

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad DAHLAB de Blida

Faculté de Technologie

Département d'Aéronautique

Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du Diplôme Master Académique en Aéronautique

Option: CNS/ATM

Communication Navigation Surveillance/Air Traffic Management

THEME

***Calcul De la Réflectivité D'un radar Météorologique à
Effet Doppler Par Les Méthodes d'Estimation
Classique***

Réalisé par:

FECHIT Assia

LOUKIT Imane

Encadré et dirigé par:

Promoteur: Dr. Mhand LAGHA

Co promoteur: Mr.Amar ZABOT

Membres du jury:

L. BOUNATIRO

Maitre de conférences USDB

Président

H. BENCHOUBENE

Maitre de conférences USDB

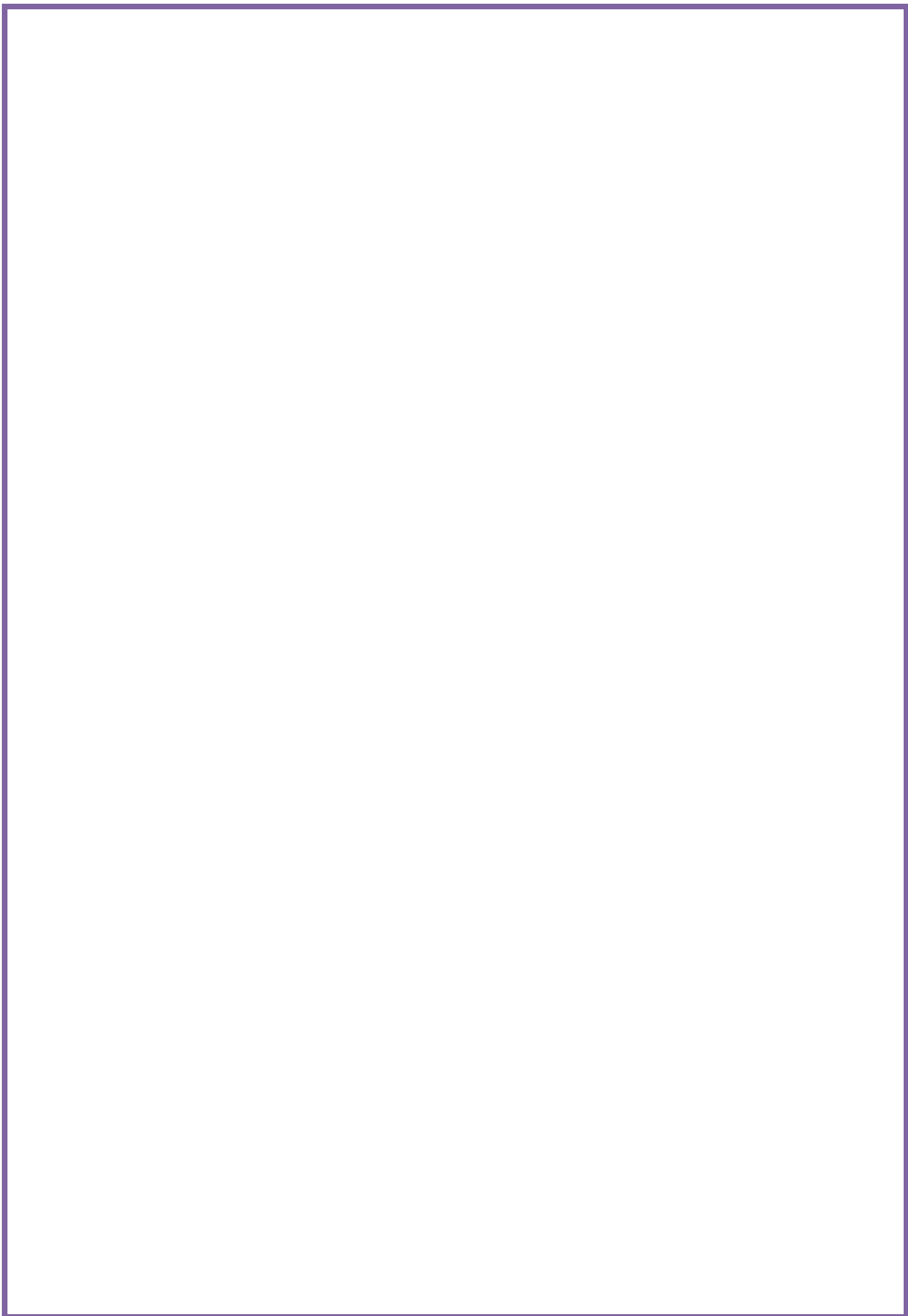
Examineur

F. OTMANE

Chargée de cours USDB

Expert

2011-2012



Remerciements



Ce projet a été réalisé en vue de l'obtention du diplôme du MASTER en Aéronautique option « CNS /ATM», au sein du département Aéronautique de Blida.

Nous tenons à remercier en premier lieu « ALLAH » tout puissant de nous avoir donné la chance et le courage et la volonté pour terminer notre projet de fin d'études et de nous avoir attribué la faveur de réussir nos études.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciement à notre Co promoteur Mr.ZABOT AMAR de la diligence dont il a fait preuve durant toute la préparation de notre mémoire consacrant et nous le remercie pour ses précieux conseils.

Nous remercions également, notre promoteur Mr.LAGHA MHAND pour son aide, pour son soutien et ses encouragements.

Nos sincères remerciements s'adressent aux membres de jurys pour avoir apporté leur appréciation à notre travail et tout l'honneur pour nous.

Mr.L .BOUNATIROU « Professeur USDB »

Mr .H .BENCHOUBANE « Professeur USDB »

Nous remercions Mr. BOUHALI ABDELHAK pour son assistance particulière.

Nous remercions également les enseignants de la promotion CNS /ATM 2012 pour leur constant suivi et leur précieux conseils sans oublier le staff administratif et pédagogique du département de l'aéronautique.

