Moussa Toufik.

En un mot, à toute ma famille et surtout la famille Sefriou et Zarfa à mes  
amis et tous ceux qui contribue de pres ou de loin à ma formation.

Sans oublier tout mes chers professeurs de l' IAB.



# SOMMAIRE

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le radar météorologique</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2.Historique.....	3
I.3.Radar météorologique.....	4
I.3. 1. Le radar.....	5
I.3.1. 1. Définition.....	5
I.3.1.2.Les caractéristiques du signal radar .....	5
I.3.2.Météorologique.....	9
I.3.2.Définition.....	10
I.3.2.2.Prévision météorologique.....	10
I.4.Principes du radar météorologique.....	10
I.4.1.Emission.....	11
I.4.2.Rétrodiffusion.....	11
I.4.3.Réception.....	11
I.4.4. Les fréquences radar.....	12
I.5. Caractéristiques du radar météorologique.....	13
I.5.1. Gain d'antenne.....	13
I.5.2. Résolution.....	14
I.5.2.1. Résolution radiale.....	14
I.5. 2. 2. Résolution transversale.....	15
I.5. 2. 3. Volume de résolution de l'impulsion.....	15
I. 5. 3. Sensibilité du radar.....	15
I.6. Equation du radar météorologique.....	16
I.7.La cible.....	18
I.7.1. Cibles météorologiques.....	18
I.7.2.Cibles non météorologiques.....	19
I. 8. Types principaux d'images produites.....	20

I.8.1.Conventions d'affichage .....	20
I.8.2.PPI (Plan Position Indicateur) : .....	21.
I.8.3. RHI.....	22
I.9.Conclusion.....	23

## ***Chapitre II : Le radar météorologique Doppler***

II. 1. Introduction.....	24
II. 2. L'effet Doppler .....	25
II. 3.Le principe de fonctionnement de radar météorologique doppler.....	25
II. 4. La fréquence Doppler.....	26
II. 5. Distance totale à la cible dans les radians.....	27
II. 6. Algorithme de pulse-Paire de Phase.....	29
II. 6. 1. La Phase d'une vague .....	30
II. 7. Le spectre de puissance de Doppler .....	31
II. 7. 1. Largeur De Spectre.....	32
II. 8. Vitesse De Nyquist .....	33
II. 8. 1. Pliage De Vitesse .....	34
II. 8. 2. Rapport entre la vitesse de Nyquist et la gamme non ambiguë .....	35
II. 9. Vitesses Doppler - endroit de faisceau au-dessus de la terre .....	35
II. 10. L'interprétation de vitesse Doppler.....	36
II. 11. Affichage D'Azimut De Vitesse (VAD).....	37
II.12.Radar cohérent .....	38
II.13.Conclusion.....	40

## ***Chapitre III : Système radar météorologique Doppler DWSR-2501C***

III.1.Introduction.....	41
III.2.Les caractéristiques techniques et conception technique du DWSR-2501.....	41
III.2.1 Les caractéristiques techniques.....	41
III.2.2. Conception technique du DWSR-2501C .....	42
III.2.2.1.Antenne/pied de série D14CM1.....	42
III.2.2. 1.1.Pieds de modèle standard.....	43

III.2.2.1.2. Système d'entraînement de l'antenne.....	44
III.2.2.1.3. Réflecteur.....	45
III.2.2.1.4. Radôme.....	45
III.3. Armoire du système radar.....	45
III.3.1. Présentation de l'émetteur à magnétron du DWSR-2501C.....	46
III.3.1.1. Magnétron.....	47
III.3.1.2. Modulateur.....	48
III.3.2. Récepteur numérique et processeur de signaux radar (DRX/RSP) intégré EDRP-9.....	49
III.3.2.1. Tête de réception.....	50
III.3.2.2. Récepteur numérique (DRX).....	50
III.3.2.3. Processeur de signaux radar (RSP).....	51
III.3.2.3.1. Algorithmes.....	51
III.3.2.3.2. Sous-système d'équipement de test intégré (BITE).....	51
III.3.2.4. Modules de collecte de données réparties (DDC).....	52
III.3.4. Déshydrateur/compresseur.....	52
III.4. Spécifications environnementales.....	53
III.5. Conception de l'interface de communications.....	53
III.6. Systèmes de contrôle radar et logiciel d'affichage.....	53
III.7. Description technique du système EDGE.....	54
III.7.1. Définition.....	54
III.7.2. Présentation générale et fonctions standard.....	54
III.7.3. Fonctions d'EDGE.....	54
III.7.4. Interaction de l'utilisateur.....	55
III.7.4.1. Paramètres d'affichage.....	55
III.7.4.2. Manipulation des images.....	55
III.7.5. Architecture logicielle.....	56
III.7.6. Moments.....	56
III.7.6.1. Moment de facteur de réflectivité non corrigée (U).....	56
III.7.6.2. Moment de facteur de réflectivité corrigée (Z).....	56
III.7.6.3. Moment de vitesse radiale (V).....	57
III.7.6.4. Moment de largeur de spectre (W).....	57
III.7.7. Corrections de données.....	57

III.7.7.1. Correction de l'atténuation due aux précipitations.....	57
III.7.7.2. Algorithme de correction de l'erreur de repliement sur la vitesse .....	58
III.7.8. Produits EDGE.....	58
III.7.9. Produits standard.....	59
III.7.9.1. PPI Planned Position Indicator (Indicateur de position prévue).....	59
III. 7.9.2. CAPPI et pseudo-CAPPI.....	60
III. 7.9.3. RHI : Range Height Indicator (Indicateur de distance-hauteur).....	61
III.7.9.4. BASE Low Altitude Reflectivity (Réflexivité à basse altitude).....	61
III.7.9.5. HMAXZ :Height of Maximum Z (Hauteur de Z maximale).....	62
III. 7.9.6.LRA : Layer Reflectivity Average (Réflexivité moyenne de couche).....	62
III. 7.9.7. Echo Base (EBASE) (Base d'échos).....	63
III. 7.9.8. Echo Tops (ETOPS) (Plafond d'échos).....	63
III. 7.9.9. ACM : Accumulated Rainfall (Pluie accumulée).....	63
III.7.10. Diagnostics.....	63
III.7.10.1. Vérification générale du système.....	63
III.7.10.2. Tests de génération de produits.....	63
III.7.10.3. Affichage des données par présentation de type A.....	64
III.7.10.4. Diagnostics de l'antenne.....	64
III.8.Conclusion.....	64
	65

#### ***Chapitre IV : L'estimation de taux de précipitation et la vitesse du vent***

IV.1. Introduction .....	66
IV.2. Le calcul de la réflectivité et l'estimation de taux de précipitation .....	66
IV.2.1.La réflectivité (Z).....	66
IV.2.2. L'estimation de taux de précipitation.....	69
IV. 2.2.1. Définition .....	69
IV.2.2.2. Le principe de détection de précipitation .....	69
IV.2.2.3. Estimation de taux de précipitation .....	70



IV.2.3. La relation entre le taux de précipitation et le facteur de réflectivité .....	71
IV.2.4. La mesure de taux de précipitation .....	72
IV.2.4.1. Le calibrage hydrologique.....	72
IV.2.4.2. La Méthode de Calibrage .....	73
IV.3. Estimation de vitesse du vent .....	75
IV.3.1. Définition.....	75
IV.3.2. La mesure de vitesse du vent .....	75
IV.3.2.1 La mesure de vitesse du vent par le radar météorologique Doppler....	75
IV.3.2.2 La mesure de vitesse du vent par le profileur de vent .....	76
IV.3.3. Produits d’affichage.....	78
IV.3.3.1. Affichage de vitesse-azimut (Velocity Azimuth Display (VAD)).....	78
IV.3.3.2. Traitement du cisaillement du vent .....	79
IV.4. Exemple d’interprétions.....	80
IV.5. Conclusion.....	81

***Chapitre V : Simulation des signaux radar météorologique Doppler***

V.1.Introduction .....	82
V.2. Estimation de spectre Doppler .....	82
V.2.1. Estimation spectrale.....	83
V.2.1.1. Modélisation par la loi Gaussienne.....	85
V.2.1.2. Modélisation par la loi Extreme–value.....	87
V.2.1.3. La comparaison entre les deux modèles.....	88
V.2.2. commentaires sur l’estimation spectrale.....	89
V.3. Estimation temporelle pulse-pair.....	90
V.3.1. Estimation pulse pair d’un processus modélisé par la loi Gaussienne.....	91
V.3.2. Estimation pulse pair d’un processus modélisé par la loi Extreme–value.....	94
V.4. Conclusion.....	96

<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	97
---	----

## La liste des figures

---

### Chapitre I :

La figure	Le titre	La page
I.1	Fréquence de répétition des impulsions (PRF).	6
I.2	Ambiguïté sur la mesure de distance.	7
I.3	Ambiguïté sur la mesure de vitesse – Repliement spectral.	8
I.4	Spectre d'un signal doppler.	9
I.5	Schéma simplifié d'un radar météorologique.	11
I.6	Le diagramme de rayonnement du signal radar météorologique.	14
I.7	schéma de fonctionnement d'un radar.	16
I.8	Exemple d'échelle de couleur associée avec la réflectivité.	20
I.9	Image d'un front d'orages en réflectivité (en dBZ), vu sur PPI (NOAA).	21
I.10	Ecran RHI.	22

### Chapitre II :

La figure	Le titre	La page
II.1	Radar météorologique Doppler.	24
II.2	L'effet Doppler.	25
II.3	Distance totale à la cible dans les radians.	28
II.4	Méthode De Pulse-Paire de Phase.	30
II.5	la phase d'une vague.	30
II.6	Le spectre de puissance de Doppler.	31
II.7	Largeur de spectre.	32
II.8	Vitesse De Nyquist.	33
II.9	Pliage De Vitesse.	34
II.10	Le faisceau de radar au-dessus de la terre.	36
II.11	la vitesse radiale mesurée.	36
II.12	Affichage D'Azimut De Vitesse (VAD).	37
II.13	schéma synoptique d'un radar doppler.	39

### Chapitre III :

La figure	Le titre	La page
III.1	Système d'antenne D14CM1.	42
III.2	Armoire du système radar.	46
III.3	Magnétron	47
III.4	Modulateur	48
III.5	Récepteur numérique de signaux radar (DRX/RSP) intégré EDRP-9.	49
III.6	Modules de collecte de données réparties (DDC)	52

## Chapitre IV :

La figure	Le titre	La page
IV.1	Type de la précipitation selon la structure thermique (bleu sous zéro degré Celsius et rouge au-dessus)	69
IV.2	présentation d'un profileur du vent.	77
IV.3	Exemple d'affichage de produit VAD.	79
IV.4	Exemple d'affichage de produit de cisaillement radial.	80
IV.5	Exemple produit d'affichage de cisaillement en angle de site.	80
IV.6	Exemple produit d'affichage de cisaillement horizontal.	81
IV.7	Exemple produit d'affichage de cisaillement vertical.	81
IV.8	Projection du vent réel sur la composante radiale au radar selon la direction de visée sur 360 degrés.	82
IV.9	Vent environnemental.	82

## Chapitre V :

La figure	Le titre	La page
V.1	Simulation d'un spectre Doppler (modélisation Gaussienne), (a) spectre non bruité, (b) spectre bruité par un bruit blanc Gaussien.	86
V.2	Simulation des séquences I et Q (modélisation Gaussienne), série de temps générés par le modèle de Zrnić [1975].	86
V.3	Simulation d'un spectre Doppler (modélisation Extreme-value), (a) spectre non bruité, (b) spectre bruité	87
V.4	Simulation des séquences I et Q (modélisation Extreme-value)	88
V.5	La comparaison entre les deux spectres Gaussien et Extreme-value	89
V.6	l'évolution du profil des vitesses réelles	91
V.7	Estimation de vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair (Modèle Gaussien).	92
V.8	Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair.	92
V.9	Comparaison de l'estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair et la vitesse réelle.	93
V.10	Estimation de vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair (Modèle Extreme-value).	94
V.11	Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair (Modèle Extreme-value)	95
V.12	Comparaison entre les vitesses moyennes estimées des modèles Gaussien et Extreme-value	95

# *INTRODUCTION GENERALE*

---

# *CHAPITRE I*

---

## *Généralités sur le radar météorologique*

## ***CHAPITRE II***

---

### ***Le radar météorologique Doppler***



## ***CHAPITRE III***

---

***Principe de fonctionnement radar  
météorologique Doppler DWSR-2501C***

## *CHAPITRE IV*

---

*L'estimation de taux de précipitation et la vitesse  
du vent*

# *CHAPITRE V*

---

## ***CONCLUSION GENERALE***

---

**Chapitre I : Généralités sur le radar météorologique**

**I. 1. Introduction**

La météorologie moderne a vu le jour durant la deuxième guerre mondiale. 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, à la formation d'un grand nombre de météorologues, à la multiplication des stations d'observation météorologiques dans le monde entier, à l'utilisation des ordinateurs et au lancement des premiers satellites par des fusées. Cette constellation de circonstances a aussi donné naissance au radar (détection électromagnétique et mesure de la distance).

**I. 2. Historique**

En 1864, James Clerk Maxwell décrit les lois de l'électromagnétisme ce qui permet pour la première fois de travailler sur leur source. En 1889, Heinrich Rudolf Hertz montre que les ondes électromagnétiques sont réfléchies par les surfaces métalliques. Dans les premières décennies du XX<sup>e</sup> siècle, plusieurs inventeurs, scientifiques, et ingénieurs de divers pays ont contribué au développement du radar, juste à temps pour le début de la Seconde Guerre mondiale.

Aux États-Unis, David Atlas est un des pionniers de la météorologie radar pour le groupe de l'armée de l'air et plus tard avec le Massachusetts Institute of Technology. Il a participé au développement des premiers radars météorologiques opérationnels. Au Canada, J. Stewart Marshall et R.H. Douglas forment le « Stormy Weather Group » à l'Université McGill de Montréal. Marshall et son étudiant Walter Palmer sont reconnus pour avoir travaillé sur la distribution du diamètre des gouttes dans les précipitations ce qui a mené à la relation entre la réflectivité ( $Z$ ), le retour d'intensité de la précipitation, et le taux de précipitation ( $R$ ) au sol communément appelé relation Z-R. En Grande-Bretagne .

Entre 1950 et 1980, les différents services de météorologie à travers le monde construisent des radars météorologiques pour suivre la précipitation par sa réflectivité.

Entre 1980 et 2000, les réseaux de radars météorologiques se généralisent en Amérique du Nord, en Europe, au Japon et dans certains autres pays. Les radars conventionnels sont remplacés par des radars pouvant détecter non seulement l'intensité des précipitations mais également leur vitesse de déplacement (effet Doppler). Aux États-Unis, l'implantation de ces radars de longueur d'onde de 10 cm appelé NEXRAD ou WSR-88D commence en 1988 et se termine au début des années 90.

A partir de 1998. La France (réseau ARAMIS) et les autres pays européens se convertissent à la fin des années 1990 et après 2000. En Australie, quelques radars de recherche sont construits à la fin des années 1990 et début 2000 mais ce n'est qu'en 2003 qu'un programme pour renouveler le réseau national réserve certains sites pour des radars avec fonction Doppler.

Après 2000, les recherches qui ont été effectuées sur la double polarisation du signal radar commencent à trouver des applications pratiques dans la détection du type de précipitations. La France, le Canada, les États-Unis, l'Australie et d'autres ont transformé certains de leur radars pour utiliser ce concept en mode pré-opérationnel.

### **I. 3. Radar météorologique**

Un radar météorologique est un type de radar utilisé en météorologie pour repérer les précipitations, calculer leur déplacement et déterminer leur type (pluie, neige, grêle, etc.). La structure tridimensionnelle des données obtenues permet également d'inférer les mouvements des précipitations dans les nuages et ainsi de repérer ceux qui pourraient causer des dommages. Enfin, les précipitations servant de traceurs, on peut en déduire la direction et la vitesse des vents dans la basse atmosphère

Pour mieux comprendre c'est quoi un radar météorologique, on ajoute des explications sur le radar et la météorologique.



### I. 3. 1. Le radar

#### I.3. 1. 1. Définition

Le mot RADAR est un acronyme de **R**ADio **D**etection And **R**anging qui signifie “ Détection et Télémétrie Radioélectrique”.

Le radar a vu le jour en tant qu'instrument de détection des avions. Il émet des ondes électromagnétiques sous forme de micro-ondes qui voyagent à la vitesse de la lumière; celles-ci sont réfléchies par les objets qu'elles frappent. Le temps qui s'écoule entre l'émission et la réception des signaux, divisé par deux et multiplié par la vitesse de la lumière, donne la mesure de la distance entre l'émetteur et la cible. Le suivi d'une cible pendant quelques minutes permet d'en connaître la vitesse et la direction par rapport à la station de radiodétection. Cet usage du radar est fondamental pour la sécurité aérienne moderne. On retrouve le radar sous différentes formes et il peut être installé sur diverses plates-formes (sol, navire, avion, voiture de police et même sur un satellite).

#### I.3.1.2. Les caractéristiques du signal radar

##### *Fréquence de répétition des impulsions (PRF)*

Pour obtenir un écho utilisable la plupart des systèmes radar émettent des impulsions de façon continue et la fréquence de répétition des impulsions (« *PRF* » pour *Pulse repetition frequency*) est fonction de l'usage que l'on fait du système. L'écho reçu de la cible peut être affiché directement sur un écran ou être intégré par un système de traitement du signal à chaque impulsion et être rendu ainsi plus lisible. Plus la fréquence de répétition des impulsions est élevée, plus l'image de la cible sera visible. Cependant, lorsqu'on augmente la fréquence de répétition des impulsions, on diminue la portée du radar. Les fabricants de radars essaient donc d'utiliser la fréquence la plus élevée possible compte tenu des facteurs limitants.

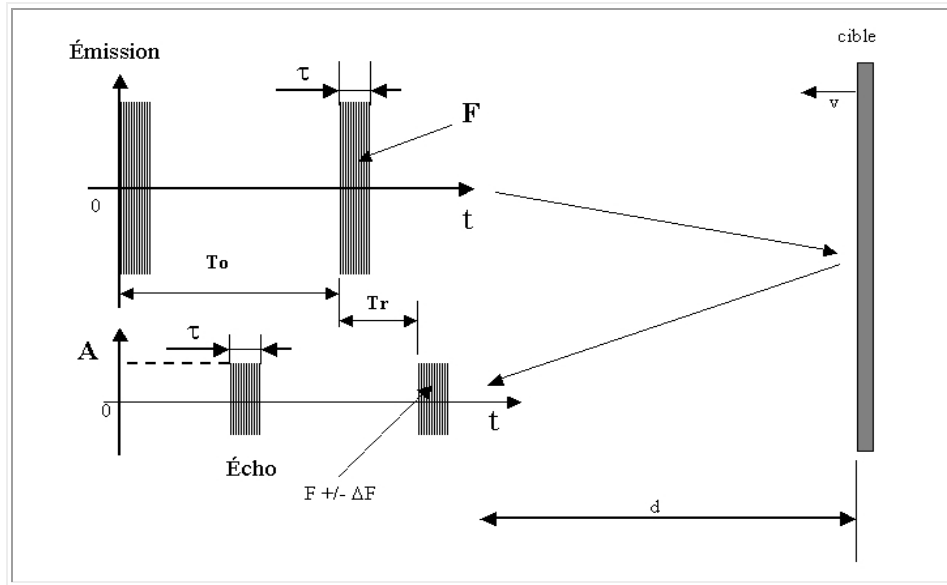


Figure I. 1 : Fréquence de répétition des impulsions (PRF).

$F_0 = 1/T_0$  est la **PRF** (Pulse Repetition Frequency).

Le temps  $T_r$  entre l'émission d'un train d'ondes et la réception de son écho traduit la distance

$$d = c \cdot T_r / 2 \tag{I.1}$$

L'amplitude  $A$  de l'écho dépend de l'éloignement  $d$  et de l'échogénicité de la cible.

La variation de fréquence  $\Delta F$  traduit la vitesse de la cible.

(+  $\Delta F$  si la cible se rapproche de l'émetteur -  $\Delta F$  si elle s'en éloigne)

$$\Delta = \frac{2v}{c} F \tag{I.2}$$

### ✚ Ambiguïté sur la mesure de distance

Pour l'émission du train d'ondes 1 seuls les échos reçus pendant le temps  $(T_0 - \tau) \approx T_0$  peuvent être pris en compte. Echo2/3

La distance maxi ambiguë est donc:

$$R_{max} = \frac{c \cdot T_0}{2} \tag{I.3}$$

Elle est inversement proportionnelle à la PRF  $F_0 = 1/T_0$

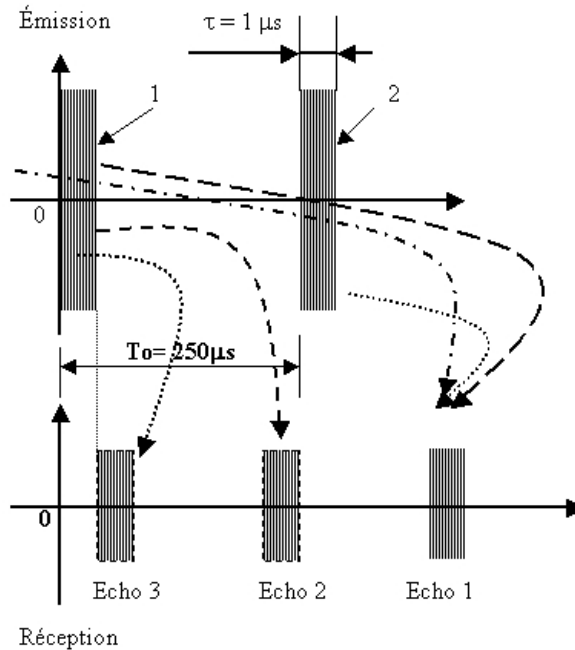


Figure I. 2 : Ambiguïté sur la mesure de distance.

Les radars Doppler utilisent la même antenne pour l'émission et la réception. De ce fait, pendant la durée de l'émission (ici 1  $\mu$ s), la réception est impossible. Cette distance minimale définit la zone aveugle du radar.

$$R_{min} = \frac{c \cdot \tau}{2} \tag{I.4}$$

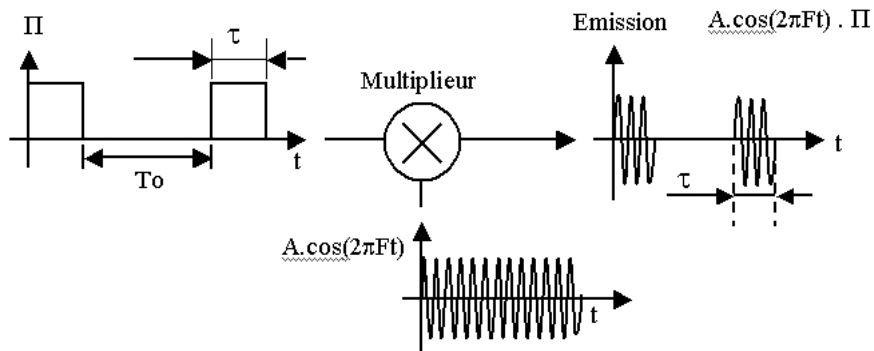
Il est également impossible de distinguer deux échos successifs, s'ils ne sont pas espacés de la durée  $T_0$ . Cela se traduit par une segmentation des distances.

Le plus petit intervalle de distance mesurable est donc égal à:

$$\Delta R = \frac{c \cdot T_0}{2} \tag{I.5}$$

✚ **Ambiguïté sur la mesure de vitesse – Repliement spectral**

De la même façon qu'il existe une ambiguïté sur la distance, il va apparaître une ambiguïté relative à la mesure de vitesse de la cible. Le signal émis est un signal modulé en amplitude.