Nous tenons à remercier également Mr. BENAÏSSA RACHID pour ses orientations et ses précieux conseils.

Enfin il nous est agréable de remercier chaleureusement tous les membres de nos familles surtout nos parents pour leurs sacrifices, leurs affections et leur compréhension.

ALHAMDOLILLAH

IMANE

ASSIA



Dédicaces



Je tiens à remercier en premier lieu, DIEU le tout puissant de m'avoir donné l'esprit et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mes tendres parents: eux qui par leur présence et soutiens ont rendu chaque moment de ma vie un véritable bonheur.

Pour l'éducation qu'ils m'ont inculqué ainsi que les vrai valeurs de la vie.

Pour leurs soutiens moraux et matériels dont j'ai bénéficié.

Pour les encouragements qui m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout,

Pour le dévouement qu'ils m'ont insufflé.

Pour tous les sacrifices, et l'amour dont ils m'ont nourrie, leur confiance, et consolation quand j'avais le plus besoin,

Je vous dis mille merci, en sachant que quoi que je fasse je ne vous remercierai jamais assez.

A mon adorable et unique sœur Issma sans oublier ses trois enfants Sid Ali Boutheyna et le ptit Aymen.

A mes très chers frères Hicham, Mohamed, Ayoub et Toufik, que Dieu les protèges.

A ma belle-sœur Imane.

A tous mes cousins et cousines, toutes ma famille sans exception

A mes chères amies : Sabrina, Sarah, Nessrin.

A mon binôme Imane que je le souhaite une bonne réussite.

A mes deuxièmes frères qui j'ai trouvé donne la section « CNS /ATM » promet 2012 surtout Najib , Salah et Hamza, à ma sœur Nassima, je vous dis merci pour les bons moments et les bons souvenir qu'on a passé ensemble je le souhaite une bonne réussite aussi.

A tous ceux qui m'aime de près ou de loin et surtout ceux qui m'ont toujours soutenue dans ma vie et qui m'ont aidé dans ce travail

Merci à tous...