**Figure I.3 : Synoptique d'un signal Doppler en émission**

Le spectre énergétique fréquentiel du signal émis est de forme "sinx/x" et est centré sur la fréquence F.

Spectre discret, constitué de raies espacées de Fo.

Comme nous l'avons vu précédemment, une cible se rapprochant entraîne un décalage +ΔF proportionnel à la vitesse, de tout le spectre fréquentiel.

Si la vitesse est telle que ΔF est égale à Fo (ou un multiple de celle-ci), il y a coïncidence entre le spectre émis et le spectre reçu. On dit qu'il y a repliement spectral: "aliasing".

Tout se passe dès lors comme si la vitesse de la cible était nulle. Puisque l'on doit tenir compte des cibles qui s'écartent, aussi bien que de celles qui se rapprochent, la variation de fréquence |ΔF| ne peut excéder Fo/2.

$$|\Delta F| \leq F_0/2 \tag{I.6}$$

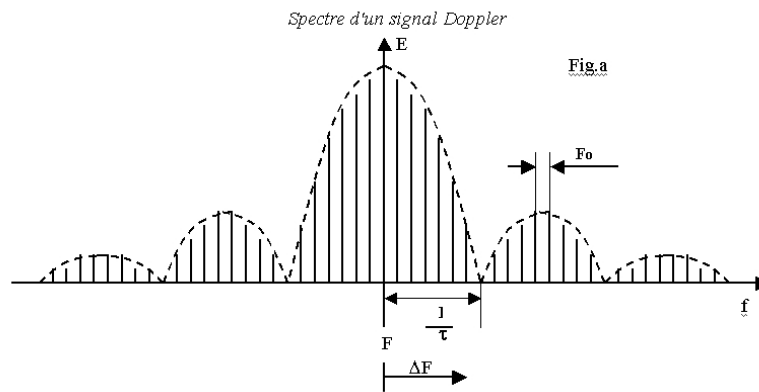


Figure I.4 : Spectre d'un signal Doppler.

La formule du Doppler vue précédemment nous donne quant à elle:

$$\Delta F = 2.v.F/c \tag{I.7}$$

Les deux affirmations (I.6) et (I.7) imposent donc une condition sur la vitesse radiale:

$$|v| \leq \dots = \dots \tag{I.8}$$

Avec  $\lambda = c/F$  la longueur d'onde du signal émis.

### I.3.2.Météorologique

#### I.3.2.1.Définition

La météorologie a pour objet l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les pressions et les précipitations dans le but de comprendre comment ils se forment et évoluent. Le mot vient du grec antique où *météo* désigne les particules en suspension dans l'atmosphère et *logos* veut dire discours ou connaissance.

C'est une discipline qui traite principalement de la mécanique des fluides appliquée à l'air mais qui fait usage de différentes autres branches de la physique, de la chimie et des mathématiques.

C'est une discipline qui traite principalement de la mécanique des fluides appliquée à l'air mais qui fait usage de différentes autres branches de la physique, de la chimie et des mathématiques.

Purement descriptive à l'origine, la météorologie est devenue un lieu d'application de ces disciplines. La météorologie moderne permet d'établir des prévisions de l'évolution du temps en s'appuyant sur des modèles mathématiques à court comme à long terme. Elle est également appliquée pour la prévision de la qualité de l'air, pour les changements climatiques et pour l'étude dans plusieurs domaines de l'activité humaine (risques naturels, construction, trafic aérien, navigation, etc.).

### **I.3.2.2. Prévision météorologique**

La prévision météorologique est une application des connaissances en météorologie et des techniques modernes des prises de données et d'informatique pour prédire l'état de l'atmosphère à un temps ultérieur. L'histoire de la prévision du temps remonte aux temps immémoriaux avec les oracles et devins mais la science moderne date vraiment de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle. Elle s'est cependant affirmée depuis la deuxième Guerre mondiale avec l'entrée en jeu des moyens techniques comme le radar, les communications modernes et le développement des ordinateurs.

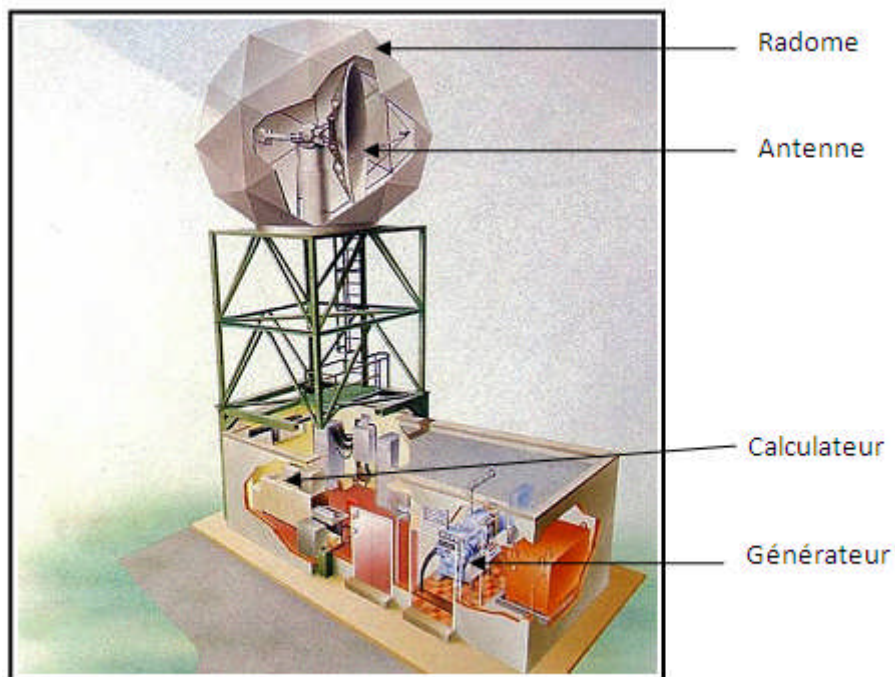
### **I.4. Principes du radar météorologique**

Un radar météorologique est un type de radar à impulsions, c'est-à-dire qu'il émet des impulsions de très courte durée suivi d'un temps mort beaucoup plus long pour écouter les échos de retour venant des précipitations. On peut ainsi repérer la position, l'intensité et le déplacement de ces dernières. On peut même tirer le type du signal retourné, si on sait quelles variables de l'écho analyser. Finalement, ce type de radar permet d'utiliser la même antenne pour l'émission et la réception en plus de concentrer l'énergie dans des impulsions courtes au lieu de la répartir dans une émission continue.



Un radar météorologique est constitué :

- ✚ D'une antenne parabolique dont l'intérêt est de concentrer l'énergie émise en un petit faisceau électronique et de collecter l'écho réfléchi, elle est équipée de deux moteurs destinés à l'orienter verticalement et horizontalement.
- ✚ D'un système d'émission-réception qui compose : d'un émetteur qui génère les signaux microondes et d'un récepteur qui détecte le signal réfléchi de la cible.
- ✚ D'un radôme, une enveloppe sphérique, qui assure la protection de l'antenne en cas de forts coups de vent.
- ✚ D'un ordinateur, qui assure le traitement du signal permet d'une visualisation locale des échos et d'autre part une diffusion vers le site météorologique.



**Figure I.5 : Schéma simplifié d'un radar météorologique.**

#### **I.4.1.Emission**

Une impulsion électromagnétique est produite par un oscillateur (magnétron, klystron ou autre) électronique. Elle est envoyée à travers un tube guide d'onde à une antenne parabolique qui l'émet vers la précipitation. Chaque impulsion a une certaine largeur qui dépend des caractéristiques de l'antenne et une certaine profondeur qui dépend de sa durée (de l'ordre de la microseconde).

#### **I.4.2.Rétrodiffusion**

Lorsqu'une impulsion entre dans une zone de précipitations, une petite partie est rétrodiffusée (réfléchi) vers le radar pendant que le reste continue. Ce retour est le total des retours de toutes les gouttes dans le volume sondé et l'équation du radar pour cibles volumiques en régit l'intensité. On voit donc que si le volume est rempli de cibles, on obtient une moyenne de leur intensité mais que s'il n'est que partiellement rempli.

#### **I.4.3.Réception**

Lorsque le signal émis rencontre un météore (particule d'eau), il est réfléchi en partie en direction de l'antenne tournante qui fonctionne aussi comme récepteur .le décalage temporel entre l'émission et la réception du signal permet le calcul de la distance entre l'antenne et le météore. L'intensité du signal reçu 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 de manière proportionnelle à leur taille.

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.

#### **I.4.4. Les fréquences radar**

Les radars météorologiques se distinguent par leurs fréquences. Les bandes de fréquences largement utilisées sont X-band (10 GHz, longueur d'onde  $l = 3\text{cm}$ ), C-band (5 GHz,  $l = 6\text{ cm}$ ) and S-band (3 GHz,  $l = 10\text{ cm}$ ).

Les radars de bande X sont utilisés pour étudier les nuages et pour la poursuite des ballons d'aéronefs pour le calcul des vents des couches supérieures.

Les radars de la bande S sont utilisés pour les mesures de pluies et l'étude des cyclones tropicaux et d'autres systèmes d'échelles similaires. Les fréquences de la bande S conviennent plus pour pénétrer des systèmes météorologiques intenses sans grande atténuation c'est pour cela qu'elles ne sont pas recommandées pour les études des nuages car les réflexions de particules de nuages sont faibles.

La bande C est un compromis entre la bande S et la bande X. Les radars de bande C sont largement utilisés en recherche et en météorologie opérationnelle.

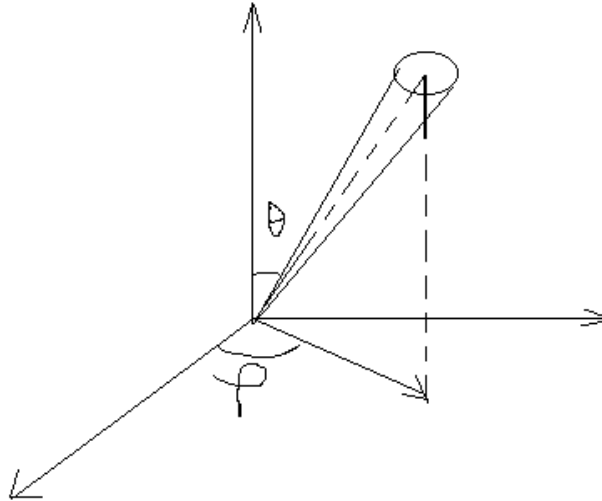
### **I.5. Caractéristiques du radar météorologique**

#### **I.5.1. Gain d'antenne**

L'aptitude de l'antenne à concentrer l'énergie dans une direction donnée et mesurée par le gain.

Soit  $P(\vartheta, \Phi)$  est la densité de puissance électromagnétique émise par l'antenne et mesurée à une distance ( $r$ ) et dans la direction  $(\vartheta, \Phi)$ .

Soit  $\langle P \rangle$  : la puissance moyenne obtenue en considérant toutes les directions de l'espace. Le gain antenne  $G(\vartheta, \Phi) = P(\vartheta, \Phi) / \langle P \rangle$ .



**Figure I.6 : Le diagramme de rayonnement du signal radar météorologique.**

## **I.5.2. Résolution**

La résolution d'un radar est son aptitude de séparer deux cibles ponctuelles qui sont proches l'une de l'autre. On distingue trois types de résolution.

### **I.5.2.1. Résolution radiale**

Relative à des cibles situées dans la même direction de visée mais à des distances différentes.

Le radar transmette des impulsions rectangulaires, pour un radar exempt de bruit et de largeur de bande infinie. L'écho d'une cible ponctuelle serait une impulsion rectangulaire de largeur  $h=c*\tau$  avec  $\tau$  : comme durée de l'impulsion et  $c$  : vitesse de la lumière.

Si on considère  $r$  comme la distance radar cible, la dimension radiale de l'impulsion écho est  $h/2$ .

### I.5. 2. 2. Résolution transversale

La cible est détectée par le lobe principal et les lobes secondaires. La résolution transversale est déterminée par l'angle d'ouverture à 3db du lobe principal du diagramme de rayonnement de l'antenne. La résolution transversale décroît avec la distance  $r$ . Les angles d'ouvertures à 3db en site et en azimut sont désignés par  $\vartheta_0$  et  $\Phi_0$

### I.5. 2. 3. Volume de résolution de l'impulsion

Le volume de résolution de l'impulsion est celui d'où proviennent les signaux reçus par le radar au même instant et dont la somme définit l'intensité instantanée du signal soit

$$V = (\Pi * r^2 * \vartheta_0 * \Phi_0 / 4) * (c * \tau / 2) \quad (I.9)$$

La forme du volume d'impulsion varie avec la distance.

### I. 5. 3. Sensibilité du radar

La sensibilité du radar est l'aptitude à détecter des signaux aussi faible que possible à son entrée.

En pratique, on préfère parler de sensibilité utilisable, ce dernier est le niveau du signal utile à l'entrée, la sensibilité utilisable correspond à un signal minimum détectable  $S_{\min}$  dont la puissance est de l'ordre de  $10^{-08}$  à  $10^{-14}$  Watts.

La sensibilité d'un radar pulsé s'exprime par :

$$S_{\min} = F * K * T_0 * \Delta f \quad (I.10)$$

Ou :

K : constante de Boltzmann

T : Température de la résistance

$\Delta f$  : la bande passante de bruit du récepteur

$$F = N_e / N_s$$

$N_e$  : Rapport signal sur bruit par rapport à l'entrée du récepteur

$N_s$  : Rapport signal sur bruit par rapport à la sortie du récepteur

### I.6. Equation du radar météorologique

L'équation du radar exprime la relation entre l'intensité moyenne du signal reçu et les propriétés du volume diffusant (la cible) situé à la distance  $r$ , en fonction des caractéristiques techniques du radar et les conditions de propagation entre le radar et la cible.

Soit une cible ponctuelle de section efficace de rétrodiffusion  $\sigma_b$

$$P_r = P_t \cdot g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_b \cdot f^4(\theta, \varphi) / [(4\pi)^3 \cdot r^4 \cdot l^2] \quad (I.11)$$

Ou :

$P_t / P_r$  = puissances émise et reçue ;

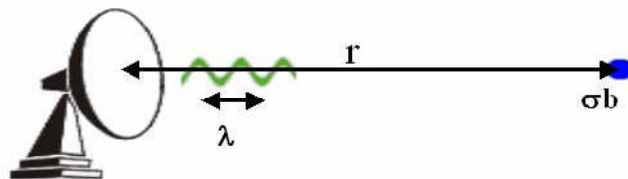
$g$  = gain de l'antenne ;

$\lambda$  = longueur d'onde ;

$r$  = distance au radar ;

$f^4(\theta, \varphi)$  = diagramme de rayonnement de l'antenne ;

$l$  = atténuation par les hydrométéores et les gaz atmosphériques.



**Figure I.7 : Schéma de fonctionnement d'un radar.**

Intégration sur le volume de résolution :

$$\langle Pr \rangle = Pt \cdot \eta \cdot C / [r^2 \cdot I^2] \quad (I.12)$$

- $\eta$  = réflectivité =  $\sum \sigma_b N(D) dD$  ;
- $N(D)$  nombre de gouttelettes de diamètre entre  $D$  et  $D+dD$  par  $m^3$  (DSD) ;
- $C$  = Constante radar fonction des caractéristiques techniques du radar :

$$C = g^2 \cdot \lambda^2 \cdot [c \cdot \tau \cdot \pi \cdot \theta_1^2] / [(4\pi)^3 \cdot 16 \cdot \ln 2] \quad (I.13)$$

Ou :

- $c$  = vitesse de la lumière
- $\tau$  = largeur du pic d'émission
- $\theta_1$  = ouverture du faisceau à  $-3Db$

### Hypothèses :

Particule d'eau liquide sphérique.

Diamètre  $D \ll \lambda$  (approximation de Rayleigh)

$$\eta = (\pi^5 / \lambda^4) * |Kw|^2 * Ze$$

( $Kw$  lié à l'indice de réfraction de l'eau)

$Ze$  = facteur de réflectivité équivalente =  $\sum D^6 N(D) dD$

$Ze$  en  $mm^6 \cdot m^{-3}$  ou en dBZ ( $Ze(dBZ) = 10 \cdot \log_{10}(Ze(mm^6 \cdot m^{-3})/1.)$ )

## I.7. La cible

Une cible (Target en anglais) est tout objet qui interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de l'énergie vers le radar.

On fait la distinction entre une cible qui est l'objet qu'on veut détecter et le clutter qui représente les objets non désirés (réflexions de la mer, de la terre, oiseaux, insectes, ...) qui interceptent aussi l'énergie et le renvoient.

### I.7.1. Cibles météorologiques

- **Les météores**

Nous entendons par météores les types de précipitations suivantes :

- ✚ **Pluie** : Précipitation de gouttes d'eau qui tombe d'un nuage.
- ✚ **Pluie surfondue** : Pluie dont la température des gouttes est inférieure à 0°C.
- ✚ **Neige** : Précipitation de cristaux de glace isolés ou soudés qui tombe d'un nuage.
- ✚ **Neige en grains** : Précipitation de très petites particules de glace blanches et opaques qui tombe d'un nuage, ces particules sont relativement plates ou allongées, leur diamètre est en général inférieur à un millimètre.
- ✚ **Neige roulée** : Précipitation de particules de glace blanches et opaques qui tombe d'un nuage, ces particules sont en général coniques ou arrondies, leur diamètre peut atteindre cinq millimètres.
- ✚ **Grêle** : Précipitation de particules de glace (grêlons) transparentes, ou partiellement à complètement opaques de forme généralement sphéroïdales, coniques ou irrégulières dont le diamètre varie globalement entre 5 et 50 millimètres, ces particules tombent d'un nuage soit séparées soit agglomérées en blocs irréguliers.
- ✚ **Tempête de poussière ou tempête de sable** : Ensemble de particules de poussière ou de sable puissamment soulevées du sol par un vent fort et turbulent, jusqu'à de grandes hauteurs.
- ✚ **Tourbillon de poussière ou tourbillon de sable** : Ensemble de particules de poussière ou de sable, accompagnées parfois de petits débris, soulevées du sol sous forme d'une colonne tourbillonnante et de hauteur variable, à axe sensiblement vertical et de faible diamètre.



- ***Le vent***

Le vent est le mouvement naturel de l'air atmosphérique à la surface terrestre, ce mouvement est rarement régulier, le plus souvent, il est turbulent avec des tourbillons de forme et dimensions variées qui se développent dans l'air et perturbent son écoulement.

- ***Les turbulences***

Le vent peut être un écoulement régulier, laminaire ou plus ou moins désordonné par rafales, dans ce dernier cas, on dit qu'il y a turbulence. Cette turbulence peut se manifester de plusieurs manières :

- ✚ des rafales qui se traduisent par des variations de la vitesse horizontale sans variation de la direction ;
- ✚ une variation de la direction horizontale sans variation importante de la vitesse ;
- ✚ une variation simultanée de la direction et de la vitesse horizontale
- ✚ l'apparition de mouvements verticaux.

La turbulence intervient en Aéronautique comme facteur nuisible au confort et parfois à la sécurité. Les mouvements désordonnés auxquels sont soumis les avions fatiguent les cellules, exigeant du pilote une attention plus soutenue et rendent aux passagers le voyage particulièrement pénible.

### **I.7.2.Cibles non météorologiques**

En plus de la pluie, de la neige, du verglas et d'autres précipitations, le radar météorologique peut recevoir des échos provenant d'autres sources .les principaux polluants des données sont :

- ✚ Les oiseaux, surtout en temps de migration.
- ✚ Les insectes à très basse altitude.
- ✚ Les leurres électroniques que peuvent laisser tomber des avions militaires (voir paillette).
- ✚ Les obstacles solides comme les montagnes, les édifices, les avions.

## I. 8. Types principaux d'images produites

Toutes les données obtenues par le sondage radar sont affichées selon leur format. Certains produits servent à afficher plusieurs types de données alors que d'autres sont plus spécifiques. Finalement, selon le type de données, l'affichage utilisera une convention de couleur qui variera.

### I.8.1. Conventions d'affichage

A l'origine, les données de réflectivité n'étaient vues que par l'opérateur radar sur un écran cathodique, l'intensité était donc indiquée par la variation de la brillance. Par la suite, des photographies de ces images ou des images analogiques sur papier ont été produites en tons de blanc et gris. Lorsque les ordinateurs ont permis de traiter numériquement les données des radars météorologiques, il est devenu possible de relier une couleur à un taux de précipitations. Cette pratique s'est répandue aux autres types de données quand celle-ci sont devenues disponibles. La réflectivité, les données de vitesses radiales et celles de double-polarimétrie utilisent en général un code de couleur différent. Il n'existe pas de convention internationale quant aux couleurs à utiliser mais plutôt une pratique qui s'est répandue avec les échanges dans le domaine.

#### Réflectivité

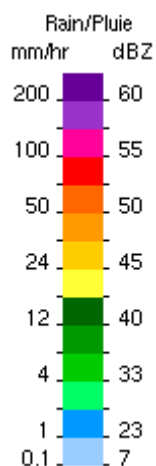
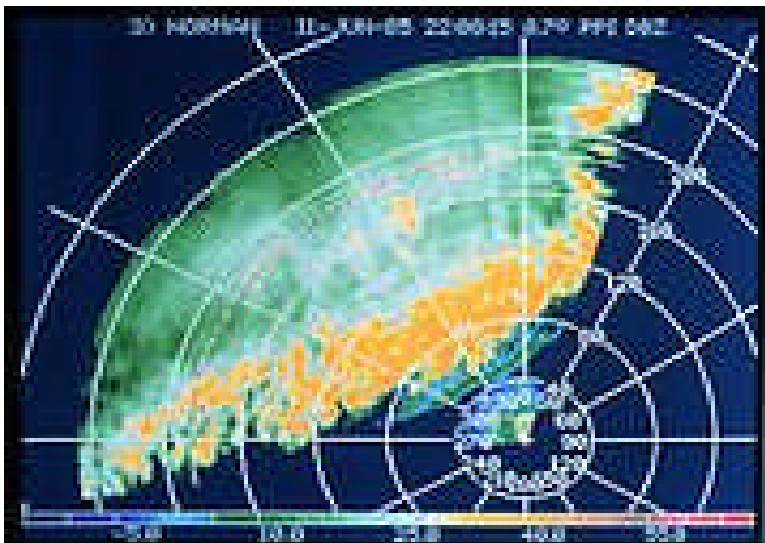


Figure I.8: Exemple d'échelle de couleur associée avec la réflectivité

En général, les images de réflectivité utilisent une variation de couleur similaire à celle de l'arc-en-ciel. Les intensités les plus faibles sont indiquées par le bleu pâle (cyan), les intensités modérées par le jaune et les fortes par le rouge puis le magenta. Les intensités peuvent être reliées à la réflectivité en dBZ ou à son équivalent en millimètres/centimètres par heure.

Certains utilisateurs préfèrent cependant des codes numériques plus simples à interpréter. Ainsi, lorsqu'un pilote d'avion ou un contrôleur aérien décrivent l'intensité des échos de précipitations sur leur affichage radar, ils utilisent des niveaux : niveau 1 pour la précipitation faible, niveau 2 pour de la précipitation modérée possiblement reliée avec une basse visibilité et de la turbulence, niveau 3 pour de la pluie/neige forte reliée à des conditions de vol dangereuses.

### **I.8.2.PPI (vue panoramique à angle d'élévation constant) : Plan Position Indicateur**



**Figure I.9: Image d'un front d'orages en réflectivité (en dBZ), vu sur PPI.**

Comme les données sondées par le radar se font un angle d'élévation à la fois, les premières images ont été celles d'un affichage panoramique des données de chaque angle individuellement (PPI). Ce type de données doit être interprété en se rappelant que le faisceau radar s'élève au-dessus du sol à mesure qu'on s'éloigne du radar. Donc ce qu'on voit près du radar est à beaucoup plus bas niveau que ce que l'on voit à 200 km.

Il en résulte qu'un nuage avec des taux de pluie élevé à 30 km du radar peut sembler diminuer ou augmenter d'intensité à mesure qu'il s'éloigne du radar. En fait, comme notre faisceau est plus haut dans le nuage au second temps, il regarde une autre section de ce dernier.

Un PPI est également affligé de retours venant du sol près du radar. Ceci donne de très forts retours qui peuvent être mal interprétés comme étant des précipitations fortes.

### I.8.3. RHI

C'est un autre type d'affichage pour un balayage en élévation à un azimut fixe.

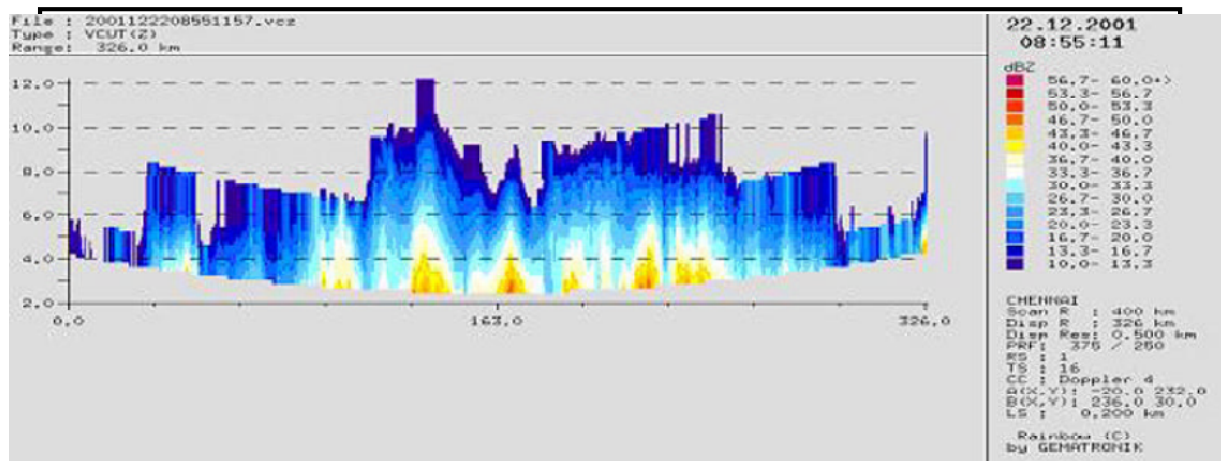


Figure I.10 : Ecran RHI.

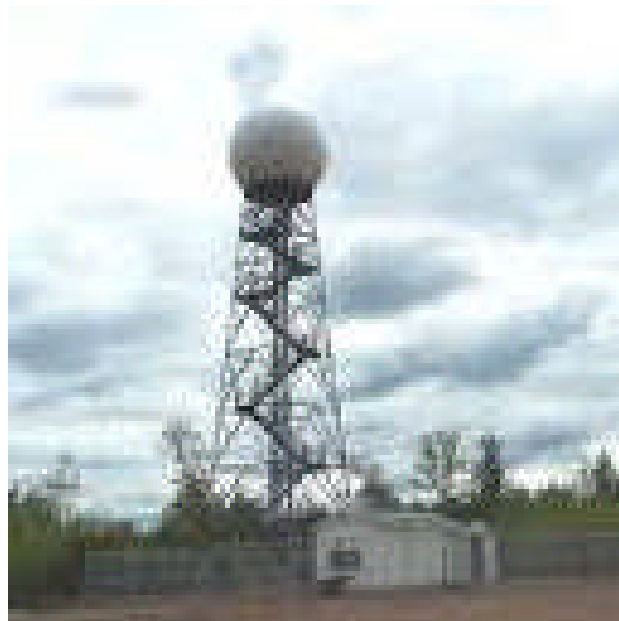
## **Conclusion**

A travers de ce chapitre, nous avons présenté le radar météorologique classique qui nous permet d'une part de déduire ses services dans le domaine d'aéronautique, et d'autre part de clarifier le radar météorologique Doppler que nous allons évoquer dans le prochain chapitre car le radar météorologique Doppler n'est qu'un radar météo classique développé.

*Chapitre II : Le radar météorologique Doppler*

**II. 1. Introduction**

Le radar météorologique Doppler est un type de radar météorologique qui utilise l'effet doppler qui permet de détecter le changement de fréquence de signal réfléchi par les cibles météorologique, ce qui permet de déterminer leurs vitesses de déplacement ,leurs directions et leurs étendues, ces données sont utilisées dans la navigation aérienne pour savoir que doit faire le pilote en cas d'existence des phénomènes météorologiques dangereux sur l'aviation (nuages dangereux, les orages.....).



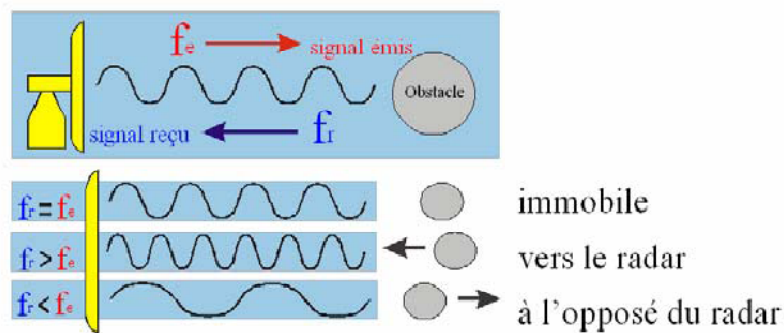
**Figure II. 1 : Radar météorologique à Doppler.**

## II. 2. L'effet Doppler

L'effet Doppler (concernant les ondes lumineuses et sonores) a été présenté par Christian Doppler en 1842 et une expérience a confirmé sa théorie en 1845 ; il a également été proposé par Hippolyte Fizeau pour les ondes électromagnétiques en 1848

L'effet Doppler, consiste en une modification apparente de la fréquence de la source quand celle-ci est en mouvement relatif par rapport à un observateur. Dans notre vie quotidienne, nous le percevons quand une ambulance passe ou quand les fans de football klaxonnent dans les rues après une victoire... Dans ce cas, c'est la source sonore qui est en mouvement, l'observateur étant immobile. Mais le même phénomène se produit (avec des modifications de fréquence différentes) si la source est au repos et l'observateur en mouvement. Pour autant, évidemment, que sa vitesse soit suffisante.

L'effet Doppler est largement utilisé pour mesurer des vitesses, usuellement par réflexion d'une onde transmise d'une cible mobil, le radar pour la météorologie et la surveillance de circulation automobile.



**Figure II. 2 : L'effet Doppler.**

## II. 3. Le principe de fonctionnement de radar météorologique doppler

Les radars météorologiques Doppler émettent dans l'atmosphère des pulsations d'ondes radiophoniques, qui rebondissent sur la glace, la neige, les gouttelettes d'eau ou d'autres particules atmosphériques. Les caractéristiques physiques de ces ondes (c'est-à-dire leur longueur d'onde) sont consignées à l'émission.

Lorsqu'elles rencontrent une perturbation, elles sont réfléchies par les particules qui la composent (neige, gouttelettes d'eau, etc...) sous forme d'échos, puis sont alors réceptionnées par le radar qui analyse à nouveau leurs caractéristiques physiques. Ainsi, si la longueur d'onde se réduit, on en déduit selon les principes de l'effet Doppler que la perturbation s'approche du radar, et à l'inverse, si elle augmente, que la perturbation s'en éloigne.

Comme la vitesse de déplacement des ondes (qui est la vitesse de la lumière) et l'orientation de l'antenne radar sont connues, l'éloignement, la position et la vitesse (radiale) de la perturbation par rapport à l'émetteur radar peuvent être calculés, à partir des échos.

Cette information sert à préciser le lieu et l'intensité de la perturbation dans la région couverte par le radar. Le radar météorologique Doppler fournit donc des informations beaucoup plus précises que le radar météorologique normal au sujet des perturbations atmosphériques et de leur évolution.

Ainsi, les météorologistes utilisent, par exemple les données produites par les radars météorologiques Doppler pour fournir des prévisions plus précises de grêle, de pluies verglaçantes, de pluies abondantes, de neige ou de tempêtes. Ce qui permet de faire évacuer les zones à risques relativement longtemps à l'avance, et donc d'éviter des catastrophes naturelles qui pourraient coûter la vie à de nombreuses personnes.

#### **II. 4. La fréquence Doppler**

La relation entre le taux de changement de phase et la fréquence Doppler peut être visualisée en considérant le signal reçu à partir d'une cible unique. Le signal complexe en phase I et en quadrature de phase Q, réfléchis par une cible unique à une distance radiale, r est de la forme :

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

$$= \text{---} \text{---} \quad (\text{II. 2})$$



Où

A : L'amplitude du signal reçu (proportionnel à la surface d'intersection de la cible)

$\lambda$  : La longueur d'onde du radar

$4\pi r/\lambda$  : Phase due à la propagation en distance 2r (aller-retour)

$\Psi$  : Phase initiale du signal de l'émetteur.

Si la distance r change avec le temps (changement relatif de la cible par rapport au radar), l'argument  $4\pi r/\lambda - \Psi$ , devient une fonction du temps. Le taux de changement de phase est la vitesse angulaire  $\omega$  dont l'expression est la suivante :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{4\pi r}{\lambda} - \Psi \right) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{4\pi r}{\lambda} \right] = \omega \quad (\text{II. 3})$$

Le changement de distance par rapport au temps  $d[r(t)]/dt$  est la vitesse radiale  $V_r$ . La vitesse angulaire est liée à la fréquence par  $\omega = 2\pi f$ .

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{II. 4})$$

La fréquence Doppler est donnée par :

$$f_D = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

Les transformations fondamentales des caractéristiques météorologiques vers des caractéristiques du signal radar sont : la surface d'intersection de la cible devient proportionnelle à la puissance du signal, la distance radiale de la cible devient proportionnelle à la phase du signal et la vitesse radiale de la cible devient proportionnelle au taux de changement de phase.

## II. 5. Distance totale à la cible dans les radians

Entre chaque impulsion, l'antenne et le circuit électronique sont mis à l'écoute de l'impulsion de retour. On calcule la distance entre le radar et la précipitation par la relation suivante:

$$R = \frac{c \Delta t}{2} \quad (\text{II.6})$$

(c = vitesse de la lumière = 299 792,458 km/s).

La distance maximale qu'on peut sonder sans ambiguïté dépend du  $\Delta t$  utilisé entre deux impulsions subséquentes. En effet, la position de tout retour qui arrive d'une première impulsion, a toute la distance ( $d$ ) a voyagé par la vague est  $2r$ .

Le nombre de longueurs d'onde dans toute la distance ( $d$ ) est égal à  $2r/\lambda$ .

Nous pouvons également exprimer  $D$  en termes de radians:

$$= - \quad (II.7)$$

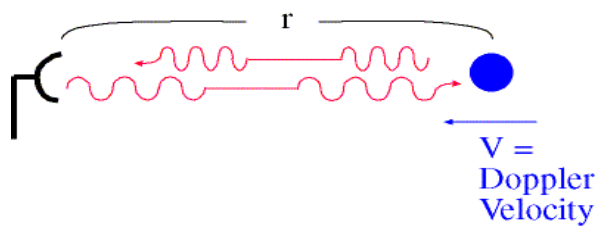
Si:  $\phi_0 =$  phase de l'impulsion envoyée par le radar

$\phi =$  phase de signal de renvoi ; alors :

$$= + - \quad (II.8)$$

Différencier (II.8) des rendements:

$$- = - - \quad (II.9)$$



**Figure II. 3: Distance totale à la cible dans les radians.**

**Exemple**

$r = 10$  centimètres :  $D = 2r = 20\text{cm}$

Le nombre de longueurs d'onde dans toute la distance (d) est égal à :

$$20\text{cm}/10\text{cm} = 2 \text{ longueurs d'onde.}$$

On a en termes de radians:  $= -$

Alors la phase du signal retourné est :

$$= + - , \text{ si } \phi_0 = 0 : \phi = 4 \pi .$$

**II. 6. Algorithme de Pulse-Paire de Phase**

Nous pouvons définir l'algorithme de pulse paire de phase par la prendre des deux impulsions consécutives et la mesure de la phase des impulsions reçues comme montrées dans la figure II. 4.

Rappeler cela :  $- = - -$  (II.10)

Là où  $d \phi = \phi_2 - \phi_1$

*Décollement* = temps entre les impulsions.

$dr/dt$  = vitesse radiale la de la cible =  $V$

Ainsi:

$$= - - - (II.11)$$

Mais  $d \phi / \text{décollement}$  est vraiment la vitesse angulaire =  $2 \pi f_d$

Ainsi, (II.11) devient:

$$= - ( ) (II.12)$$

Ou:  $= -$

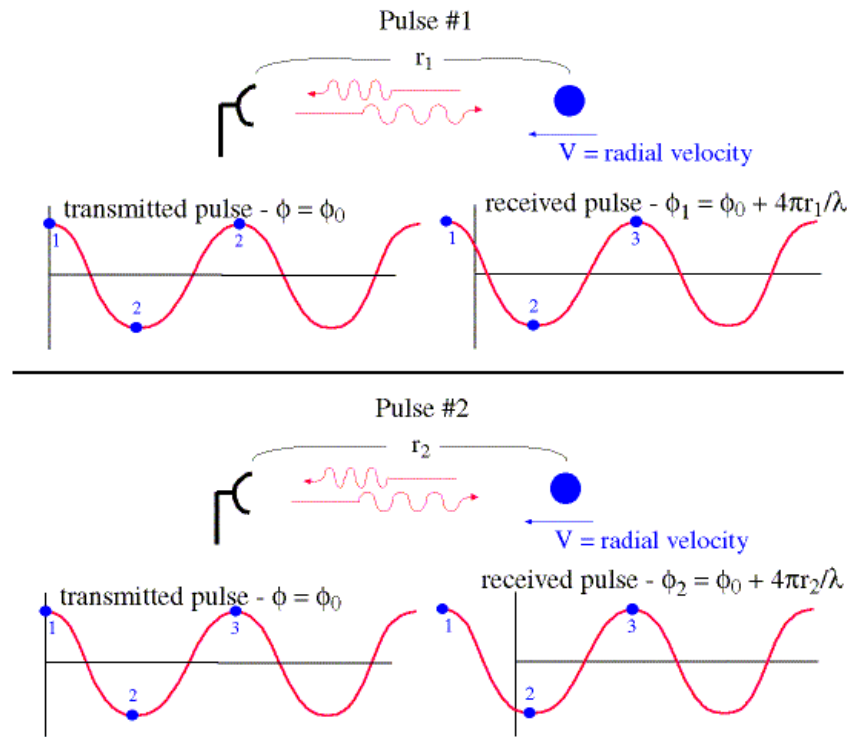


Figure II. 4 : Méthode De Pulse-Paire de Phase.

### II. 6. 1. La phase d'une vague

La phase d'une vague est l'excentrage de la vague d'un point de référence  $\phi_0$  comme montrée la figure suivante :

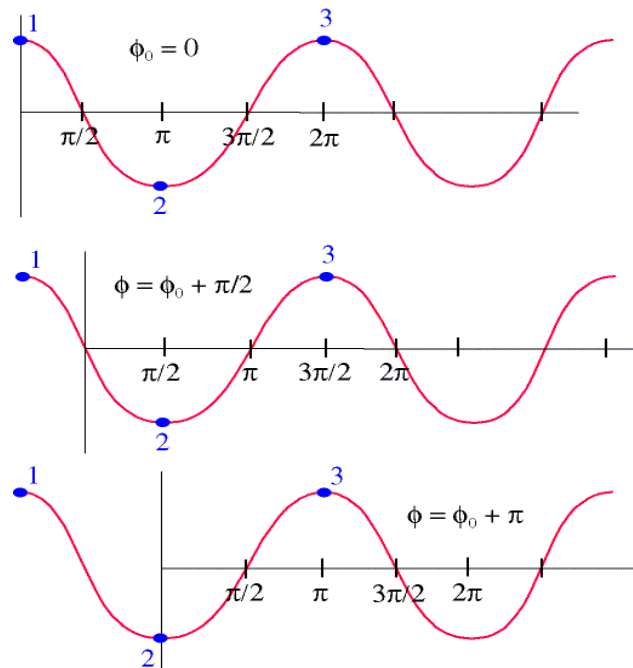


Figure II. 5 : la phase d'une vague.

## II. 7. Le spectre de puissance de Doppler

Puisqu'il y a un grand nombre de baisses dans un volume d'impulsion, ils veulent chacun fournissent leurs propres backscattered la puissance et l'effet Doppler.

On peut alors tracer les spectres de puissance de Doppler (Figure II. 6).

Des spectres de puissance, un bidon a dérivé le facteur radial moyen de réflectivité de vitesse et de radar:

$\bar{f}_d$  = fréquence Doppler-décalée moyenne

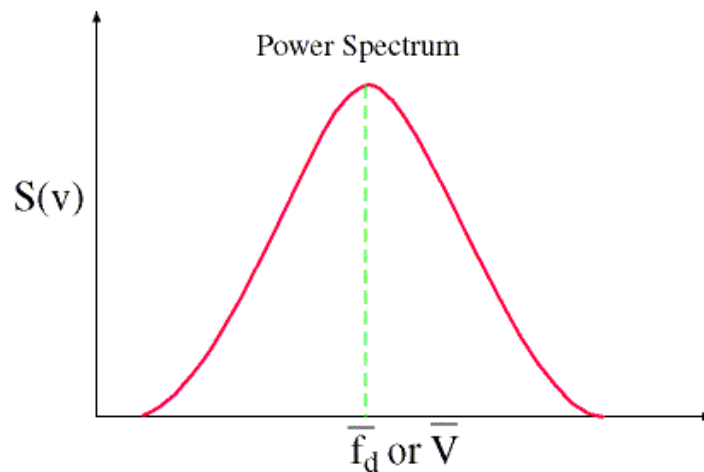
$\bar{V}$  = vitesse de radial de moyen

Puissance de  $S(v)$  = De Backscattered

$P_r$  = puissance moyenne de total =  $\int ( )$  ce qui est le secteur sous la courbe

La plupart des radars ne gardent pas le plein spectre de Doppler, seulement

$\bar{f}_d$  et  $\bar{V}$ .



**Figure II. 6 : Le spectre de puissance de Doppler.**

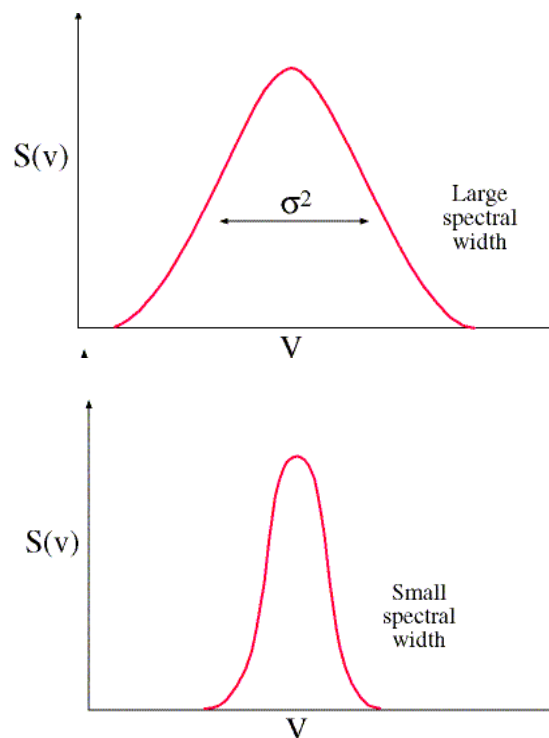
### II. 7. 1. Largeur de spectre

La diffusion du spectre de puissance de Doppler, désignée sous le nom de la largeur spectrale est trouvée en calculant le désaccord. La largeur spectrale dépend dessus:

1. la diffusion, gamme des vitesses terminales de chute des diffuseurs (davantage prononcés pour la pluie que pour la neige)
  - ☛ spectres pour la pluie
  - ☛ spectres pour la neige
2. turbulence d'air (niveaux supérieurs dans la convection grave).
3. cisaillement vertical de vent (par exemple, le long d'un avant de rafale).
4. mouvement d'antenne.

Puis, toute la largeur spectrale est due à la somme des effets mentionnés ci-dessus:

Exemple de ce qui se produit quand la largeur spectrale est grande et petite :



**Figure II. 7 : Largeur de spectre.**

## II. 8. Vitesse de Nyquist

La fréquence de Nyquist  $f_{max}$ , est la fréquence la plus élevée qui peut être résolue par des échantillons espacés de  $\Delta t$ . Elle est donnée par :  $f_n = 1 / (2\Delta t)$  et correspond à deux échantillons par cycle pour une sinusoïde de fréquence  $f_n$ . on peut dire aussi que la vitesse de Nyquist est la vitesse la plus élevée.

Si vous prélevez la vague à la fréquence de la vague ( $f_s = f$ ), ne peut pas le reconstruire.

Devez prélever la vague avec la fréquence ( $f_o$ ) au moins  $2f$  de  $f$  s. (voir la figure ci dessous), avec un radar pulsé, puis  $f_s = PRF$ .

ainsi le PRF est supérieur ou égal à  $2f$ .

ou  $f_{maximum} = PRF/2$  (fig. II.8).

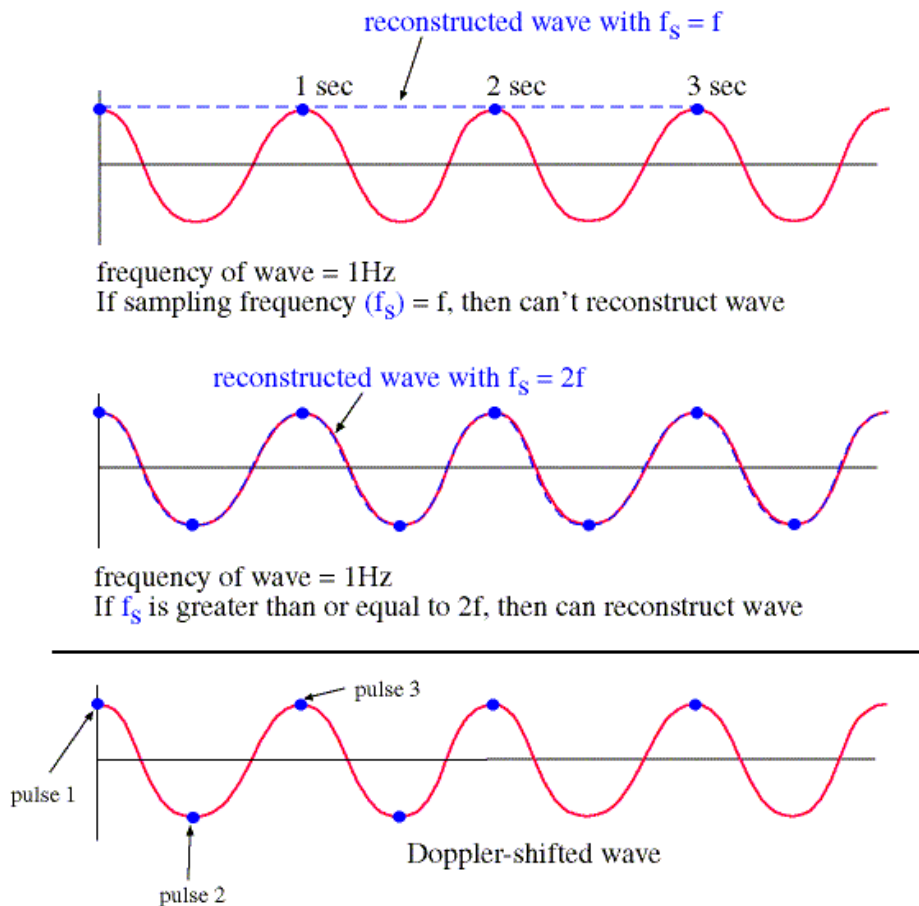


Figure II. 8 : Vitesse De Nyquist.