Je vous aime

FECHIT ASSIA

DEDICACE

Je souhaite dédier ce modeste travail, synonyme de concrétisation de tous mes efforts fournis ces dernières années d'études

A :

*-La Lumière de ma vie, source de tendresse
ma raison de vivre
la plus belle des roses à toi MAMA*

« Saliha »

*-symbole de sacrifice et de courage
qui m'a appris toutes les bonnes valeurs
à toi le plus beaux papa du monde*

« Mohamed »

*-mon âme à ma très chère et merveilleuse sœur qui j'aime trop fort
« WISSEM »*

*-A ceux qui m'encouragent à donner le meilleur en moi
mes frères*

DJALLAL DJABER

*-Mon beaux frère qui je respecte beaucoup
-la fiancé de mon frère « future belle-sœur »*

BIBA

A Mon petit BICHOU

Mes meilleurs amis :Nassima, Salah Eddine, Nadjib

Hamza ,Mustapha et Amine ,Djamel Eddine ,Nasro et Ramzy.

A ma merveilleuse ami et binôme ASSIA

*A tous les enseignants du
département de l'aéronautique*

*A tous mes Amis et mes collègues
de la promotion CNS/ATM 2012*

LOUKIT IMANE

ملخص:

هذه المذكرة مخصصة لتقدير الحظاظ الطيف الإحصائية لرادار بالخصوص السرعة المتوسطة و تغيرات الاستطاعة, وكذلك تقدير معدل الجسيمات المناخية من خلال الطاقة المنعكسة و حجم مرتفع "الانعكاسية".

تتم هذه التقدرات عن طريق المناهج الكلاسيكية : زوجية النبض "Pulse Pair", فورييه "Fourier" و سيتم مقارنة النتائج المحصل عليها فيما بينها .

Abstract:

This memory is designed to deal with the estimation of spectral moments such as the average speed, the width of the spectrum and the variance and the estimation of precipitation rate from the energy pondered particle precipitation in the high volume "reflectivity".

This estimate will be done by conventional methods: **Pulse Pair** (domain temporally) **Fourier** (frequency domain), and the results will be compared with each other.

Résumé:

Ce mémoire est conçu à traiter l'estimation des moments spectraux tels que la vitesse moyenne, la largeur du spectre et la variance ainsi que l'estimation de taux de précipitations à partir de l'énergie réfléchi des particules de précipitations dans un volume élevé « la réflectivité ».

Cette estimation se fera par des méthodes classiques : pulse pair (domaine temporelle) Fourier (domaine fréquentielle); les résultats obtenus seront comparés entre eux.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
DÉDICACES	iv
SOMMAIRE	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	ix
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	xii
CHAPITRE I : LE RADAR METEOROLOGIQUE DOPPLER	
I.1 INTRODUCTION	1
I.2 HISTORIQUE DES SYSTEMES	1
I.3 LA METEOROLOGIE	3
I.3.1 Les cibles	3
I.3.1.1 Les cibles météorologiques	3
I.3.1.2 Les cibles non météorologiques	8
I.4 LE RADAR METEOROLOGIQUE DOPPLER	9
I.4.1 Définition	9
I.4.2 L'effet Doppler	10
I.4.3 Les fréquence Radar	11
I.4.4 Le principe de fonctionnement d'un Radar météorologique	12
I.4.5 Fréquence Radar	13
I.4.6 Décalage en phase	14
I.4.7 Vitesse ambiguë	15
I.4.8 Dilemme Doppler	15
I.4.9 Les composantes d'un Radar météorologique	16
I.4.10 Types de Radar météorologique	18
I.4.11 Affichage d'un Radar météorologique	20
I.5 CONCLUSION	21
CHAPITRE II : Estimation des paramètres les méthodes classiques	
II.1 Introduction	22
II.2 Méthode temporelle (Pulse Pair)	22

II.2.1 Description général du processus pulse pair	22
II.2.2 Développement de l'algorithme Pulse-Pair	23
II.3 Méthode de Fourier	27
II.3.1 description général de la méthode de Fourier	27
II.3.2 Développement de l'algorithme Fourier	28
II.4 Méthode autorégressif (AR).....	30
II.5 Méthode autorégressif à moyenne mobile.	32
II.6 Conclusion	33
CHAPITRE III : Réflectivité et taux de précipitation, vitesse Doppler	
III.1 Introduction	34
III.2 Réflectivité.....	34
III.2.1 La bande brillante	36
III.2.2 Les produits de réflectivité	37
III.2.3 Réflectivité et précipitations	40
III.3 Taux de précipitation	42
III.3.1 Distribution de goutte de pluie	42
III.3.1.1 la mesure de distribution de goutte de pluie.....	43
III.4 La relation entre le facteur de et le taux de précipitation	45
III.4.1 Relations courantes	47
III.4.2 Echelle R versus intensités des précipitations	47
III.5 Vitesse radiale Doppler	48
III.5.1 la mesure de vitesse du vent par le Radar météorologique ...	50
III.6 Conclusion	52
CHAPITRE IV : Simulation des données radar et l'estimation de réflectivité	
IV.1 Introduction	53
IV.2 Etude et simulation de l'acquisition des signaux radar $z(k, t, s)$...	53
IV.3 Estimation de spectre doppler	55
IV.4 Estimation des moments spectraux	56
IV.5 Modélisation gaussienne des échos radar	57
IV.6 Génération des données de simulation	58
IV.7 Routine de génération des données radar	60
IV.7.1 Résultats de simulation	62
IV.8 Effets des paramètres d'entrée	63
IV.9 Estimation temporelle (pulse pair)	69
IV.9.1 Résultats de simulation	71
IV.9.2 Interprétation	72

IV.10 Estimation spectrale (Fourier)	72
IV.10.1 Résultats de simulation	74
IV.10.2 Interprétation	75
IV.11 Comparaison entre la méthode pulse pair et la méthode Fourier ..	75
IV.11.1 Résultats de simulation	76
IV.11.2 Interprétation	78
IV.12 Estimation de la réflectivité par les deux méthodes classique Fourier et pulse pair	78
IV.12.1 Estimation de la réflectivité par la méthode pulse pair	78
IV.12.2 Interprétation	79
IV.12.3 Estimation de la réflectivité par la méthode Fourier	79
IV.12.4 Interprétation	79
IV.13 Estimation de taux de précipitation par les deux méthodes classique Fourier et pulse pair	80
CONCLUSION GÉNÉRALE	78
BIBLIOGRAPHIE	81
ANNEXES	85

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Ac: Altocumulus.
As: Altostratus.
AR: Auto Regressive.
ARMA: Auto Regressive Moving Average.
AP: Anomalous Propagation.
CAPPI: constante altitude planned position indicator.
Cb: Cumulonimbus.
Cc: Cirrocumulus.
Ci: Cirrus.
Cs: Cirrostratus.
Cu: Cumulus.
COHO: Coherent Oscillator.
D: Diameter of particle.
dB: Decibel.
dBZ: Logarithmic Scale for Measuring Radar Reflectivity Factor.
DFT: Discrete Fourier Transform.
DSP: Densité Spectrale de Puissance.
FFT: Fast Fourier Transform.
FI: Fréquence Intermédiaire.
Hz: Hertz.
I: In-phase.
Ns: Nimbostratus.
NSSL: National Severe Storms Laboratory
PB: Passe Bas.
PP: Pulse Pair.
PPI: Plan Position Indicator.
PRF: Pulse Repetition Frequency.
Q: Quadrature de phase
RF : radio Frequency.
Sc: Stratocumulus.
SER: Surface Equivalente Radar.
St: Stratus.
SNR: Signal to Noise Ratio.
STFT: Short Time Fourier Transform.
TCL: Théorème Central Limite.
TF: Transformée de Fourier.
TFD: Transformée de Fourier Discrète.
Vr : Vitesse Radial.
VCP: Volume Coverage Pattern.
WSR-88D: Weather Surveillance Radar-1988, Doppler.
Z: Reflectivity.