Rappelez cela:

$$= \text{---} \quad (\text{II.13})$$

Ou :

$$= \text{-----} \quad (\text{II.14})$$

mais:

$$= \text{---} \quad (\text{II.15})$$

ainsi l'égalisation de (II.14) et de (II.15) donne:

$$\text{-----} = \text{---} \quad (\text{II.16})$$

ou:

$$= \text{---} \quad (\text{II.17})$$

**Exemple**

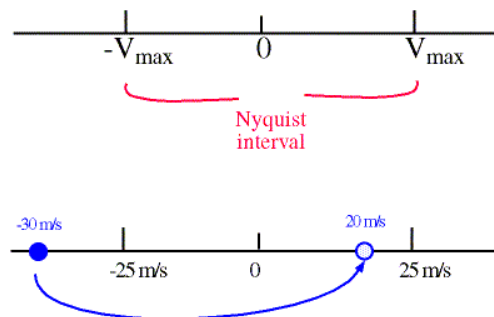
Si  $\text{PRF} = 1000 \text{ s}^{-1}$  et  $\lambda = 10$  centimètres, puis  $V_{\text{maximum}} = 25 \text{ m/s}$ .

**II. 8. 1. Pliage De Vitesse**

Si la vitesse radiale des particules est en dehors de la gamme de l'intervalle de nyquist, alors la vitesse radiale sera alias, ou s'est pliée. Ceci s'appelle la vitesse folding/aliénation.

**Exemple**

Si la vitesse de Nyquist est 25 m/s et la vitesse radiale des particules est -30 m/s, alors elle repliera et le radar l'interprétera en tant que : de +20 m/s.



**Figure II. 9 : Pliage De Vitesse.**



### II. 8. 2. Rapport entre la vitesse de Nyquist et la gamme non ambiguë

Nous pouvons maintenant trouver un rapport entre la vitesse de nyquist ( $V_{\text{maximum}}$ ) et la gamme non ambiguë ( $R_{\text{maximum}}$ ).

Rappelez cela:

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

En outre rappel de dos de manière:

$$= \text{---} \quad (\text{II.19})$$

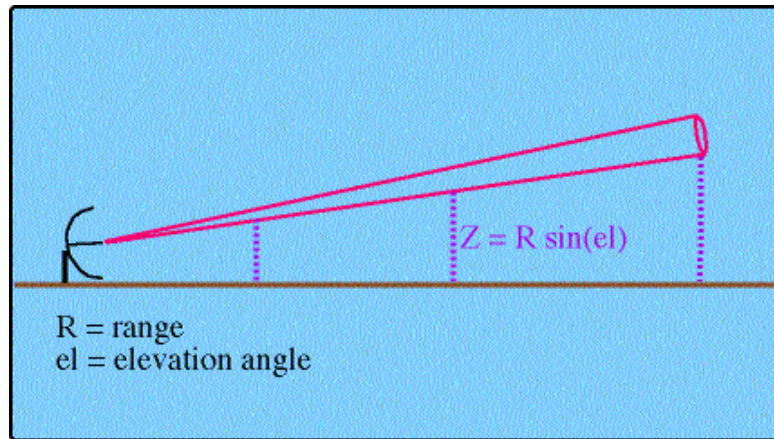
L'élimination du PRF de (II.18) et de(II.19) donne:

$$= \text{---} \quad (\text{II.20})$$

Pour augmenter l'intervalle de nyquist, on doit diminuer la gamme non ambiguë et vice versa.

### II. 9. Vitesses Doppler - endroit de faisceau au-dessus de la terre

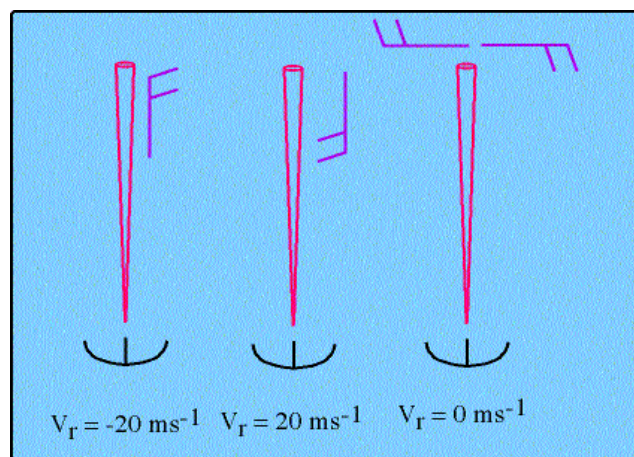
En interprétant des vitesses Doppler, maintenez également dans l'esprit que la taille de faisceau au-dessus de la terre augmente à des gammes plus étendues (figure II.10). Ainsi, des gammes plus étendues, vous ne regarderez plus l'écoulement extérieur, et par conséquent, l'interprétation de vitesse de simple-Doppler peut être rusée, ainsi pratiquons.



**Figure II.10 : Le faisceau de radar au-dessus de la terre.**

## II. 10. L'interprétation de vitesse Doppler

Un radar de Doppler peut seulement mesurer le composant des vents dans une direction parallèle au rayon de radar, la vitesse de vent mesurée s'appelle la vitesse radiale ( $V_r$ ).

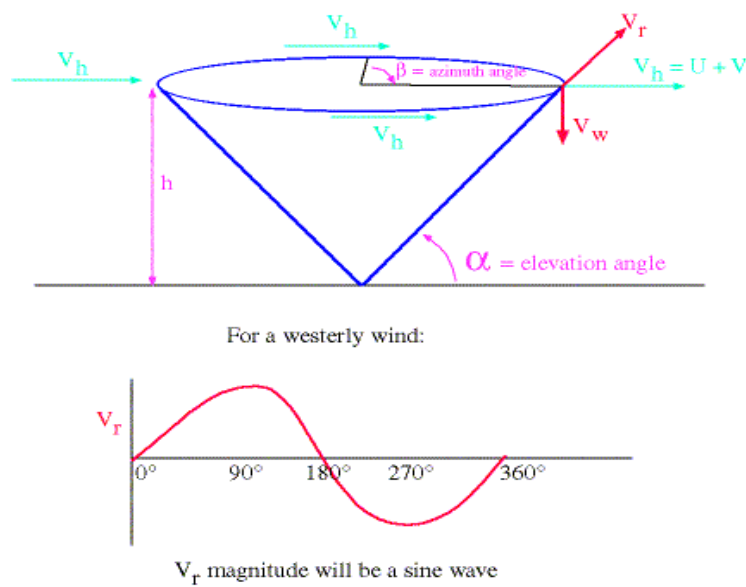


**Figure II. 11 : la vitesse radiale mesurée.**

- ▣ Notez que la vitesse radiale nulle ne signifie qu'ou les vents sont calmes ou les vents se déplacent une perpendiculaire de direction au faisceau.

## II. 11. Affichage D'Azimut De Vitesse (VAD)

La VAD, acronyme de Vélocité Azimut Display permet de calculer la vitesse horizontale moyenne à partir des mesures de vitesse radiale d'un radar Doppler effectuant une révolution azimutale complète à une distance et un angle de site constants. La vitesse moyenne du vent est obtenue par l'ajustement d'une fonction sinusoïdale aux vitesses radiales mesurées.



**Figure II. 12 : Affichage D'Azimut De Vitesse (VAD).**

**II.12. Radar cohérent**

Ce type de radar permet de détecter l'effet doppler lié au déplacement d'une cible et de déterminer la vitesse radiale de cette dernière. Il est conçu de façon à déterminer la phase et l'amplitude du signal à ses sorties.

Soit une cible ponctuelle située à une distance  $r$ , et se déplaçant à une vitesse radiale  $V_r$ . La phase du signal reçu par l'antenne radar est :

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r \quad (II.21)$$

avec  $\lambda$  : longueur d'ondes.

La variation de la phase vaut :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot V_r = \omega_d \quad (II.22)$$

On a donc affaire à un effet doppler de fréquence :

$$f_d = \frac{V_r}{\lambda} = \frac{V_r}{c} \cdot f_0 \quad (II.23)$$

$f_d$  est négative lorsque la cible s'éloigne du radar ( $V_r > 0$ ) et elle est positive dans le cas contraire.

Un oscillateur local très stable stalo (*stable oscillateur*) travaillant à hautes fréquences, délivre un signal de fréquence  $f_0$  qui est mélangé avec un signal très stable aussi ; provenant d'un oscillateur cohérent coho (*cohérent oscillateur*) pris comme référence et délivrant une fréquence intermédiaire  $f_c$ . Le signal obtenu est donc de fréquence  $f_0 + f_c$ .

A la réception, le signal capté est mélangé avec le signal stalo produisant un signal de fréquence intermédiaire  $f_i$  dont la phase est celle du signal retro diffusé  $f_0 + f_c$  est la phase du signal à l'émission. Cette fréquence est comparée au signal  $f_i$  au niveau de deux modulateurs équilibrés détecteurs de phase.

Notons qu'au préalable, les signaux ont subi une division de fréquence et la phase du signal issue du coho a été avancée de  $\pi/2$  avant comparaison.

Les deux signaux obtenus aux deux sorties du récepteur sont alors :

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_i t) \quad \text{Et} \quad s_2(t) = A \sin(2\pi f_i t)$$

$$L'amplitude du signal retro-diffusé se réduit en faisant : \quad = + -$$

quand à la phase qui contient la fréquence de doppler ;

$$\text{on a :} \quad \phi(t) = \phi_0 + \omega_d t$$

En pratique, la mesure de l'amplitude et de la phase se fait à l'aide de l'oscilloscope (méthode de lissajou) ou autre techniques.

Le schéma fonctionnel est représenté dans la figure suivante :

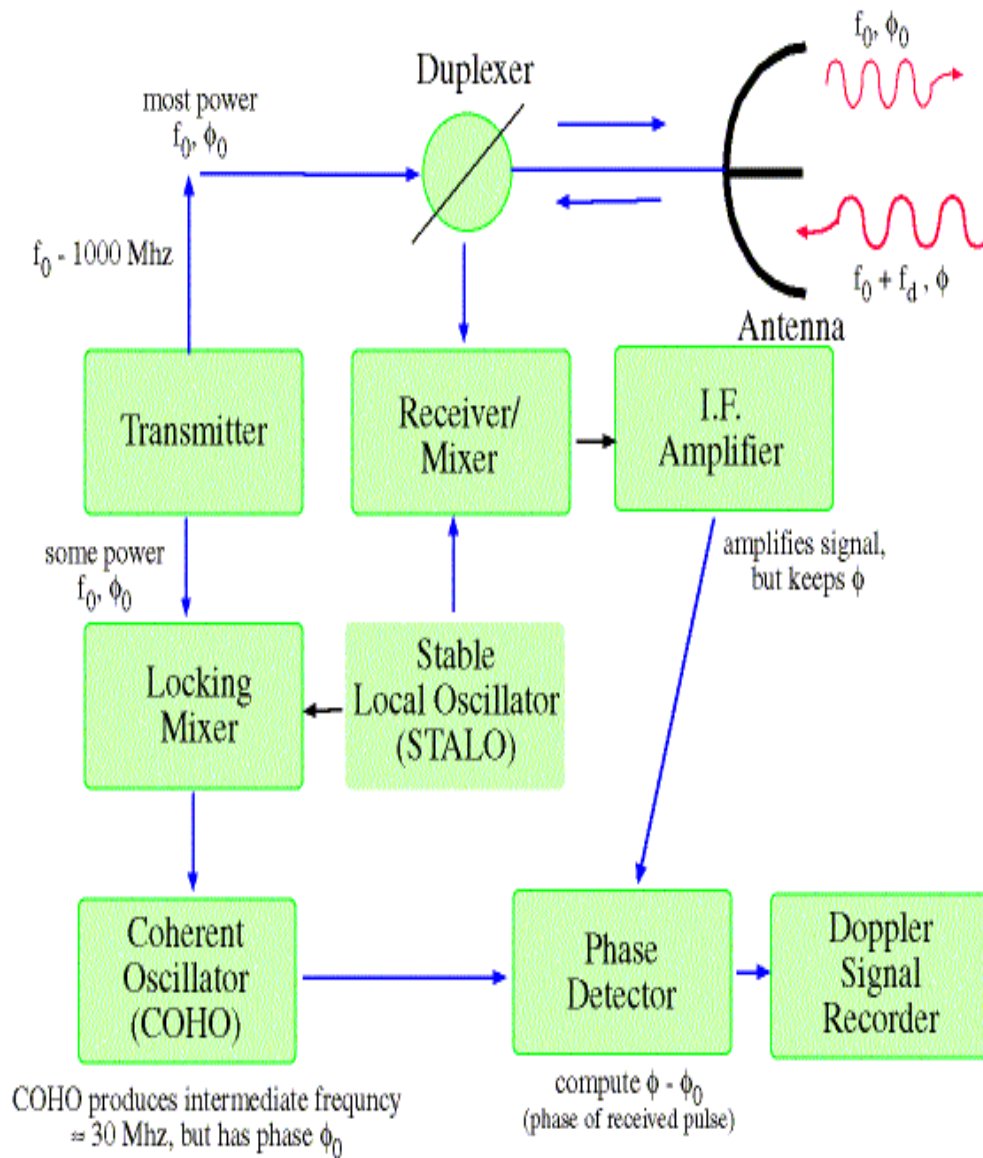


Figure II. 13 : schéma synoptique d'un radar doppler.

## **Conclusion**

D'après ce chapitre, nous pouvons dire que le radar météorologique Doppler présente non seulement toutes les caractéristiques du radar météorologique classique, c'est-à-dire qu'il permet d'évaluer l'intensité des perturbations et la distance à laquelle elles se trouvent, mais en plus de cela, les radars météorologiques Doppler peuvent aussi mesurer leur vitesse et l'orientation de leur mouvement.

Le chapitre suivant présentera un exemple de radar météorologique Doppler qui est le radar DWSR-2501 déjà installé et utilisé en Algérie.

Chapitre III : Système radar météorologique Doppler DWSR-2501C

III.1. Introduction

Le radar météorologique Doppler DWSR-2501C est un radar doppler de surveillance météorologique à base de magnétron en bande C.

Ce chapitre comporte deux parties, la première partie étudie les spécifications techniques de DWSR-2501C tel que ses caractéristiques et son conception technique.

La deuxième partie évalue le système de communication et informatique de DWSR-2501C « EDGE ».

III.2. Les caractéristiques techniques et conception technique du DWSR-2501C

III.2.1. Les caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques du DWSR-2501C sont exposées en détail dans les sections suivantes. Tous les circuits et composants critiques sont conçus avec des fonctions d'autoprotection pour assurer la survie dans des conditions défavorables d'alimentation électrique et d'environnement. Les circuits sont protégés contre les sautes de tension inattendues dues au secteur ou à la foudre. Des capteurs de température intégrés protègent le système en cas de panne des équipements de conditionnement du milieu.

<b>Réflecteur de 14 pieds (4,3 mètres)</b>	
Type de réflecteur	Parabolique à surface solide
Type de cornet d'alimentation	Cornet rectangulaire
Largeur du faisceau Gain	< 1,00° 45 dB
Fréquence de fonctionnement	5200 - 5700 MHz
Longueur d'onde	5,3 cm à 5600 MHz
Polarisation standard	Linéaire horizontale

Tableau III. 1: Caractéristiques du système DWSR-2501C.

### **III.2.2. Conception technique du DWSR-2501C**

La conception tout entière du DWSR-2501C met l'accent sur la précision, la stabilité, la fiabilité et la valeur en employant des techniques de construction matérielle modulaires et des interfaces pratiques pour permettre une mise en œuvre facile d'une vaste gamme de systèmes de contrôle à base de logiciels. Les techniques de conception et de construction permettent une utilisation à distance et fournissent une flexibilité maximum pour répondre aux besoins d'une clientèle variée. Le DWSR-2501C est construit pour fonctionner de façon continue (24 heures/jour) sans surveillance dans des endroits reculés et pour transmettre en direct des données radars à tous les terminaux locaux et distants communiquant avec le système principal. il se compose de :

#### **III.2.2.1. Antenne/pied de série D14CM1**

Le pied de série D est un pied extrêmement rigide, installé sur plus de 250 sites de radar météorologique au monde avec des antennes de diverses tailles. Quoique conçu pour positionner des réflecteurs d'antenne allant jusqu'à 6,1 mètres, l'antenne standard pour les systèmes de bande C est un modèle prime focus à haute précision de 4,3 mètres, idéal pour les applications de surveillance météorologique.



**Figure III.1: Système d'antenne D14CM1.**



Les performances du pied extrêmement fiable de série D, combinées à la haute précision électrique de l'antenne standard, constituent une plate-forme idéale pour les applications faisant appel à un radar météorologique.

Le système d'antenne a quatre (4) composants principaux :

- ✚ Pied.
- ✚ Système d'entraînement de l'antenne.
- ✚ Réflecteur.
- ✚ Radôme.

### **III.2.2. 1.1. Pieds de modèle standard**

Tous les pieds standards à deux axes (site et azimuth) de haute précision pour le DWSR-2501C sont conçus pour améliorer la précision, les performances et la fiabilité du radar. Équipés de joints tournants à faibles pertes et de bagues collectrices de haute technologie, les pieds sont capables d'une rotation continue dans le plan azimuthal et d'un mouvement de -2 degrés à +90 degrés dans le plan de site. Chaque axe peut être contrôlé manuellement et indépendamment. Les pieds utilisent des amplificateurs à servocommandes numériques extrêmement fiables et des moteurs d'entraînement sans balais pour entraîner l'antenne.

Tous les composants mécaniques sont conçus pour fournir une fiabilité élevée dans toutes les conditions de fonctionnement. Des interrupteurs de sécurité sont fournis pour la maintenance sur le pied et au niveau de la porte d'entrée de radôme.

<b>Pied de la série D (D14CM1)</b>	
Type	Site et azimut
Vitesse en azimut	36 °/s maximum
Rotation en azimut	360°, dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre
Mode manuel Mode automatique	-2° à +92° -0° à + 90° Sélectionné par l'opérateur
Précision du pointage en azimut et en angle de site	± 0,1°

**Tableau III.2: pied de la série D du system d antenne D14CM1.**

#### III.2.2.1.2. Système d'entraînement de l'antenne

Le système d'entraînement d'antenne standard de DWSR-2501C s'appelle StarDrive. Le système StarDrive utilise un moteur muni d'un système intégré d'amplification du signal d'entraînement et de codeurs numériques pour communiquer la position de l'antenne au processeur de signaux et aux systèmes d'affichage.

Le système de servocommande/entraînement de l'antenne communique les paramètres suivants au panneau de commande local et aux stations de travail actives du système logiciel (locales et distantes) :

- ✚ Marche/arrêt de la servocommande d'azimut.
- ✚ Fréquence de balayage en azimut.
- ✚ Fréquence de balayage en angle de site.
- ✚ Position en azimut.
- ✚ Position en angle de site.
- ✚ Direction de balayage en azimut.
- ✚ Direction de balayage en site.

### **III.2.2.1.3. Réflecteur**

L'antenne de configuration standard du DWSR-2501C est un réflecteur parabolique dont la source, avec un cornet guide d'ondes rectangulaire à polarisation horizontale.

### **III.2.2.1.4. Radôme**

Le radôme est construit avec des panneaux sandwich à âme de mousse moulés, conçus pour la fréquence de fonctionnement du radar, il est pratiquement transparent à l'énergie électromagnétique du radar. Le radôme est dimensionné de manière à fournir un espace suffisant pour le fonctionnement et l'entretien de l'antenne sélectionnée. Des feux d'obstacle et un paratonnerre sont fournis en tant que composants standard du radôme. Le radôme est conçu pour supporter des vitesses de vent d'une moyenne de 270 km/h.

## **III.3. Armoire du système radar**

L'armoire du système radar est un rack standard de 19 pouces qui contient tous les principaux sous-systèmes, y compris :

- ✚ Module émetteur.
- ✚ Récepteur numérique et processeur de signaux radar intégré.
- ✚ Déshydrateur/compresseur.
- ✚ Panneau de commande intégré tactile.
- ✚ Concentrateur de communications Ethernet.

L'armoire est munie d'une fermeture de sécurité pour prévenir tout accès accidentel à des tensions et intensités dangereux.

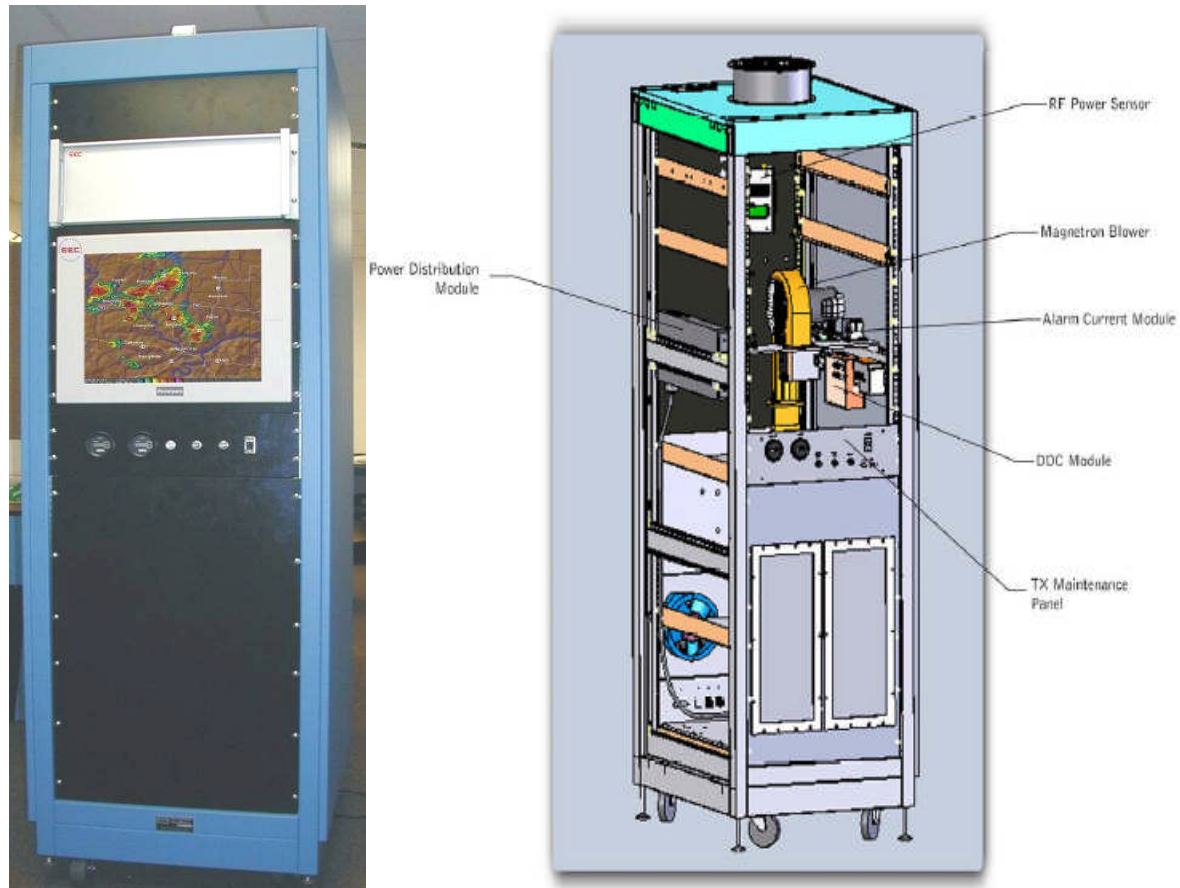


Figure III.2: Armoire du système radar.

### III.3.1. Présentation de l'émetteur à magnétron du DWSR-2501C

Le système radar DWSR-2501C comprend un émetteur haute puissance extrêmement stable qui utilise un magnétron en tant qu'amplificateur haute puissance. La puissance de sortie est de 250 kW à n'importe laquelle des durées d'impulsion sélectionnées. Les impulsions sélectionnées doivent se situer dans l'intervalle allant de 0,4 à 2,0  $\mu$ s.

L'émetteur du DWSR-2501C a les caractéristiques générales suivantes :

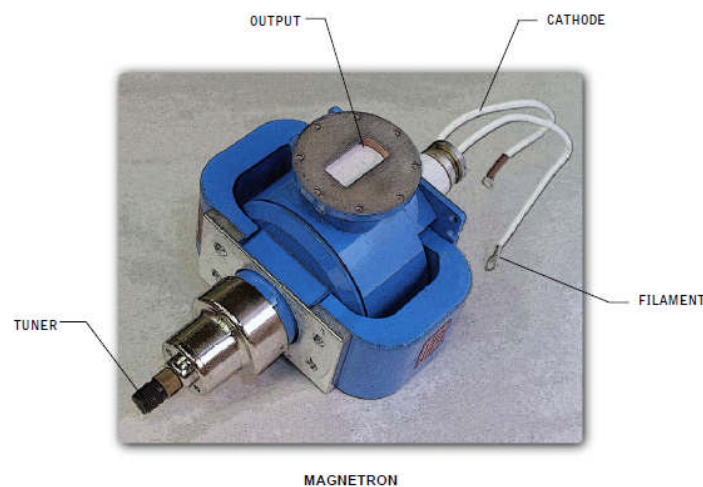
- ✚ Gamme de fréquences : 5,2 à 5,7 GHz
- ✚ Puissance crête d'émission : 250 kW minimum
- ✚ Facteur d'utilisation : Le facteur d'utilisation maximal du modulateur et du magnétron est de 0,001 : Les circuits intégrés empêchent de dépasser le facteur d'utilisation maximal
- ✚ Plage de durée des impulsions : Le modulateur permet d'utiliser trois durées d'impulsion qui sont programmées en usine
- ✚ PRF : L'émetteur fonctionnera à des fréquences de répétition des impulsions allant de 250 à 1300 impulsions par seconde

### **III.3.1.1. Magnétron**

Le DWSR-2501C comprend un système modulateur et émetteur haute puissance extrêmement stable qui utilise un magnétron coaxial en bande C en tant que générateur de haute puissance. Le matériel d'accompagnement de l'émetteur comprend des modules et circuits fournissant :

- ✚ Des signaux de synchronisation émis à des instants précis, générés par le processeur de signaux radar
- ✚ Des circuits de refroidissement pour le magnétron, le modulateur et l'armoire
- ✚ Des alimentations électriques hautes tension et basse tension
- ✚ Un modulateur à semi-conducteurs assurant la mise en forme des impulsions, avec trois durées d'impulsion
- ✚ Des menus de commande et d'étalonnage de l'émetteur sur le panneau de commande intégré
- ✚ Un module de collecte de données réparties (DDC) de commande de l'émetteur et d'équipement de test intégré (BITE)

L'émetteur fonctionne à partir d'une alimentation de courant alternatif monophasé de 220 V, 50Hz. D'autres types d'alimentation électrique peuvent être utilisés grâce à des systèmes de conditionnement de ligne ou des convertisseurs de puissance. Si des fluctuations de courant supérieures à  $\pm 10\%$  sont attendues, un système de conditionnement de ligne est obligatoire.

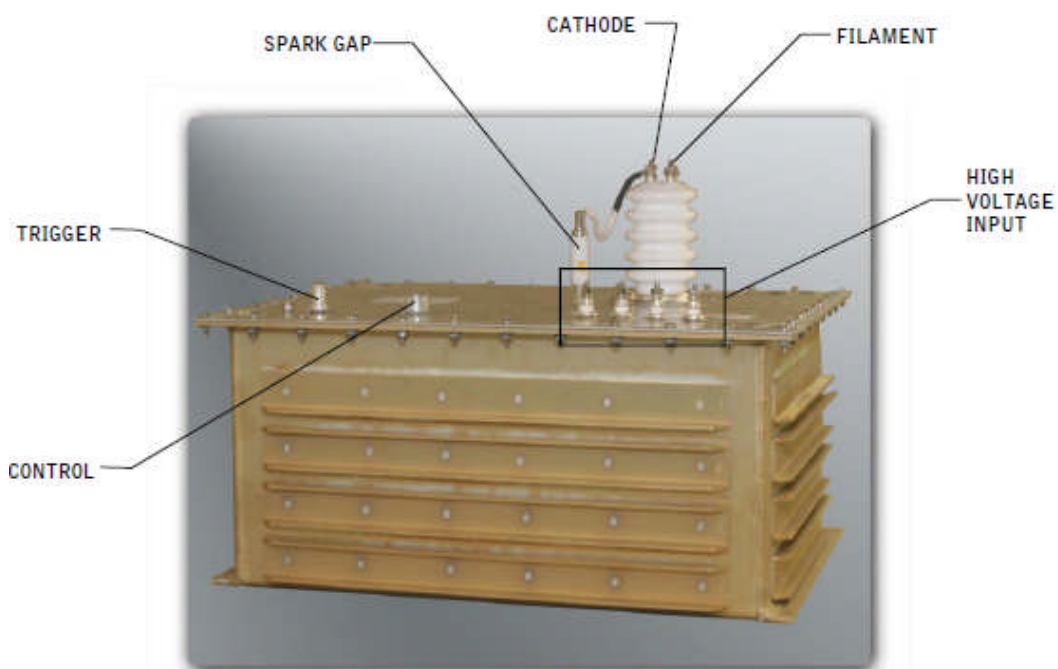


**Figure III.3: Magnétron**

### **III.3.1.2. Modulateur**

Un oscillateur de magnétron haute puissance de précision génère les impulsions RF de l'émetteur. Le magnétron est associé à un modulateur de courant divisé en modules qui comprennent des dispositifs de commutation de courant élevé, une alimentation électrique et des circuits de conditionnement des impulsions. Le modulateur à semi-conducteurs est utilisé pour faciliter l'entretien et le dépannage. Le modulateur de courant reçoit un signal du module de commande et développe une impulsion de courant élevé pour entraîner le transformateur d'impulsions.

Le transformateur d'impulsions convertit l'enveloppe de l'énergie de l'impulsion en une impulsion à haute tension et entraîne le magnétron. Le dispositif utilise une alimentation électrique hautement régulée et des circuits de stabilisation des impulsions pour développer précisément la forme et le niveau des impulsions pour une stabilité maximale de la phase de l'impulsion émise par l'amplificateur du magnétron.



**Figure III.4: Modulateur**

### III.3.2. Récepteur numérique et processeur de signaux radar (DRX/RSP) intégré EDRP-9

Le récepteur numérique et processeur de signaux radar intégré EDRP-9 combine les dernières technologies de pointe en matériel et logiciel pour obtenir les données radar météorologiques de la plus haute résolution et le contrôle du système le plus performant. Tous les signaux de synchronisation, les commandes opérationnelles, les signaux d'état et les tâches de traitement de données vidéo du système sont soit générés, soit traités par un ou plusieurs des sous-systèmes du module DRX/RSP intégré, suivant les commandes de sélection de mode fournies par l'opérateur du système. Le module du récepteur numérique et processeur de signaux radar intégré est constitué des sous-systèmes indiqués ci-dessous :

- ✚ Tête de réception.
- ✚ Récepteur numérique.
- ✚ Processeur de signaux radar.
- ✚ DDC.

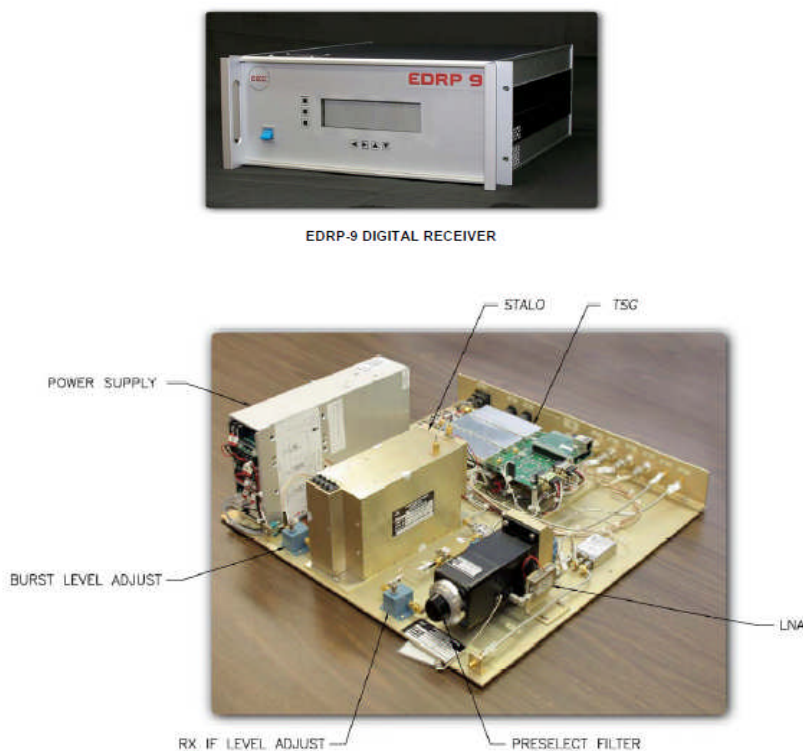


Figure III.5: Récepteur numérique de signaux radar (DRX/RSP) intégré EDRP-9.



### **III.3.2.1. Tête de réception**

La tête de réception est la section analogique qui configure correctement l'écho RF reçu par le récepteur numérique. La section analogique du récepteur commence par le circulateur en ferrite et le limiteur d'émission/réception qui protège les composants inférieurs du récepteur de puissance contre tout dégât par l'énergie haute puissance émise et permet l'émission et la réception avec une même antenne.

### **III.3.2.2. Récepteur numérique (DRX)**

Le récepteur numérique est un récepteur radar météorologique ultramoderne qui offre toutes les fonctions et la puissance nécessaires pour extraire le maximum d'informations utiles de l'énergie radar réfléchi.

Les canaux FI de 60 MHz sont échantillonnés à  $> 76$  MHz. Quatre canaux comprennent des changeurs abaisseurs de fréquence qui transposent le signal à large bande en bande de base pour une utilisation par le récepteur, et un canal fonctionne normalement comme un canal d'échantillonnage de l'émetteur pour une correction d'amplitude et de phase de l'émetteur, impulsion par impulsion.

L'énergie FI reçue est convertie en signaux I (en phase) et Q (avec déplacement de phase en quadrature) à l'aide des processeurs de signaux numériques (DSP) les plus puissants qui soient disponibles.

Les données I/Q 24 bits en bande de base des changeurs abaisseurs de fréquence réglables sont corrigées en fonction de la phase de l'amplitude de l'émetteur, impulsion par impulsion, puis sont stockées en tant que nombres à virgule flottante de 32 bits IEEE. Deux puissants processeurs de signaux numériques (DSP) sont fournis pour assurer la normalisation I/Q et l'analyse des impulsions de l'émetteur. La carte fournit 9 canaux de déclenchement et plusieurs ports parallèles d'E/S, ainsi qu'un processeur Power-PC et deux ports Ethernet rapides.



### **III.3.2.3. Processeur de signaux radar (RSP)**

Le processeur de signaux radar a été conçu pour fournir le maximum de puissance et de souplesse disponible sur un processeur mono carte de signaux de radar météorologique. Chaque carte du processeur de signaux contient 8 processeurs de signaux numériques (DSP), pour un total de 3840 Mflops de capacité maximale. Huit (8) ports de liaison sont disponibles pour des communications externes.

La carte contient également un processeur PowerPC avec deux canaux Ethernet rapides, une mémoire flash et une mémoire DRAM, ainsi que toute une série de ports parallèles et série à usage général. Le PowerPC prend en charge le système BITE (logiciel de maintenance).

#### **III.3.2.3.1. Algorithmes**

Les algorithmes de la configuration standard comprennent le filtrage du clutter dans le domaine temporel (16 largeurs), la correction d'amplitude de phase de l'émetteur, le calcul du moment Z/V à l'aide d'algorithmes à paire d'impulsions, le fonctionnement à double fréquence de répétition des impulsions, le calcul des valeurs Z corrigées et non corrigées, un mode de données brutes, des diagnostics réalisable en réseau, des diagnostics locaux à l'aide d'un terminal passif.

#### **III.3.2.3.2. Sous-système d'équipement de test intégré (BITE)**

Le DWSR-2501C a un système BITE entièrement instrumenté pour fournir au personnel de maintenance du système une situation détaillée du système et aider les ingénieurs de maintenance à déterminer la mesure appropriée à adopter en cas de défaillance ou de panne.

#### **III.3.2.4. Modules de collecte de données réparties (DDC)**

Le module de collecte de données réparties (Distributed Data Collection, ou DDC) est un système de collecte et de traitement de données basé sur un microprocesseur qui peut être placé à divers endroits du radar pour surveiller et contrôler les fonctions opérationnelles. Le DWSR-2501C standard a deux modules DDC, un situé dans l'armoire principale pour surveiller et contrôler l'émetteur et l'armoire principale et l'autre situé dans le châssis du récepteur numérique et processeur de signaux intégré pour surveiller les paramètres internes. Le module DDC comporte deux sections principales, la section de conversion analogique-numérique et la section du microprocesseur pour contrôler les opérations.



DDC MODULE

**Figure III.6 : Modules de collecte de données réparties (DDC)**

#### **III.3.3. Déshydrateur/compresseur**

Le module déshydrateur/compresseur fournit une arrivée d'air sec automatique ne nécessitant pratiquement aucun entretien à la connexion du guide d'ondes du radar, de l'ensemble émetteur-récepteur à l'ensemble antenne-pied. Une brochure contenant les spécifications techniques pour le déshydrateur est disponible sur demande.

**III.4. Spécifications environnementales**

Équipements extérieurs			
	Température		Humidité
	Minimum	Maximum	
En fonctionnement	-40 °F	+120 °F	10 % - 100 %
Hors fonctionnement	-50 °F	+140 °F	10 % - 100 %
Équipements intérieurs			
	Température		Humidité
	Minimum	Maximum	
En fonctionnement	+10 °C	+95 °F	10 % - 90 %
Hors fonctionnement	-40 °C	+130 °F	10 % - 90 %

**Tableau III.2: Spécifications environnementales du système radar.****III.5. Conception de l'interface de communications**

Le système radar DWSR-2501C est conçu pour fonctionnement complet par commande à distance à l'aide de différentes configurations de communications.

L'interface de communications prédominante entre les modules du DWSR-2501C est une interface Ethernet standard utilisant le protocole TCP/IP.

Le réseau de communications doit fournir une bande passante relativement élevée pour permettre une commande à distance complète en temps réel. Un débit minimum de 128 kbit/s est nécessaire. Le transfert d'images de données et la distribution de données qui ne sont pas particulièrement urgentes pourront être effectués sur des lignes de communications offrant une vitesse plus faible.

**III.6. Systèmes de contrôle radar et logiciel d'affichage**

Le système standard de contrôle radar et d'affichage pour le DWSR-2501C est le sous-système de contrôle radar et analyse de données EDGE (Enterprise Doppler Graphics Environment), un système basé sur Linux conçu pour un large éventail de systèmes informatiques de haut niveau.

### **III.7. Description technique du système EDGE**

#### **III.7.1. Définition**

EDGE est un système logiciel de contrôle radar et de traitement de données de calibre de recherche, conçu pour assurer le fonctionnement d'un système radar météorologique, extraire des informations météorologiques des données radar brutes et afficher les données sous des formes utiles pour les météorologistes et les prévisionnistes.

#### **III.7.2. Présentation générale et fonctions standard**

Le système de données EDGE est conçu pour effectuer toutes les tâches opérationnelles ayant trait à un système radar météorologique et fournit les fonctions et caractéristiques suivantes sous une interface graphique facile à utiliser :

- ✚ Contrôle de l'émetteur/récepteur radar.
- ✚ Contrôle de l'antenne radar.
- ✚ Contrôle du processeur de signaux radar.
- ✚ Contrôle radar et fonctions de programmation des produits.
- ✚ Génération de produits radar.
- ✚ Archivage et extraction des données brutes et des produits.
- ✚ Affichage souple des produits.
- ✚ Capacité de communication des données.
- ✚ Capacité de mise en réseau.
- ✚ Fonctions de diagnostic et de maintenance.

#### **III.7.3. Fonctions de EDGE**

EDGE a un système très convivial d'interface utilisateur et d'affichage graphique qui assure la liaison entre l'utilisateur du radar et système d'analyse de données. Les fonctions comprennent la génération et l'affichage de produits en temps réel et hors ligne, la manipulation des images et des menus complets pour le contrôle radar et l'analyse de données.

Les fonctions du système de données sont sélectionnées et contrôlées à partir de menus d'affichage commandés par la souris.

### **III.7.4. Interaction de l'utilisateur**

Le principal écran d'affichage de données EDGE comprend une zone d'image, une zone consacrée à un tableau de couleurs, une zone de données auxiliaires et une zone de menu. L'utilisateur interagit avec l'écran d'affichage en cliquant avec la souris sur la zone de menu.

#### **III.7.4.1. Paramètres d'affichage**

Les paramètres d'affichage suivants sont contrôlés par l'opérateur :

- ✚ Affichage de la portée maximale (en km, milles ou milles marins pour les unités horizontales, en km ou en kft pour les unités de hauteur)
- ✚ Affichage du décalage (déplacement horizontal) et du zoom
- ✚ Calques (géographiques, politiques, cercles de distance, rayons azimutaux)
- ✚ Tableaux de couleurs (modification des couleurs, contraste des couleurs, sélection de tableau à partir d'un fichier)
- ✚ Échelle d'affichage (unités, unité la plus faible, unité la plus élevée)
- ✚ Données auxiliaires (date, heure, moment, nom du radar, angle de site, etc.)

#### **III.7.4.2. Manipulation des images**

L'utilisateur peut invoquer les fonctions suivantes de manipulation des images :

- ✚ Produits à affichage variable (résolution faible, moyenne ou élevée)
- ✚ Zoom de l'image
- ✚ Déplacement horizontal de l'image à l'aide de la souris
- ✚ Mode d'images multiples ou d'image unique
- ✚ Configuration et exécution d'une boucle de film
- ✚ Lecture de paramètre par clic de la souris (l'utilisateur peut interroger l'écran d'affichage pour extraire des valeurs de données)
- ✚ Tableaux de couleurs d'affichage des images

Des images de superposition et sous-jacentes en couleurs sont fournies pour tous les affichages. Ces images de superposition et sous-jacentes sont des images 24 bits. Trente-deux couleurs d'affichage sont disponibles pour les produits ; des variations de teinte de ces couleurs fournissent jusqu'à 256 couleurs effectives pour l'affichage des données. La couleur de chaque niveau et les valeurs représentées par chaque niveau peuvent être spécifiées.

### **III.7.5. Architecture logicielle**

Le système de données EDGE a été développé à partir d'un plan d'architecture relativement simple conservant la plupart des fonctions des versions antérieures et améliorant la facilité d'emploi et l'efficacité de celles-ci. Le système est configuré autour d'un module central appelé Radar Executive (REX), auquel s'ajoute la contribution de plusieurs modules ou procédés. Les modules qui apportent une contribution sont le module d'interface utilisateur (User Interface, ou UIF), le module programmeur, le module de contrôle des archives et le module de surveillance.

### **III.7.6. Moments**

Dans la terminologie des systèmes de données radar, le mot « moment » désigne toute quantité mesurée ou de données dérivées. Le processeur de signaux radar fournit les moments radar essentiels : intensité corrigée, intensité non corrigée, vitesse radiale et largeur spectrale. Avec des systèmes radar à double polarisation, les moments supplémentaires de réflectivité différentielle, phase différentielle spécifique, coefficient de corrélation et taux de dépolarisation linéaire sont également disponibles.

À partir de ces sources de données, et d'autres au sein du système, EDGE produit diverses quantités dérivées, comprenant notamment l'eau liquide, l'accumulation de précipitations, le taux de pluie, la hauteur et le cisaillement.

#### **III.7.6.1. Moment de facteur de réflectivité non corrigée (U)**

Le moment de facteur de réflectivité non corrigée, indiqué par le symbole « U », est l'écho indépendant du radar proportionnel à la puissance reçue, auquel est ajoutée la normalisation de portée ( $20 \log(\text{portée})$ ). La réflectivité non corrigée est appelée dBZ. N'importe quel produit d'intensité EDGE peut être construit à partir de ce moment à la discrétion de l'opérateur.

#### **III.7.6.2. Moment de facteur de réflectivité corrigée (Z)**

Le symbole « Z » est couramment utilisé pour désigner le moment de facteur de réflectivité corrigée. Ce moment peut également être désigné par le symbole « CZ ». C'est le moment d'intensité non corrigée qui a été traité par le processeur de signaux et EDGE. Le résultat est présenté dans dBZ.

### **III.7.6.3. Moment de vitesse radiale (V)**

La vitesse radiale est calculée dans le processeur de signaux et est présentée sous forme de fractions de l'intervalle de Nyquist ; elle est également exprimée en mètres par seconde vers le radar ou en direction opposée à celui-ci. Le moment de vitesse radiale est appelé « V ».

### **III.7.6.4. Moment de largeur de spectre (W)**

La largeur de spectre, appelée « W », est une mesure de l'erreur de mesure de la vitesse radiale. Pour des rapports signal/bruit élevés, la largeur de spectre est proportionnelle à l'écart type de la vitesse radiale. Ce moment est présenté sous forme de fractions de l'intervalle de Nyquist et est exprimé en mètres par seconde.

### **III.7.7. Corrections de données**

Le moment de réflectivité corrigée peut être traité plus avant par EDGE pour améliorer la qualité des données et une correction de l'erreur de repliement peut être appliquée à la mesure de vitesse radiale pour tenir compte du mouvement des orages.

Ces corrections, en général, sont effectuées après le traitement et sont laissées à la discrétion de l'utilisateur. Toutes ces corrections sont mises en œuvre d'une manière qui minimise l'utilisation des ressources informatiques.

#### **III.7.7.1. Correction de l'atténuation due aux précipitations**

Les systèmes radar météorologiques qui fonctionnent à de courtes longueurs d'onde et/ou de longues portées subissent une atténuation du signal en cas de précipitations entre le site du radar et la cellule observée. Bien que cette atténuation n'affecte pas normalement les estimations de vitesse ou de largeur spectrale (à moins que l'atténuation soit telle que le signal soit trop faible pour être détecté), la réflectivité mesurée est directement affectée par l'atténuation lors de l'aller-retour au travers de l'atmosphère. Le but de l'algorithme de correction de l'atténuation des précipitations est d'estimer l'atténuation subie par le faisceau radar et de l'éliminer de l'estimation de Z.

### **III.7.7.2. Algorithme de correction de l'erreur de repliement sur la vitesse**

EDGE comprend un algorithme de correction de l'erreur de repliement sur la vitesse qui est utilisé lorsque De-aliased Velocity (vitesse corrigée de l'erreur de repliement) est sélectionné pour les produits PPI et certains produits d'alerte.