LISTE DES FIGURES

Figurier I.1 : Le radar météorologique	3
Figurier I.2 : Les groupes des nuages	5
Figure I.3: La turbulence	7
Figure I.4: Les cibles non météorologiques	8
Figure I.5: Animation de l'effet Doppler- Fizeau	11
Figure I.6: Schéma synoptique d'un radar météorologique	13
Figure I.7 : Diagramme d'émission d'une antenne en coordonnées polaires	17
Figure I.8 : Bruit blanc et un signal dépassant	18
Figure I.9: Profileur de vents	19
Figure I.10 : Radar mobile	19
Figure I.11 : Radar embarqué	20
Figure I.12 : Affichage d'un radar aéroporté	20
Figure I.13 : Affichage de CAPPI	21
Figure II.1 : Principe de prédiction AR	30
Figure III.1 : La bande brillante	36
Figure III.2 : Le produit de réflectivité (R)	38
Figure III.3: Comparaison graphique de l'intensité des échos radar selon la précipitation	41
Figure III.4: Comparaison de la réflectivité entre les divers types de précipitations	42
Figure III.5 : Distribution de gouttes: Nombre par mètre cube versus leur diamètre (D)	44
Figure III.6 : Légende de couleur sur un radar météorologique avec dBZ et mm/h pour de la pluie	46
Figure III.7: Explication de la vitesse radiale	49
Figure III.8 : Affichage de vitesse Doppler pour un Radar météorologique	50
Figure. III.9.a .Représentation vectorielle de deux échantillons complexes Consécutifs (I, Q)	51
Figure III.9.b : Résultats de la multiplication complexe	51
Figure IV .1 : La chaîne d'acquisition du signal d'un Radar pulse Doppler Météorologique terrestre de type TDWR	53

Figure IV.2 : Le signal émis par le Radar puise Doppler météorologique	54
Figure IV.3 : Spectre Doppler reçu pour une cellule de distance	56
Figure IV.4 : Simulation d'un spectre pur et d'un autre bruité (Modélisation gaussienne)	62
Figure IV.5 : Simulation des séquences I et Q (modélisation gaussienne)	62
Figure IV.6.a : Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (SNR=1dB)	63
Figure IV.6.b : Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (SNR=12dB)	64
Figure IV.7.a : Effet de ndata sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (ndata=64)	65
Figure IV.7.b : Effet de ndata sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (ndata=128)	65
Figure IV.8.a : Effet de σ sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ($\sigma=0.5$)	66
Figure IV.8.b : Effet de σ sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ($\sigma=8$)	67
Figure IV.9.a : Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (pp=150 kW)	68
Figure IV.9.b : Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (pp=750 kW)	68
Figure IV.10 : Estimation de la vitesse Doppler radiale moyenne par la méthode Pulse Pair (Données de simulation)	71
Figure IV.11 : l'erreur sur l'estimation des vitesses par la méthode Pulse Pair (Données de simulation)	71
Figure IV.12 : Estimation de la largeur spectrale de la vitesse Doppler radiale moyenne par la méthode Pulse Pair (Données de simulation)	72
Figure IV.13: Estimation de la vitesse Doppler radiale moyenne par la méthode de Fourier (Données de simulation)	74
Figure IV.14: l'erreur sur l'estimation des vitesses par la méthode de Fourier (Données de simulation)	74
Figure IV.15: Estimation de la largeur de spectre par la méthode de Fourier (Données de simulation)	75
Figure IV.16: Comparaison des différents estimateurs de la vitesse moyenne Doppler	76
Figure IV.17: Comparaison entre les erreurs sur l'estimation des vitesses par les deux méthodes	77
Figure IV.18: Comparaison des différents estimateurs de la largeur spectrale	77
Figure IV.19: Estimation de la réflectivité par la méthode Pulse Pair	78
Figure IV.20: Estimation de la réflectivité par la méthode Fourier	79
Figure IV.21: Estimation de taux de précipitations par la méthode Pulse Pair	80
Figure IV.22: Estimation de taux de précipitations par la méthode	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: les fréquences radar	12
Tableau III.1 : Nombre de gouttes par mètre cube versus leur diamètre (D)	46
Tableau III.2 : Relation Z-R pour diverses situations	47
Tableau IV.1 : Comparaison de différentes méthodes utilisées	76

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Durant la Seconde guerre mondiale, les opérateurs radar ont remarqué de la contamination qui s'avéra être des échos provenant des précipitations (pluie, neige, etc.). Juste après la guerre les scientifiques militaires qui avaient déjà commencé leur recherche sur les phénomènes rapportés, ont continué leur travail tant dans la vie militaire que civile. Aux États-Unis David Atlas fut l'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

Le radar fait son apparition dans le domaine civil après le conflit. En premier, c'est le domaine de l'aviation civile qui en est équipée, permettant un rapide développement du contrôle aérien. Il se répand ensuite dans des domaines aussi divers que la détection des précipitations en météorologie, l'étude des planètes en astronomie, le contrôle de la vitesse sur les routes et la détection des artefacts archéologiques dans le sol.