L'algorithme de correction de l'erreur de repliement d'EDGE déplie les données de vitesse, rayon par rayon, à l'aide de la méthode d'Eilts. Le résultat produit par l'algorithme est un balayage de données de vitesse corrigées de l'erreur de repliement.

### **III.7.8. Produits EDGE**

La fonction de génération de produits EDGE offre une large gamme de capacités et de fonctions pour aider les utilisateurs à extraire des informations utiles du système radar. Des produits peuvent être créés à partir du volume actuel (le volume en cours de construction dans la mémoire), à partir du dernier volume complet (actuellement en mémoire ou en mémoire virtuelle) ou à partir d'une archive de volume sur le disque. Chaque commande de génération de produits contiendra un ensemble de définitions de paramètres pour le produit à générer.

Les produits peuvent être enregistrés dans un répertoire local, une archive, un répertoire global ou toute combinaison des options de stockage. Les produits peuvent aussi être convertis sous différents formats d'images graphiques et distribués à d'autres stations de travail dans n'importe lequel des formats.

L'utilisateur peut demander une génération de produits de deux manières : par l'intermédiaire du programmeur ou au moyen de demandes immédiates.



## III.7.9. Produits standard

Abréviation du produit	Nom du produit
PPI	Planned Position Indicator
CAPPI	Constant Altitude Planned Position Indicator
RHI	Range Height Indicator
BASE	Low Altitude Reflectivity Product
HMAXZ	Height of Maximum Z Product
LRA	Layer Reflectivity Average Product
ETOPS	Echo Tops Product Standard and 3-D
ACM	Accumulated Rainfall Product

Tab III .4 : Produits standard.

## III.7.9.1. PPI : Planned Position Indicator (Indicateur de position prévue)

Le produit PPI est une vue en « plan » d'un balayage de 360 ° d'azimut à un angle de site fixe. Le produit PPI standard peut être produit à l'aide des moments suivants :

Moment	Description
Z	Intensité corrigée
U	Intensité non corrigée
R	Taux de pluie
T	Taux de pluie total
V	Vitesse radiale
W	Largeur spectrale
S	Cisaillement radial
A	Cisaillement azimutal
C	Cisaillement combiné

Tableau III.5 : Moments du produit PPI.

**III. 7.9.2. CAPPI et pseudo-CAPPI**

Le produit CAPPI (« constant-altitude PPI ») est une coupe transversale horizontale à une altitude spécifiée par l'utilisateur, produite à partir du volume de données brutes et par interpolation. Des données obtenues à tous les angles de site et à tous les azimuts du volume balayé sont utilisées pour estimer l'intensité, la vitesse ou la largeur spectrale des précipitations dans un plan horizontal. Le produit CAPPI est disponible à n'importe quelle hauteur de 100 mètres à 30 kilomètres.

Le calcul de la hauteur des observations pour le produit CAPPI prend en compte la courbure de la Terre et la réfraction atmosphérique, conformément à l'équation suivante :

$$H = \sqrt{r^2 + 2rR' \sin(\phi) + R'^2} + H_0 \quad (\text{III.1})$$

Où h est la hauteur de l'observation, r est la distance jusqu'à la porte en question,  $\Phi$  est l'angle de site, R' est le rayon terrestre fictif et H est l'altitude du radar.

Le rayon terrestre fictif (tel que 4/3 du rayon terrestre) peut être spécifié par le client.

Dans le cas où il n'y a aucune valeur au-dessus de la hauteur (dans le cône de silence), l'utilisateur ne pourra utiliser les échos des angles de site inférieurs, créant en fait ce que l'on appelle un pseudo-CAPPI, ou choisir de laisser cette partie du produit vierge. Cette zone vierge apparaîtra comme grisée dans le produit.

Le produit résultant pourra contenir les moments suivants :

Moment	Description
Z	Intensité corrigée
U	Intensité non corrigée
R	Taux de pluie
T	Taux de pluie total
W	Largeur spectrale
S	Cisaillement radial
A	Cisaillement azimutal
C	Cisaillement combiné

**Tableau III.6 : Moments du produit CAPPI.**

**III. 7.9.3. RHI : Range Height Indicator (Indicateur de distance-hauteur)**

Le produit RHI (« Range-Height Indicator ») est un affichage en format polaire d'un balayage à angle de site fixe d'un azimut à partir d'un volume de données RHI. Les données sont présentées à pleine résolution, en format polaire. Aucun(e) interpolation, débasage ou autre manipulation de données n'est effectué(e), de sorte que les données brutes peuvent être observées dans leur état le plus fondamental. Le produit est disponible pour l'intensité, la vitesse ou la largeur spectrale.

**III.7.9.4. BASE Low Altitude Reflectivity (Réflectivité à basse altitude)**

Traditionnellement, de nombreux systèmes radar ont utilisé le produit pseudo-CAPPI en tant que mesure des précipitations à basse altitude pour calculer l'accumulation des précipitations dans les bassins hydrologiques ainsi que dans des systèmes composites. Le pseudo-CAPPI obtient des données de plusieurs balayages de l'antenne (généralement quatre) ou PPI.

Les données du balayage à l'angle de site le plus faible sont utilisées pour les zones du produit les plus éloignées. À mesure que la distance diminue, des données de balayages à angle de site plus élevé sont utilisées. Cette sélection respecte généralement certains critères définis par l'utilisateur. La conséquence de cette procédure est de minimiser l'effet de la contamination par le clutter et de l'atténuation due à un blocage du faisceau à faible altitude, à proximité du radar, à faible angle de site.

Le produit de base est une bonne indication de la pluie qui tombe à la surface.

Les moments suivants sont disponibles dans un produit de base :

Moment	Description	Unités
Z	Intensité corrigée	dBZ
U	Intensité non corrigée	dBZ
R	Taux de pluie	mm/h, po/h
T	Taux de pluie total	mm/h, po/h

**Tableau III.7 : Moments du produit BASE.**

**III.7.9.5. HMAXZ : Height of Maximum Z (Hauteur de Z maximale)**

Le produit HM AXZ est une présentation de l'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer de la réflectivité maximale dans chaque cellule. Les résultats sont disponibles dans le moment H en kilomètres, kilo-pieds ou milles. Le produit peut être construit à partir d'intensités corrigées ou non corrigées.

<b>Moment</b>	<b>Description</b>
H	Hauteur

**Tableau III.8 : Moment du produit HMAXZ.**

**III. 7.9.6. LRA : Layer Reflectivity Average (Réflectivité moyenne de couche)**

Le produit LRA est la réflectivité moyenne entre deux plans horizontaux définis par l'utilisateur et parallèles à la surface de la terre. La moyenne de la réflectivité peut être calculée à partir des valeurs corrigées ou non corrigées. Le calcul de la moyenne est effectué en puissance linéaire.

Le produit peut être présenté dans les moments suivants :

<b>Moment</b>	<b>Description</b>
Z	Intensité corrigée
U	Intensité non corrigée
R	Taux de pluie
T	Taux de pluie total

**Tableau III.9 : Moments du produit LRA.**

**III. 7.9.7. Echo Base (EBASE) (Base d'échos)**

Le produit EBASE donne la hauteur de l'écho le plus bas (en altitude) dans la cellule. Le produit peut être généré à partir de réflectivité corrigée ou non corrigée.

<b>Moment</b>	<b>Description</b>
H	Hauteur

**Tableau III.3 : Moment EBASE.**

### **III. 7.9.8. Echo Tops (ETOPS) (Plafond d'échos)**

Le produit TOPS donne la hauteur de l'écho le plus élevé (en altitude) dans la cellule. Le produit peut être généré à partir de réflectivité corrigée ou non corrigée.

<b>Moment</b>	<b>Description</b>
H	Hauteur

**Tableau III.4 : Moment TOPS.**

### **III. 7.9.9. ACM : Accumulated Rainfall (Pluie accumulée)**

Le produit ACM donne la hauteur d'eau accumulée à la surface au cours d'une durée définie. Les produits ACM sont disponibles pour des intervalles d'une heure, de trois heures, de 24 heures ou d'un nombre d'heures défini par l'utilisateur. Lorsque des volumes sont acquis, ils peuvent être marqués comme candidats pour l'accumulation. Les données sont ramenées à une résolution cartésienne de 240 kilomètres par un kilomètre carré, normalisées dans le temps et ajoutées aux diverses cellules d'accumulation. Une fois les diverses périodes écoulées, les produits ACM sont automatiquement générés.

Les produits ACM peuvent être construits à partir d'intensités corrigées ou non corrigées, et sont convertis en taux de pluie à l'aide d'une relation Z-R séparée, en permettant à des corrections spécialisées d'affecter uniquement ces produits. Les rapports d'une série de jauges de pluie peuvent être utilisés à des fins de comparaison avec les données d'accumulation (normalisées dans le temps) pour former des facteurs de correction qui sont utilisés pour corriger les données d'accumulation.

### **III.7.10. Diagnostics**

Les diagnostics les plus utiles pour les opérations normales du système de données sont affichés sur les écrans d'état du système qui indiquent les défaillances du système, en indiquant la défaillance du système à fournir un ou plusieurs types de services.

#### **III.7.10.1. Vérification générale du système**

Le système de données EDGE possède une fonction de vérification globale du système qui teste la fonctionnalité des principaux éléments logiciels et matériels du système dans toute la mesure réalisable.

### **III.7.10.2. Tests de génération de produits**

Les algorithmes de génération de produits seront probablement mis à jour de temps en temps sur le système de données, et il sera nécessaire de tester soigneusement ces algorithmes pour vérifier leur bon fonctionnement. Il est préférable d'effectuer ces tests en exécutant l'algorithme sur un ensemble de données de test possédant des propriétés mathématiques connues. Il est alors possible de prévoir les données attendues et de les comparer aux données effectivement obtenues.

### **III.7.10.3. Affichage des données par présentation de type A**

Le système de données fournit un affichage spécial par présentation de type A pour les besoins de maintenance et de réglage. L'écran affiche jusqu'à trois fenêtres de distance, temps ou fréquence en fonction d'une variable. Les affichages suivants sont disponibles dans ce format :

- ✚ Intensité.
- ✚ Vitesse.
- ✚ Largeur spectrale.

### **III.7.10.4. Diagnostics de l'antenne**

Cet algorithme fournit les fonctions suivantes pour la mesure des performances de l'antenne et le réglage des paramètres des servocommandes :

- ✚ Affichages graphiques de la position et de la vitesse en fonction du temps.
- ✚ Mouvements par étapes et progressifs pour le réglage des servocommandes de l'antenne.
- ✚ Capacité de positionnement manuel de l'antenne (mode de pointage, avec incréments du curseur en azimuth et angle de site).

## **Conclusion**

Le DWSR-2501C est conçu pour assurer la meilleure précision, stabilité et fiabilité en employant les techniques de construction matérielle les plus avancées.

Cela permet une mise en œuvre facile à travers une vaste gamme de systèmes de contrôle à base de logiciel.

## ***Chapitre IV : L'estimation de taux de précipitation et la vitesse du vent***

### **IV.1. Introduction**

Entre 1964 et 1985, le cisaillement du vent a été directement ou indirectement relié à 26 catastrophes aériennes civiles majeures aux États-Unis, causant 620 morts et 200 blessés. De ces accidents, 15 se sont produits pendant le décollage, 3 pendant le vol et 8 lors de l'atterrissage. Depuis 1995, le nombre d'incidents reliés au cisaillement du vent ont pu être réduits à un peu moins d'un par décennie, grâce aux radars Doppler plus précis.

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.

### **IV.2. Le calcul de la réflectivité et l'estimation de taux de précipitation**

#### **IV.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 :  $N(D) = N_0 \cdot \exp(-\Lambda D)$  (IV.1)

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



Où :

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

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

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

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

En utilisant l'approximation de Rayleigh :  $\eta = (1/V) \cdot \int \sigma_i(D) \cdot N(D) \cdot dD$  (IV.2)

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

$$= \int \dots \tag{IV.3}$$

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

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

Niveau de Réflectivité	Valeur en dbz
0	0
1	9
2	16
3	20
4	24
5	28
6	32
7	36
8	40
9	44
10	48

**Tableau IV.1 : Le facteur de réflectivité exprimé en dbz.**

Cependant la taille des éléments de précipitations étant de l'ordre du millimètre, De plus, la formule (IV.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.

$$= | \dots | - = \frac{| \dots |}{\dots} \int \tag{IV.4}$$

$Z_0 = 1\text{mm}$  soit le retour équivalent d'un volume rempli de gouttelettes avec  $D=1\text{mm}$ .  
 $| \quad | = 0,93$  pour l'eau et  $0,24$  pour la neige.

- ✚ 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:

$$P_r = \frac{C}{r^2} \quad (IV.5)$$

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.

## IV.2.2. L'estimation de taux de précipitation

### IV. 2.2.1. Définition

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.

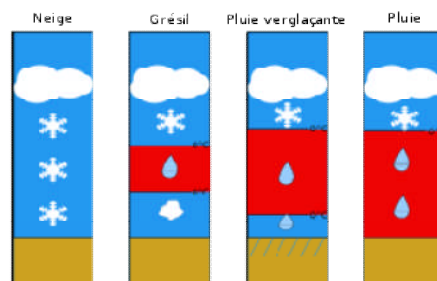
La fréquence et la nature des précipitations dans une région géographique donnée sont des caractéristiques importantes de son climat. Elles contribuent de façon essentielle à la fertilité et à l'habitabilité des zones tempérées ou tropicales, dans les zones polaires, elles aident au maintien des calottes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

Liquide:

- Pluie
- Bruine
- Pluie verglaçante/Bruine verglaçante

Solide:

- Neige
- Grésil
- Grêle



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

#### **IV.2.2.2.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

#### **IV.2.2.3.Estimation de 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 ( $v(D)$ ):

$$R = \int_0^\infty \pi D^2 v(D) n(D) dD \quad (IV.6)$$

### IV.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 (IV.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:

$$Z = R^2 \quad (IV.7)$$

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).

Par exemple pour des précipitations convectives, la correspondance entre Z et R est donnée par :

Z (dBZ)	10	20	30	40	50	60
R(mm .h <sup>-1</sup> )	0.15	0.65	2.73	11.5	48.6	205.0

**Tableau IV.2 : La correspondance entre Z et R pour les précipitations convectives.**

D'après Marshall et Palmar 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 & Palmar 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.

#### **IV.2.4. La mesure de 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.

##### **IV.2.4.1. Le 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 (rétro diffusion)

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 (rétro diffusion). 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.

#### **IV.2.4.2.La Méthode de Calibrage**

Le calibrage du radar consiste à déterminer un facteur de correction pour estimer l'intensité de pluie à partir de la formule standard Z-R ou la détermination des constantes a et b de la relation Z-R. La méthode la plus utilisée est :

##### **🚦 Calibrage par un réseau de pluviomètres**

La méthode classique de calibrage hydrologique est l'utilisation conjointe des images radar et de mesure pluviographique, pour remédier à certaines causes d'erreurs et permet aussi à améliorer la qualité de la mesure radar.

Le pluviomètre est l'instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la pluie globale précipitée dans l'intervalle de temps séparant deux relevés. Le pluviomètre est généralement relevé une fois par jour

Des pluviographes à intensité sont installées pour la mesure de l'intensité de pluie (IP), Pour la détermination de l'intensité de pluie (IR) on utilise formule de Marshall & Palmar

$$= \quad \cdot \quad (IV.8)$$

Si on considère que la correction est uniforme sur toute l'image radar, un facteur moyen de correction est évalué :

$$= \frac{\Sigma}{\Sigma} \quad (\text{IV.9})$$

$f_{c0}$  : est le facteur correctif pour la maille radar  $M_0$ .

Dans un second cas on peut prendre en compte les variations du facteur de correction dans l'espace. Dans cette dernière hypothèse, calibrer l'image radar consiste à appliquer un schéma d'interpolation aux facteurs de correction déterminé aux divers points de comparaison.

Les ajustements locaux sont faits en interrogeant les sites de calibrage les plus proches et en leurs assignant des poids inversement proportionnels à la distance, les données du radar sont modélées avec les données du réseau pluviométrique par une technique d'ajustement plan tenant compte de la variance des précipitations indiqué par le radar.

Cette méthode donne des résultats assez satisfaisants pour des périodes d'intégration (> 24 heures) avec des erreurs moyennes d'environ 10 à 30% pour un réseau pluviométrique comportant un point de mesure pour 1000 à 2000 km<sup>2</sup>

L'erreur d'estimation diminue lorsque l'espacement entre les pluviomètres diminue.

Dans tous les cas, le cumul de données pendant de longues durées conduit pour la pluie à des résultats en accord avec la relation standard de Marshall & Palmar.

De nombreuses sources d'erreur affectent toutefois la qualité des estimations de précipitation par radar. Un des points sensibles est la nécessité de trouver une relation moyenne pour la transformation des réflectivités des cibles en intensité des précipitations. Malgré l'incertitude des résultats, le radar est un des seuls instruments permettant la mesure en temps réel sur l'ensemble d'un bassin versant et il est, par conséquent, très utile pour la prévision en temps réel. Il permet une bonne représentation des phénomènes dans un rayon d'environ 100 km.



### **IV.3. Estimation de vitesse du vent**

#### **IV .3.1. Définition**

##### **✚ 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.

##### **✚ 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.

#### **IV .3.2. La mesure de vitesse du vent**

##### **IV .3.2.1. La mesure de vitesse du vent par le radar météorologique Doppler**

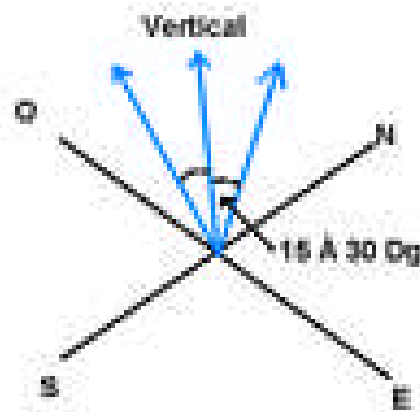
La force et la direction du vent à différentes altitudes peuvent être obtenues grâce aux mesures effectuées par le radar météorologique, il mesure le vent par effet Doppler, en d'autres termes la mesure de  $\omega = 2\pi f$  dans une fonction variant avec le temps de la forme  $y = \cos\omega t$ . Ceci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

#### IV.3.2.2. La mesure de vitesse du vent par le profileur de vent

Un profileur de vent est un radar Doppler à très grande résolution (typiquement 100 à 200 m à la verticale et moins de 100 m à l'horizontale) pointant verticalement, utilisé en météorologie pour mesurer la direction et la vitesse des vents. Il note la variation de l'indice de réfraction de l'air.

Cette variation est due aux turbulences de l'air en mouvement par la variation de sa densité. Lorsque l'indice change sur une distance qui correspond à la moitié de la longueur d'onde du radar utilisé, il y a un retour constructif entre les ondes revenant des zones de variation successives.



**Figure IV.2 : Les trois axes de prises de données.**

Cette distance de variation est typiquement de l'ordre de quelques centimètres à quelques mètres ce qui fait qu'on utilisera une longueur d'onde de cet ordre de grandeur. on suit également avec les profileurs, des cibles telles que la pluie, la neige, les insectes, les oiseaux et même parfois les avions. Il faut donc filtrer ces cibles du signal désiré pour pouvoir estimer le vrai déplacement de l'air.

La mesure de la vitesse Doppler (radiale)  $V_r$  à une hauteur  $h$ , peut être calculée à partir de la relation :

$$\mathbf{V}_r = (\mathbf{U} \sin \beta + \mathbf{V} \cos \beta) \cos \alpha + \mathbf{V}_w \sin \alpha \quad (\text{IV.11})$$

Où :

- ✚  $V_h = U + V$  : est la vitesse horizontale du vent ;
- ✚  $h = V_w \sin \alpha$  : est l'hauteur ;
- ✚  $\beta$  : est l'angle d'azimute ;
- ✚  $\alpha$  : est l'angle d'élévation ;
- ✚  $V_w$  : est la vitesse terminale des particules de précipitation.

Pour un champ d'écoulement uniforme  $V_w \approx 0$  alors :

$$\mathbf{V}_r = (\mathbf{U} \sin \beta + \mathbf{V} \cos \beta) \cos \alpha \quad (\text{IV.12})$$

Nous pouvons trouver les deux inconnus (U, V) par le prélèvement de deux points différents dans le balayage comme montrée la figure au dessous :

$$\mathbf{V}_{r1} = (\mathbf{U} \sin \beta_1 + \mathbf{V} \cos \beta_1) \cos \alpha_1 \quad (\text{IV.13})$$

$$\mathbf{V}_{r2} = (\mathbf{U} \sin \beta_2 + \mathbf{V} \cos \beta_2) \cos \alpha_2 \quad (\text{IV.14})$$

Ainsi, deux évaluations de  $V_r$  à deux points différents autour du cône donneront U, V.

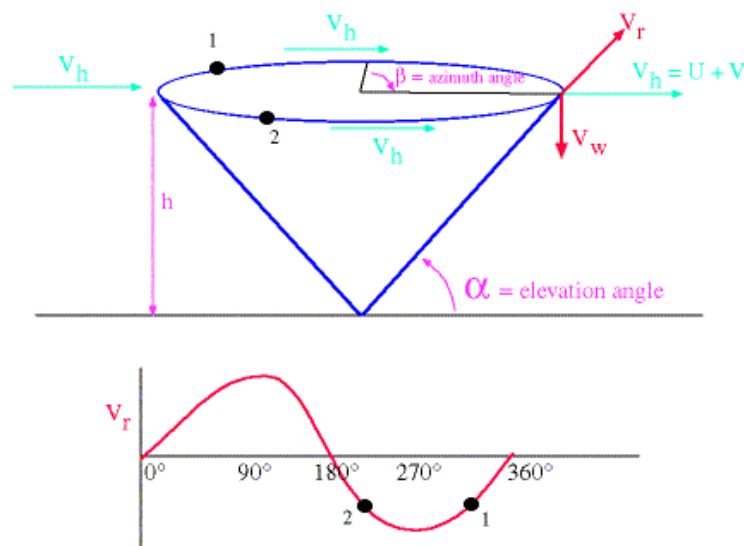


Figure IV.3: présentation d'un profileur du vent.

Pour mesurer le vent horizontal, le radar est dirigé dans deux directions orthogonales l'une de l'autre à un certain angle d'azimute. Par exemple, on analyse le changement Doppler des échos émis par le radar en direction nord à 30 degrés de la verticale et ensuite vers l'est pour trouver les composantes de la vitesse dans ces directions. Ensuite, on trouve la vitesse de l'air selon la verticale en pointant vers l'azimute.

### IV.3.3. Produits d'affichage

#### IV.3.3.1. Affichage de vitesse-azimut (Velocity Azimuth Display (VAD))

Le produit VAD est un produit d'affichage qui peut être demandé à partir de n'importe quel produit de vitesse et est généré et affiché sur demande. Ce produit utilise la méthode VVP pour générer une représentation graphique de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que de l'erreur quadratique moyenne du calcul en fonction de l'altitude.