Le radar est devenu un élément essentiel de la mesure des précipitations et de la détection du temps violent. La formation de nuages et de leurs précipitations sont dus au transfert de chaleur et de mouvement dans l'atmosphère par différents processus. Dans les systèmes de grande échelle, comme les tempêtes de neige, c'est un mouvement mécanique qui soulève l'air. Dans un orage, c'est la différence de température entre l'environnement et une parcelle d'air plus chaude qui produit le même effet. Dans les deux cas, l'air soulevé se refroidit à cause du changement de pression et quand l'humidité contenue dans l'air atteint le point de saturation, il y a formation des nuages et relâchement de chaleur latente.

Dans ces deux applications, l'intérêt du radar météorologique est de mesurer le taux de précipitations. Celle-ci est mesurée par la réflectivité (Z) qui va varier grandement entre la bruine et les pluies torrentielles ou la grêle. Pour compliquer les choses, des échos non météorologiques peuvent se mêler aux précipitations. Les avions, les oiseaux, les échos de sol et autres artefacts sont généralement reconnaissables pour un utilisateur expérimenté, car ils ont des caractéristiques particulières, mais contaminent les données. C'est pourquoi on utilise une échelle logarithmique pour Z qui peut débiter autour de 0 dBZ et aller à plus de 80 dBZ.

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif de notre étude est de faire l'estimation de taux de précipitation et de la réflectivité d'un radar météorologique Doppler par les méthodes classique.

Notre mémoire est répartie en quatre chapitres :

Chapitre I : Nous avons débuté notre recherche par une étude globale de radar Doppler, qui joue un rôle très important dans notre vie quotidienne et surtout dans le trafic aérien, ainsi que l'explication des phénomènes atmosphériques tels que les nuages et les précipitations pour comprendre comment ils se forment et évoluent.

Chapitre II : porte sur l'estimation des paramètres spectraux, par deux méthodes dont la première dans le domaine temporelle dite pulse pair qui est basée sur le calcul de la fonction d'autocorrélation des signaux Radar.

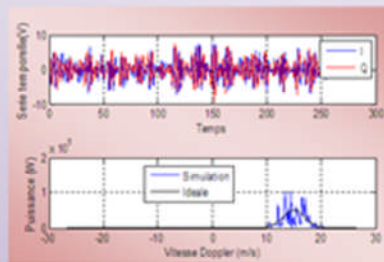
La seconde dans le domaine fréquentiel dite méthodes de Fourier, qui est basée sur l'estimation du spectre de puissance par l'utilisation de la transformée de Fourier.

Chapitre III : comporte un calcul et un affichage des taux de précipitation, la réflectivité et la mesure de vitesse de vent. Actuellement, les prévisionnistes devenus plus exigeants en matière de précision et de volume d'informations, développent la prévision d'ensemble plus apte à prévoir les phénomènes météorologiques dangereux que la prévision classique. De plus, la possibilité de formuler les prévisions du temps de façon probabiliste fait de la prévision d'ensemble un outil d'aide à la décision bien adapté aux activités économiques ou sociales sensibles aux conditions météorologiques. Bien que gourmande en calcul, cette technique de prévision du temps pourrait donc devenir un excellent outil de gestion du risque météorologique.

Chapitre IV : 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 « Pulse pair », et une méthode spectrale basée sur l'estimation de la densité spectrale de puissance de Fourier.