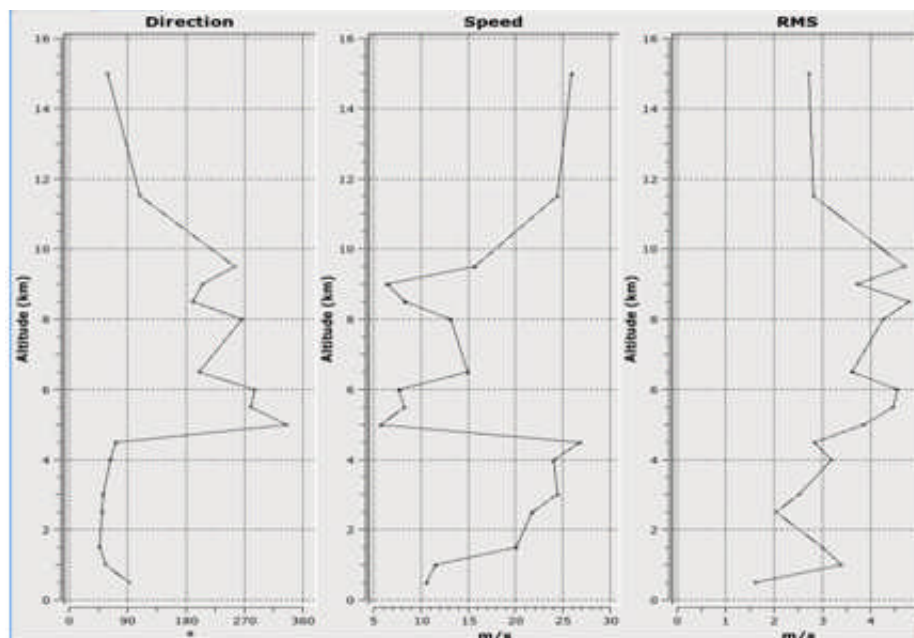


Figure IV.4 : Exemple d'affichage de produit VAD.

### IV.3.3.2. Traitement du cisaillement du vent

Divers produits de cisaillement du vent sont disponibles en tant que moments supplémentaires pour des produits standard ou en tant que produits autonomes. Le produit de cisaillement du vent radial (moment supplémentaire disponible sur PPI/RHI/CAPPI) produit une estimation du cisaillement du vent radial à chaque rayon. Le produit de cisaillement du vent azimutal produit une estimation du cisaillement du vent sur des lignes de rayonnement successives en azimut. Le cisaillement combiné ou tangentiel est estimé à partir de la somme des valeurs calculées pour le cisaillement radial et le cisaillement azimutal.

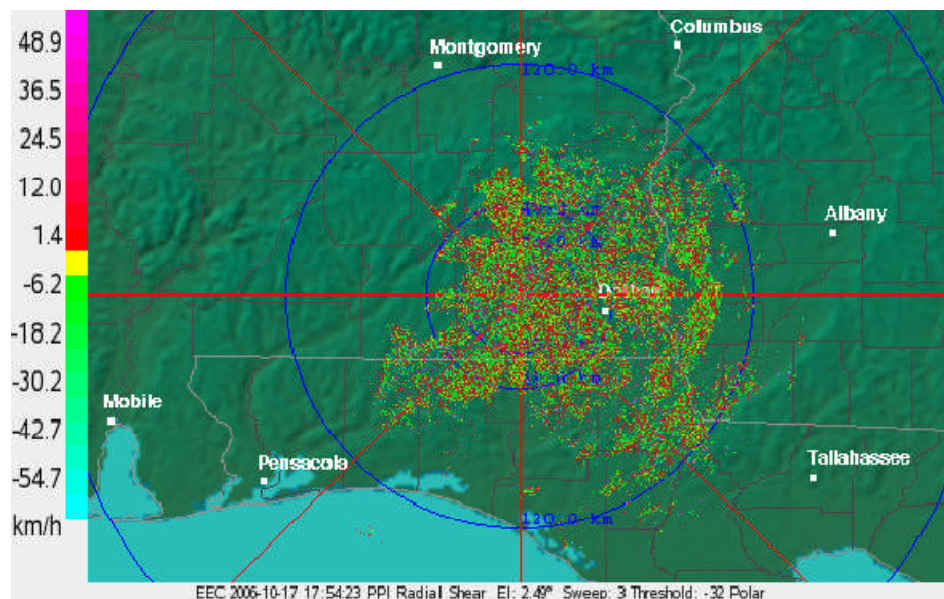
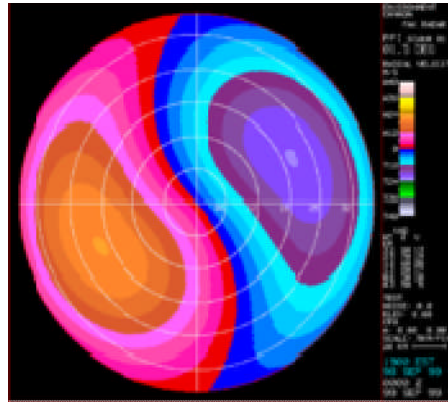


Figure IV.5 : Exemple d'affichage de produit de cisaillement radial.

#### IV.4.Exemple d'interprétions



**Figure IV.6 : Vent environnemental**

Exemple idéalisé de sortie Doppler. Les vents s'éloignant du radar ont une valeur de vitesse Doppler positive (Rouge et orange Figure (IV.6)). Ceux qui se dirigent vers le radar ont une valeur de la vitesse Doppler négative (Bleu). Lorsque la direction du vent est normale à la direction radiale du radar, la composante de la vitesse Doppler est nulle (Gris).

Le long de l'extrémité de l'écran, la vitesse Doppler est zéro quand le radar pointe vers le nord et vers le sud. Cela signifie que le vent souffle de l'ouest vers l'est ou de l'est vers l'ouest, ceci à la hauteur correspondant à l'extrémité de l'écran. Puisque les vitesses Doppler sont négatives le long de l'extrémité est de l'écran et positives le long de l'extrémité ouest alors le vent souffle manifestement de l'ouest vers l'est à la hauteur de l'extrémité de l'écran.

La vitesse du vent à une hauteur donnée par les valeurs de vitesses Doppler extrêmes autour d'un cercle de valeurs constant. Dans la Figure (IV.6), le flux maximum s'éloignant du radar et le flux maximum se dirigeant vers le radar indiquent que la vitesse du vent est constante du sol jusqu'à la hauteur correspondant à l'extrémité de l'écran. Alors le modèle de vitesse Doppler dans cette figure représente uniquement un profil de vent où la vitesse du vent est constante et la direction varie uniformément du sud à travers le sud-ouest vers l'ouest à l'extrémité de l'écran.

On a cependant négligé la vitesse de chute des gouttes mais elle est faible pour les angles d'élévation sous 3 degrés à l'intérieur de 150 km du radar ce qui sont le plus souvent les angles recherchés.

#### **IV.5. 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.

La première partie de ce chapitre a consacré au calcul de la réflectivité par ce que le radar météorologique ne calcule pas le taux de précipitations directement, mais il estime plutôt ce taux à partir de l'énergie réfléchié des particules de précipitations dans un volume élevé « la réflectivité »

La seconde partie, comporte des explications sur la mesure de vent et des interprétations de modèles de vitesses Doppler produites par des variations horizontales et verticales du vent.

## *Chapitre V : Simulation et génération des signaux radar météorologique Doppler*

### **V.1.Introduction**

Dans ce chapitre on s'intéressera dans un premier temps à la génération des signaux radar I et Q, par le biais d'un modèle développé Pr D. Zrnić en 1975. Ce modèle stipule que le phénomène du vent peut être modélisé par une loi Gaussienne.

Le signal reçu par l'antenne radar prétraité puis numérisé afin d'étudier son spectre et cela afin de déduire ces caractéristiques et extraire les informations utiles.

Le but de ce chapitre est de pouvoir utiliser un autre modèle autre que celui de la loi Gaussienne et de faire aussi des estimations des vitesses du vent et de ces étendues. Tout ce travail sera accompli sous l'environnement Matlab pour faire une simulation de spectre Doppler et les deux signaux I et Q, nous utilisons deux approches :

- Une approche fréquentielle utilisant l'estimation de la densité spectrale de puissance (l'algorithme de transformée de Fourier);
- Une approche temporelle utilisant la notion d'autocorrélations (l'algorithme pulse paire).

### **V.2. Estimation de spectre Doppler**

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 ;

#### **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.

### ✚ Les signaux I et Q

Le signal d'entrée d'un radar météorologique Doppler est décomposé en deux signaux et mixé avec une paire d'oscillateurs locaux avec une différence de phase de  $90^\circ$ . Ce qui signifie qu'on a réellement un seul signal et l'autre (Q) est identique au signal I mais seulement décalé de  $-\pi/2$ , Ceci implique deux signaux : le signal I en phase sous forme d'onde cosinus, le signal Q en quadrature de phase représenté par une onde sinusoïdale.

#### V.2.1. Estimation spectrale

Dans cette section on abordera l'estimation spectrale. Dans les problèmes pratiques on n'a accès qu'à un enregistrement d'une durée limitée, ce qui constitue une perte d'information, 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'autocorrélations qui sont les versions discrétisées de l'autocorrélation du spectre  $S(f)$  ne peuvent être qu'approximativement connus, ces conditions affectent la qualité du spectre et nous parlons d'estimation spectrale.

C'est une méthode classique 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 de Fourier (FFT).

La transformation de Fourier permet d'obtenir la densité spectrale de puissance, c'est-à-dire le contenu en fréquences du signal.

La densité spectrale de puissance est donnée par la transformée de Fourier de la fonction d'auto corrélation  $R_{ZZ}(\tau)$ , par :

$$S(f) = \{ R_{ZZ}(\tau) \} \quad (V.1)$$

La puissance totale de l'écho météorologique, sans prendre en compte la puissance du bruit est donnée par :

$$P_r = \int ( ) = \int ( ) \quad (V.2)$$

La vitesse moyenne est donnée par:

$$= - \int ( ) \quad (V.3)$$

La largeur spectrale de la vitesse moyenne du spectre Doppler est donnée par :

$$= - \int ( - ) ( ) \quad (V.4)$$

La relation entre la vitesse et la fréquence Doppler avec  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal émis est donnée par :

$$= - \quad (V.5)$$

La relation entre la largeur spectrale de la vitesse moyenne et la déviation standard du spectre Doppler est donnée par :

$$= - \quad (V.6)$$

Les météorologistes et radaristes définissent  $\sigma_v^2$  comme étant la variance à cause de son équivalence de calculs 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 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.

Dans les sections suivantes, nous présenterons les lois de distribution statistiques Gaussienne et Extreme-value. Ces deux lois vont modélisés les spectres Doppler des signaux radar météorologiques I et Q.

### V.2.1.1. Modélisation par la loi Gaussienne

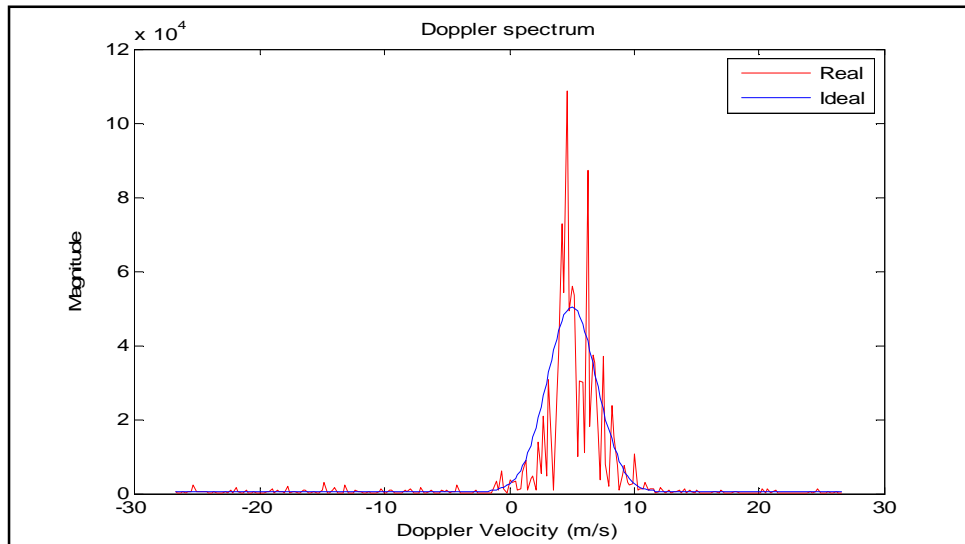
En probabilité, on dit qu'une variable aléatoire réelle  $X$  suit une loi Gaussienne, d'espérance  $\mu$  et d'écart type  $\sigma$  strictement positif (donc de variance  $\sigma^2$ ) si cette variable aléatoire réelle  $X$  admet pour densité de probabilité la fonction  $p(x)$  définie, pour tout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

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (V.7)$$

Pour 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 bleu de la figure (V.1), or le cas réel est tout autre à cause du bruit présent dans la nature. Pour cela nous sommes amenés à bruiteur notre spectre par un bruit blanc, le signal bruité est donnée par le spectre en rouge de la figure (V.1). Notons que ces opérations ont lieu dans le domaine fréquentiel.

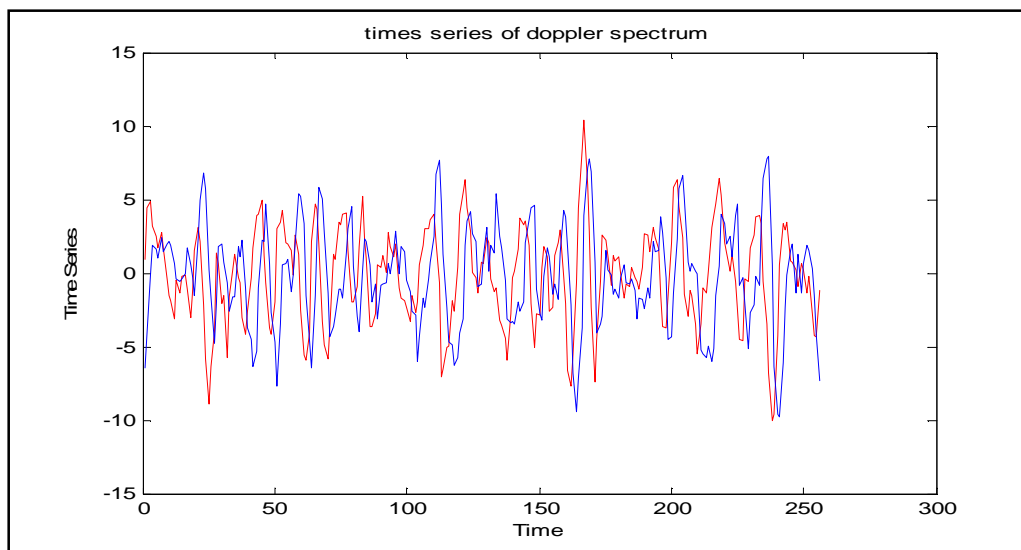
On donne également les caractéristiques de radar WSR-88D utilisées pour la simulation :

- $f_i = 5.6 \cdot 10^9$  Hz (fréquence du signal émis)
- $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f_i$  m (longueurs d'onde du signal émis)
- $T_s = 1/2000$  s (période d'échantillonnage PRF)
- SNR = 10 dB (Rapport signal sur bruit)
- $n_{data} = 256$  (Nombre de points (échantillons))
- $V_r = 5$  ms<sup>-1</sup> (vitesse radiale de l'écho)
- $V_a = \lambda/4 T_s = 26.78$  ms<sup>-1</sup> (Vitesse ambiguë)
- $\text{Sig} = 1$  ms<sup>-1</sup> (largeur du spectre Doppler)
- $p_p = 250 \cdot 10^3$  Watt (puissance du signal émis)



**Figure V.1 : Simulation d'un spectre Doppler (modélisation Gaussienne)**

On note aussi que ces opérations ont lieu dans le domaine fréquentiel, d'où le passage vers le domaine temporel qui exige l'application de la transformée de Fourier inverse donnant naissance aux séries temporelles I et Q illustrées dans la figure (V.2).



**Figure V.2 : Simulation des séquences I et Q (modélisation Gaussienne), série de temps générés par le modèle de Zrnić [1975].**

#### V.2.1.2. Modélisation par la loi Extreme-value

La loi d'Extreme-value a été développée pour l'estimation de probabilités d'occurrences d'évènements rares. Elle permet d'extrapoler le comportement de la queue de distribution des données à partir des plus grandes données observées. Cette loi a été utilisée

dans plusieurs applications faisant appel aux séries de temps, en télécommunication, dans les cracks boursiers et en météorologie, elle est donnée par :

$$\text{si } \tau \neq 0, \quad ( ) = (-( + ) ) \quad (\text{V.8})$$

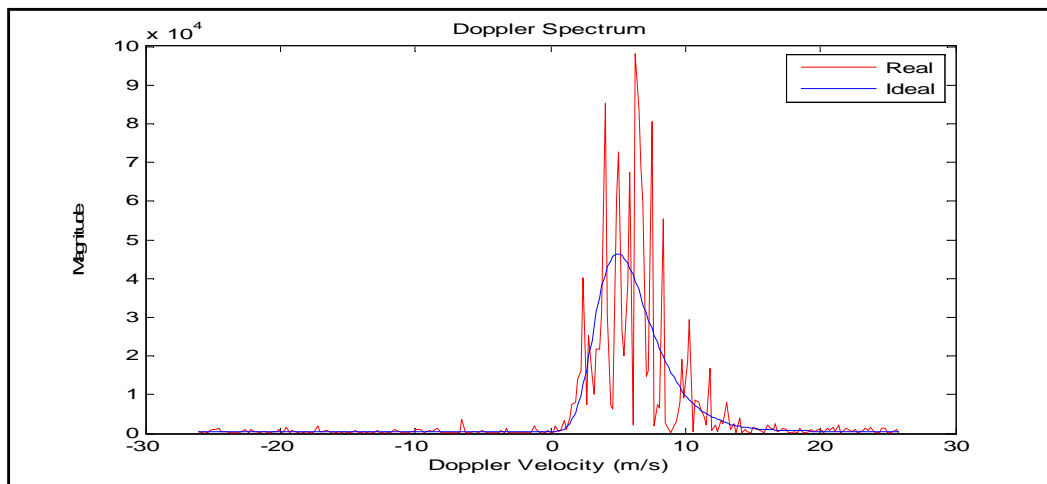
$$\text{si } \tau = 0, \quad ( ) = (- (- )) \quad (\text{V.9})$$

où  $H$  est la fonction de répartition de la loi des valeurs extrêmes :

On dit alors que la fonction de répartition  $H$  est dans le domaine d'attraction de Fréchet, de Gumbel ou de Weibull selon que  $> 0$ ,  $= 0$   $< 0$ .

Pour notre étude nous utilisons la fonction de répartition  $H$  dans le domaine d'attraction de Gumbel où  $\tau=0$ .

D'après la figure (V.3), nous constatons deux spectres, le spectre en bleu qui représente le cas parfait où le signal est pur, or le spectre en rouge représente le cas naturel où le signal est bruité par bruit gaussien blanc représentant les échos fixes et d'autres sources de bruit.



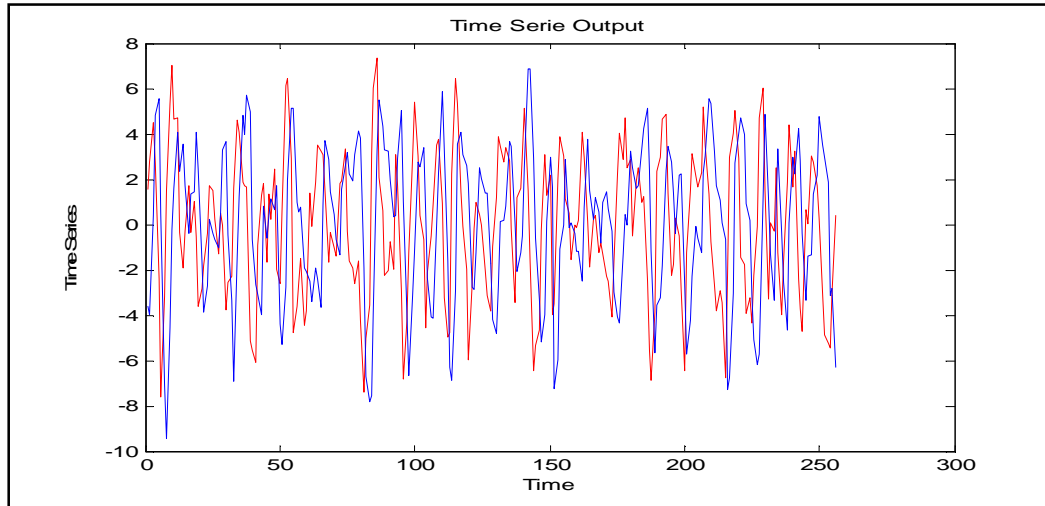
**Figure V.3 :Simulation d'un spectre Doppler (modélisation Extreme-value)**

On peut remarquer un changement par rapport à la figure précédente (Figure V.2), qu'en effet le spectre du coté gauche est vraiment extrême car il a une montée rapide, par contre du coté droit il y a une lenteur dans la descente.

Ces deux caractéristiques ont fait l'objet de plusieurs travaux de scientifiques. La rapidité de montée peut s'avérer adéquate pour éviter les imperfections spectrales (appelées en anglais les pikes) ou encore discontinuités spectrales.

De même on procédé comme dans la section précédente, par la génération des séries de temps I et Q qui sont illustrées dans la figure (V.4 ).

Notons également que la génération de ces signaux en phase I et en quadrature de phase Q a été faite par la transformée de Fourier inverse.



**Figure V.4 : Simulation des séquences I et Q (modélisation Extreme-value)**

### V.2.1.3. La comparaison entre les deux estimations

On peut voir cette comparaison sur la figure (V.5). Cette figure présente la comparaison des spectres des deux modélisations Gaussienne et Extreme-value, tel que le spectre rouge représente le spectre Gaussien, et le spectre en bleu représente le spectre modélisé par la distribution Extrême value.

On remarque sur cette figure, que le spectre Gaussien est lent en montée plus que le spectre modélisé par la distribution Extrême value qui est assez raide et rapide en montée. Ce qui permet à la distribution Extreme-value d'être adéquate aux phénomènes sévères (on peut détecter et estimer les phénomènes qui surviennent brusquement (les tornades, les averses de pluie, ou encore le cisaillement de vent appelé aussi windshear).

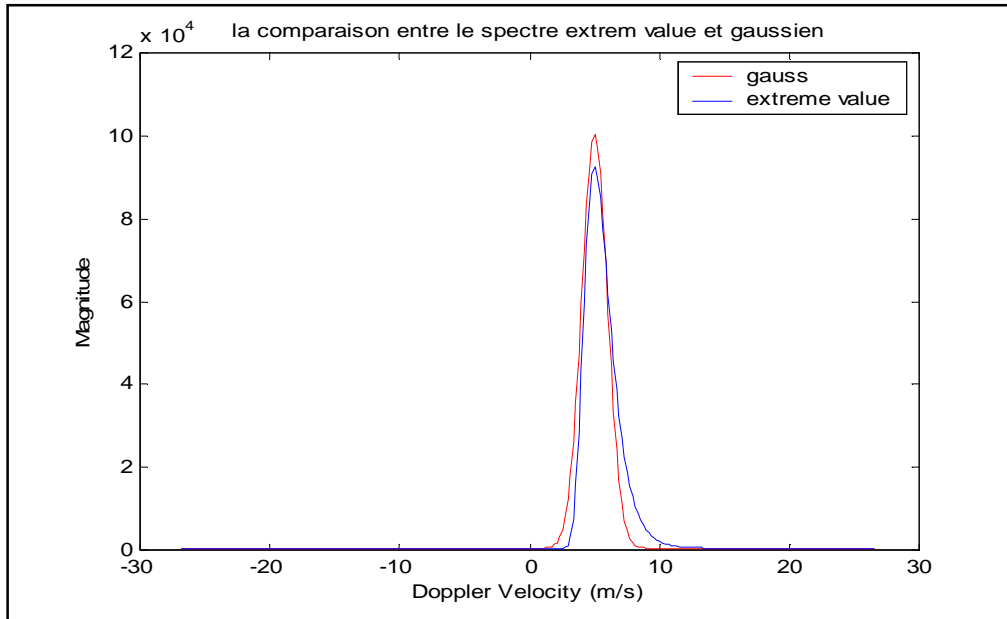


Figure V.5 : La comparaison entre les deux spectres Gaussien et Extreme-value

### V.2.2. Commentaires sur l'estimation spectrale

Dans ce paragraphe nous exposons, les différents estimateurs spectraux utilisés dans la théorie du radar météorologique à effet Doppler. L'estimateur le plus utilisé dans le domaine des fréquences est celui de Fourier. Il se base sur la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation des signaux radar complexes  $Z(I,Q)$ .

L'avantage de travailler dans le domaine (espace) des fréquences est celui de la facilité d'interprétation des résultats obtenus, car on a l'étendue spectrale et les composantes principales reflétant les perturbations météorologiques.

D'autres estimateurs comme celui du processus autorégressif AR, ou encore à moyenne mobile ARMA.

Ces estimateurs sont souvent utilisés dans le domaine de la recherche en traitement du signal pour caractériser les perturbations météorologiques détectés par les radars météorologiques. Ces différents estimateurs déjà précités sont lent comparativement à l'algorithme temporel pulse-pair.

**V.2.2. Estimation temporelle**

L'estimateur temporelle d'un spectre Doppler est réalisé par plusieurs méthodes la méthode que nous utilisons est la méthode pulse pair 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  $Z(kTs)$ .

Unermithe et Groginsky (1972) étaient les premiers à avoir utilisé cette technique sur des processeurs de signaux et sur des radars météorologiques.

Si les signaux considérés sont statistiquement indépendants, alors la fonction d'autocorrélation peut s'écrire :

$$R_z(\tau) = -\sum_{k=0}^{M-1-\tau} Z^*(kTs) Z((k+\tau)Ts) \quad (V.10)$$

Avec :

$$Z(kTs) = I(kTs) + jQ(kTs) \quad (V.11)$$

Où

- $M$  : est le nombre d'impulsions
- $T_s$  : est le temps entre impulsions.

La puissance totale de l'écho est estimé par :

$$P_z = -\sum_{k=0}^{M-1} |Z(kTs)|^2 - N \quad (V.12)$$

où

- $N$  : est la puissance du bruit blanc présent dans les échos radar I & Q.

La vitesse moyenne du vent et de sa variance sont donnée par:

$$\bar{v} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} [I^2(kTs) - Q^2(kTs)] \quad (V.13)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{I^2(kTs) + Q^2(kTs)}{2} \quad (V.14)$$

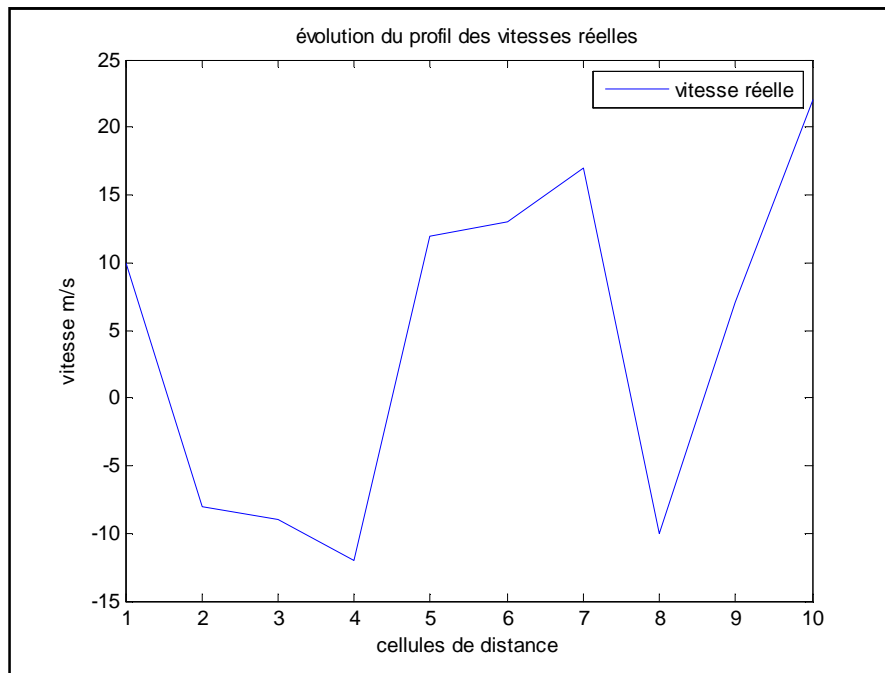
La largeur spectrale  $W_v$  de la vitesse moyenne du vent est obtenue directement par la racine carrée de la variance :

$$W_v = \sqrt{\sigma_v^2} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{I^2(kTs) + Q^2(kTs)}{2}} \quad (V.15)$$



### V.2.2. 1. Modélisation par la loi Gaussienne

Nous donnons dans la figure (V.6) 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.



**Figure V.6 : l'évolution du profil des vitesses réelles**

Les deux figures (V.7) et (V.8) représentent successivement l'estimation de la vitesse moyenne du vent et l'évolution de la son profil de largeur spectrale, par la méthode pulse-pair. A première vue, nous remarquons que ces estimations suivent et ont le même profil que les vitesses réelles.

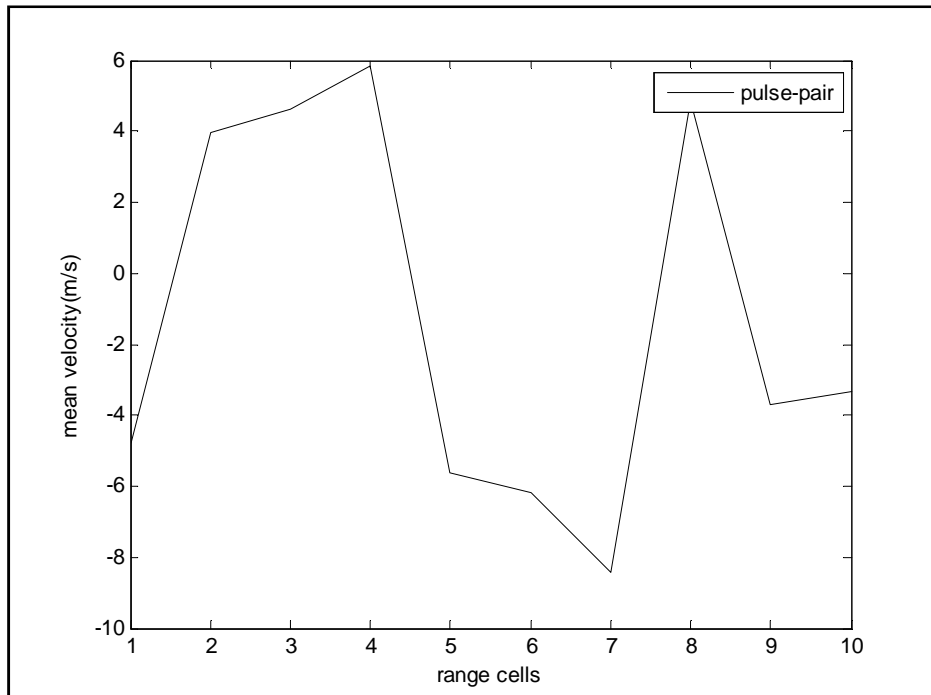


Figure V.7 : Estimation de vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair (Modèle Gaussien).

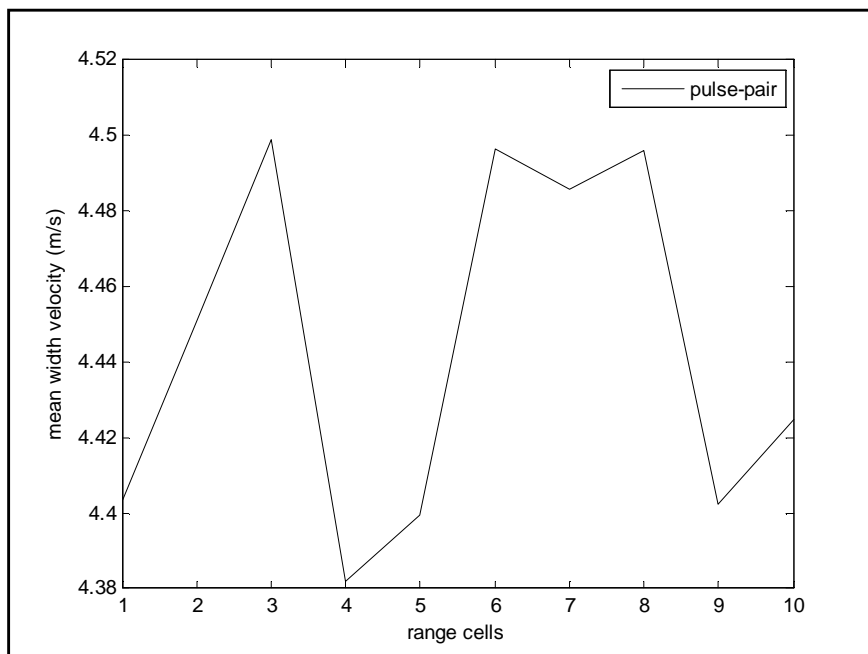
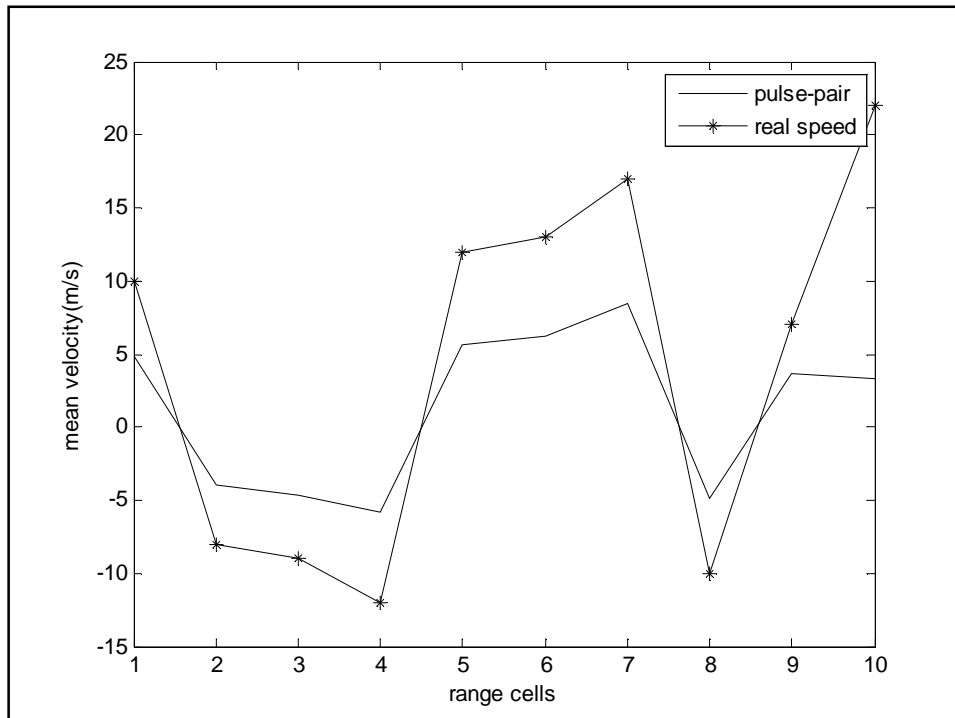


Figure V.8 : Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair.

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 cet estimateur est très rapide. 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 V.9, 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 V.9 : Comparaison de l'estimation de la vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair et la vitesse réelle.**

### V.2.2. 2.Modélisation par la loi Extreme-value

Dans cette section, on se propose de refaire le même travail et la même manière de procéder que celle déjà adoptée pour le modèle gaussien, voir les figures (V.6, V.7, V.8 et V.9). En d'autres termes, on a généré 10 cellules de distances avec les mêmes données concernant les vitesses de vents estimés, en utilisant le modèle Extrême-value, dans le but de bien modéliser et de rapprocher des phénomènes extrêmes.

Sur les figure V.10 et V.11, on a reporté les résultats des simulations des estimations des moments centraux d'ordre 1 et deux des perturbations du vent. On remarque que les estimations sont très ressemblantes à celle effectuées avec le modèle Gaussien lors de la dernière section.

L'intérêt d'avoir utilisé la distribution Extreme-value est celui, de modéliser les phénomènes extrêmes appelés aussi phénomènes météorologiques sévères.

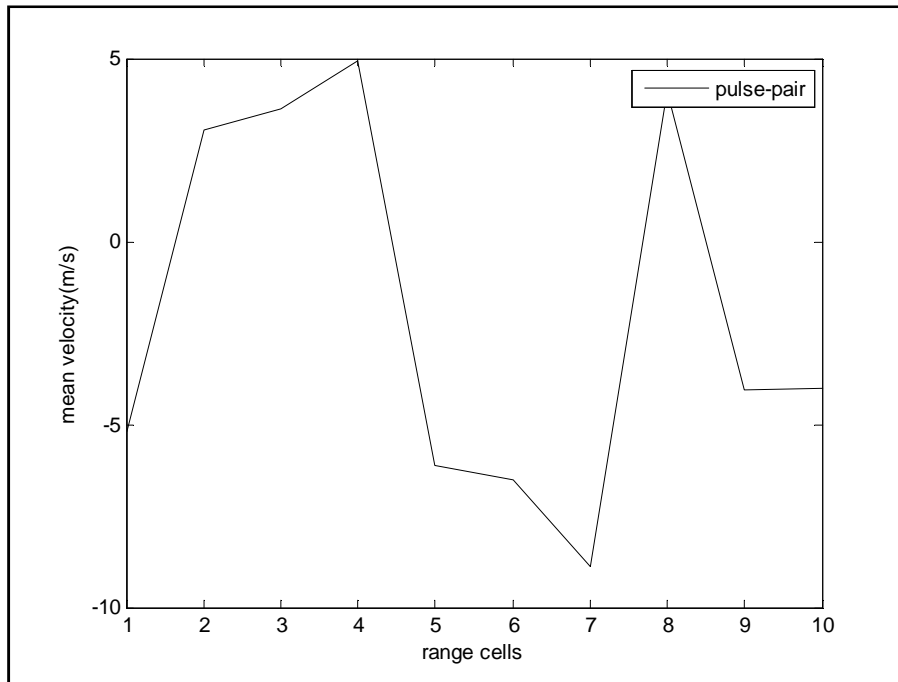


Figure V.10 : Estimation de vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair (Modèle Exreme-value).

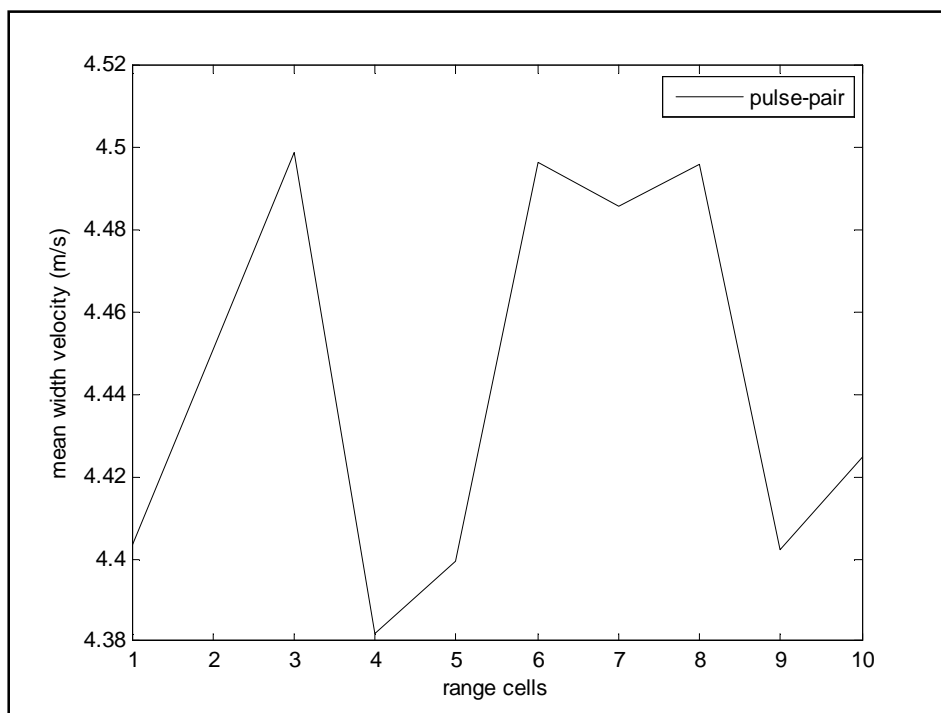
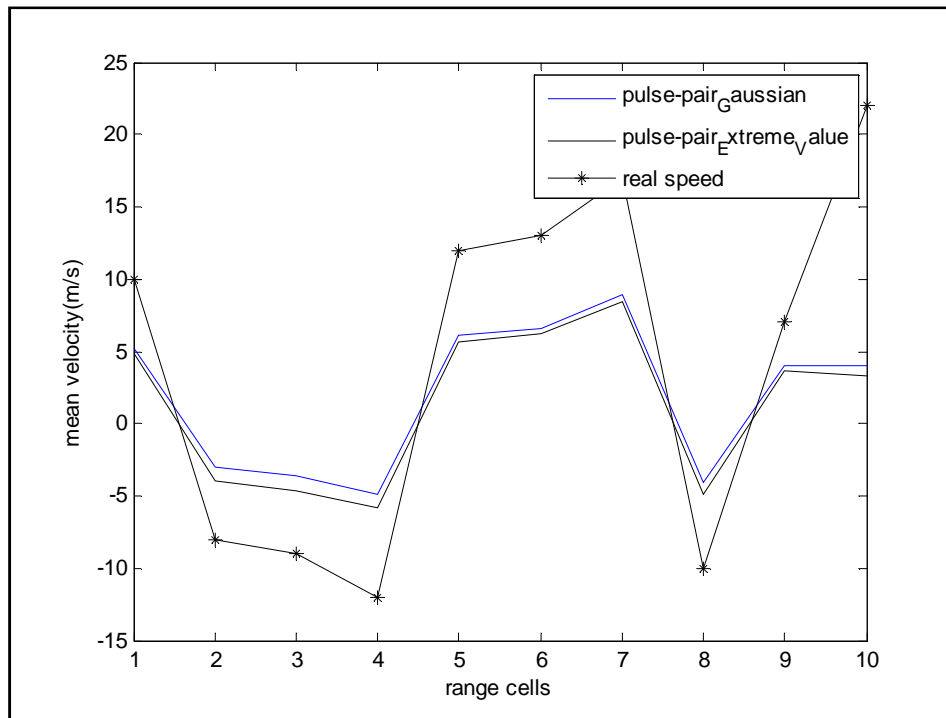


Figure V.11 : Estimation de la largeur spectrale de la vitesse moyenne du vent par la méthode pulse-pair (Modèle Exreme-value)



**Figure V.12 : Comparaison entre les vitesses moyennes estimées des modèles Gaussien et Extreme-value**

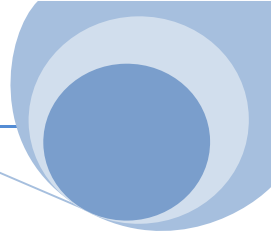
Selon la figure (V.12), on remarque que l'estimation produite par la modélisation Gaussienne pour le calcul de la vitesse moyenne est presque similaire à celle fournie par la modélisation Extreme-value. Les résultats ne divergent pas et les valeurs estimées oscillent autour de la vitesse radiale réelle.

#### **V.4. Conclusion**

A travers ce chapitre, on a pu vérifier l'extraction des moments caractérisent l'écho atmosphérique, nous avons utilisé des techniques de projection ont été proposées et testées sur des données réelles de radar un radar pulse Doppler WSR-88D avec des estimations robustes du spectre du signal rétrodiffusé tels que l'estimation temporelle et spectrale.

Pour l'estimation temporelle nous avons utilisé la méthode de Fourier qui est jusque là, le meilleur outil utilisé pour des signaux périodiques ou quasi périodiques, mais cette méthode présente des incontinents de résolution et d'exigence de fenêtrage, toutes ces raisons ont amené les concepteurs du radar Doppler à l'équiper d'un calculateur basé sur la méthode pulse paire.

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.



## **Conclusion générale**

Notre travail du mémoire de fin d'étude consiste dans l'étude d'un nouveau type de radar météorologique qui est en l'occurrence, le radar météorologique à effet Doppler. Ce radar utilise l'effet Doppler pour détecter les cibles météorologiques, leurs vitesses de déplacement, leurs directions et leurs étendues, ces mesures doivent être précises, fiables et disponibles pour prévoir l'arrivée des précipitations sur un site et surtout les fortes précipitations afin d'éviter les catastrophes et améliorer la sécurité aérienne.

Nous avons débuté notre recherche par une étude globale de radar météorologique afin d'ouvrir la voie au deuxième chapitre qui traite un type de radar météorologique est le radar météorologique Doppler, ce radar joue un rôle très important dans notre vie quotidienne et surtout dans le trafic aérienne.

Le troisième chapitre comporte un exemple sur un radar météo doppler est le DWSR-2501C qui est installé récemment à Alger, ses différents composants, le rôle de chaque composants et la façon de extraction du signal utile qui est utilisé pour calculer des différents données comme l'estimation de taux de précipitation, la réflectivité et la mesure de vitesse de vent. ce dernier point, est notre premier objectif dans le chapitre quatre et cinq.

La suite de notre recherche consiste en une approche pratique par l'utilisation de logicielle Matlab en faisant une simulation du spectre Doppler par deux méthodes; une méthode temporelle basée sur l'autocorrélation du signal reçu, et une méthode spectrale basée sur l'estimation de la densité spectrale de puissance de Fourier.



# Bibliographie

---

## *Les documents de l'ONM:*

- ✚ Catalogue du radar météorologique DWSR-250 C1.
- ✚ EDGE 5 Manual Enterprise Doppler Graphics Environment.
- ✚ EDGE Factory Acceptance Test.

## *Les theses:*

- ✚ Simulation des échos et calcul de réflectivité pour un radar météorologique
  - Les étudiants: LEBAL Naima / HAREDJ Lynda.
  - Le promoteur: M<sup>r</sup> LAGHA Mohand.
  - Promotion : 2008/2009.

## *Les ouvrages :*

- ✚ PAUL L. SMITH, KENNETH R.HARDY “Application of Radar to Meteorological Operations and Research”.
- ✚ K. BHATNAGAR, P. RAJECH RAO, S. KALYANASUNDARAM, S. B. THAMPI, R. SURESH AND J. P. GUPTA: “Doppler radar -A detecting tool and measuring instrument in meteorology”.
- ✚ “Doppler Radar Meteorological Observations, Part B: Doppler Radar Theory and Meteorology”. FCM-H11B-2005, U.S. Department of defense, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- ✚ MICHAEL FOWLER: “The Doppler Effect”. Weather radar basics/CoCoRaHS Weather Radar Theory and Practice/ Phased Array Radar: Time-Series and Power/ Palmer Weather Radar Theory and Practice/ Reflectivity Factor and Statistical Properties of Weather Radar Data/ Palmer. 06 mars 2008.

- ✚ PR.V. N. BRINGI , PR. V. CHANDRASEKAR POLARIMETRIC : “Doppler weather radar: principles and applications. Cambridge University Press, 2004
- ✚ MERRILL I. SKOLNIK , MCGRAW-HILL: “ Radar Handbook”, second edition, 1990.
- ✚ ANDRES QUINQUIS : « Traitement du signal sous Matlab », Hermès, Paris, 2000.

***Les sites :***

- ✚ [http://www.Wikipedia.com/ Météorologie aéronautique.](http://www.Wikipedia.com/ Météorologie aéronautique)
- ✚ [http://www.Wikipedia.com/ NEXRAD.](http://www.Wikipedia.com/ NEXRAD)
- ✚ [http://www.Wikipedia.com/ Radar météorologique.](http://www.Wikipedia.com/ Radar météorologique)