Chapitre IV

Simulation De Données Radar Et Calcul De Réflectivité



Chapitre II
Estimation Des
Paramétrés Par Les
Méthodes Classiques



Chapitre III
Réflectivité et Taux De
Précipitations, Vitesse
Radiale Doppler



Chapitre I
LE RADAR
METEOROLOGIQUE
DOPPLER



II.1.INTRODUCTION

Dans le domaine du traitement du signal on utilise essentiellement des transformées ou des méthodes afin de passer d'un espace à un autre (temps vers fréquence) ou autre, pour ainsi mieux estimer et analyser le contenu informationnel du signal. La transformée de Fourier Discrète DFT et sa transformée rapide FFT étaient jusque-là les meilleurs outils utilisés pour des signaux périodiques ou quasi périodiques, mais elle n'est pas vraiment adéquate pour l'analyse des signaux aléatoires apériodiques. Ceci n'est pas un fait nouveau, c'est pourquoi de multiples méthodes ont été développées pour l'analyse de séries temporelles comme, modèle autorégressif AR ou le modèle autorégressif de la moyenne mobile (ARMA) [10].

Dans le contexte de l'estimation des paramètres spectraux d'un signal Radar météorologique, il y a eu le développement dans un premier temps d'un algorithme appelé Pulse Pair PP se basant sur le calcul de l'autocorrélation des séries temporelles complexes $Z(I,Q)$ contenant les voies en phase I et en quadrature de phase Q du signal Radar reçu, et ce avec un ou deux rangs de développement des moments spectraux en série de Mc-Lauren et ce dans un souci de réduction du temps de calcul. Puis avec l'avancée dans le domaine des calculateurs et de l'informatique on a introduit la transformée de Fourier, puis le modèle AR et ARMA, pour ainsi travailler dans le domaine spectral afin d'analyser mieux les phénomènes météorologiques détectés [10].

II.2.METHODES TEMPORELLES (PULSE PAIR)

II. 2 .1.Description générale du processeur Pulse- Pair

Les fréquences de travail d'un Radar météorologique sont de l'ordre de 10^9 Hz correspondant à des longueurs d'onde de quelques centimètres (<10 cm). Les cibles météorologiques se déplacent à des vitesses de 50 m/sec en général .L'effet Doppler traduirait ces vitesses en décalage de la fréquence d'émission du Radar, ce décalage est de quelques centaines de Hz, beaucoup trop faible pour être mesuré directement. Pour y parvenir, on fait recours à la mesure du déphasage entre le retour de deux impulsions successives ayant sondé un même volume d'espace.

En effet, après le retour de la deuxième impulsion, la cible aurait changé de position qui se traduirait en un déphasage entre les deux impulsions, d'où la naissance de la méthode de pair d'impulsions (**pulse pair**) [15].

L'estimateur pulse pair calcule les deux premiers moments du spectre Doppler à partir de l'estimation de la fonction d'autocovariance /autocorrélation

II.2.2. Développement de l'algorithme Pulse-Pair

Passerelle et Byron M. Keel ont démontré que la fonction d'autocorrélation pour un processus aléatoire complexe et stationnaire au sens large (série temporelle, en phase I et en quadrature de phase Q), peut être développée en séries de Mc Lauren, où les coefficients de ces séries peuvent être exprimés en termes de moments centraux fonction de la puissance moyenne spectrale [3].

Byron M. Keel défini la fonction d'autocorrélation complexe sous la forme [9]:

$$R(x) = h(x). \exp(j. g(x)) \quad (\text{II.1})$$

Où $h(x)$ est une fonction d'amplitude du signal Radar complexe reçu et $g(x)$ est une fonction de phase. Le développement de ces deux fonctions en séries de Mc Lauren est donné comme suit :

$$h(\tau) = \frac{h(0)}{0!} + \frac{h'(0)}{1!} \tau + \frac{h''(0)\tau^2}{2!} + \dots \quad (\text{II.2})$$

Et

$$g(\tau) = \frac{g(0)}{0!} + \frac{g'(0)\tau}{1!} + \frac{g''(0)\tau^2}{2!} + \dots \quad (\text{II.3})$$

Pour le cas discret, le développement de la fonction d'autocorrélation peut s'écrire comme suit [9]:

$$h(k) = P_0 \left\{ 1 - \frac{M_2 k^2}{2!} + \frac{M_4 k^4}{4!} - \frac{(M_6 - 10M_3^2)k^6}{6!} + \dots \right\} \quad (\text{II.4})$$

Et

$$g(k) = k\mu - \frac{M_3 k^3}{3!} + \frac{(M_5 - 10M_2 M_3)k^5}{6!} + \dots \quad (\text{II.5})$$

Avec

$$P_0 = \int_{-\pi}^{\pi} P(w) dw \quad (\text{II.6})$$

Qui est la puissance totale contenue dans le spectre $P(w)$.

$$\mu = \frac{1}{P_0} \int_{-\pi}^{\pi} w \cdot P(w) dw \quad (\text{II.7})$$

Est la puissance spectrale moyenne et

$$M_n = \frac{1}{P_0} \int_{-\pi}^{\pi} (w - \mu)^n P(w) \cdot dw \quad (\text{II.8})$$

Est le n^{eme} moment central du spectre de puissance

Byron M. keel, a prévu pour le cas de présence d'un bruit blanc additif, la modification de la fonction d'amplitude $h(k)$ (eq. (II.4)) en incluant la fonction d'autocorrélation du bruit. Ceci dit l'équation (II.4) devient [10] :

$$h(k) = N_0 \delta(k) + P_0 \left\{ 1 - \frac{M_2 k^2}{2!} + \frac{M_4 k^4}{4!} - \frac{(M_6 - 10M_3^2) \cdot k^6}{6!} + \dots \right\} \quad (\text{II.9})$$

Où N_0 est la puissance totale du bruit blanc et $\delta(k)$ représente l'impulsion de Dirac

Le développement en séries de Mc Lauren permet la troncature des termes, après un nombre suffisant de termes nécessaires à la résolution de la fonction d'autocorrection complexe pour les moments centraux d'intérêt.

La résolution de ces équations, en utilisant les deux premiers termes de la fonction d'autocorrélation (ordre 0 et 1), et en assumant deux termes pour la série fonction d'amplitude $h(x)$ ainsi qu'un terme pour la série de phase $g(x)$, produit l'ensemble des équations suivantes [9],[10]:

$$h(0) = P_0 + N_0 \quad (\text{II.10})$$

$$h(1) = P_0 \cdot \left[1 - \frac{M_2}{2!} \right] \quad (\text{II.11})$$

$$g(1) = \mu \quad (\text{II.12})$$

En résolvant ces équations, pour la moyenne μ , et la variance M_2 , on obtient:

$$P_0 = h(0) - N0 \quad (\text{II.13})$$

$$\mu = g(1) \quad (\text{II.14})$$

$$M_2 = 2. \left[1 - \frac{h(1)}{P_0} \right] \quad (\text{II.15})$$

Notons, que le choix de l'ordre des termes des séries développées dépend essentiellement du nombre des inconnues recherchées (exemple : puissance, vitesse et variance). Donc pour avoir par exemple le paramètre appelé étendue du spectre de la vitesse (skewness), il faut pour cela prendre trois termes pour la série d'amplitude et deux termes pour la série de phase.

Les équations (II.13), (II.14) et (II.15) sont aussi familièrement connues, sous le nom d'algorithme pulse-pair développé pour la première fois par (Rummler en 1968).

L'algorithme pulse-pair est un estimateur de la vitesse moyenne de la puissance du spectre Doppler du vent et de sa variance. Cette technique est basée sur l'estimation de l'autocovariance des signaux I et Q retournés de l'impulsion Doppler reçue.

Si les paires d'impulsions sont statistiquement indépendantes. Il est démontré que le maximum de vraisemblance de l'autocorrélation complexe $R_{ZZ}(T_s)$ est donné par [16]:

$$R_{ZZ}(T_s) = \frac{1}{M} + \sum_{k=0}^{M-1} Z^*(kT_s) \cdot Z((k+1)T_s) \quad (\text{II.16})$$

Avec

$$Z(kT_s) = I(kT_s) + jQ(kT_s) \quad (\text{II.17})$$

Ou

M : Nombre d'impulsions.

T_s : Temps entre impulsions.

Z(k T s) : Signal complexe échantillonné à *T_s*.

❖ Estimation de la puissance totale

L'estimation du moment d'ordre zéro, appelé aussi puissance de l'écho radar est donné par la relation suivante :

$$\hat{P} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |Z(kT_S)|^2 - N \quad (\text{II.18})$$

❖ **Estimation de la vitesse moyenne**

L'estimation de la vitesse moyenne du vent, appelée aussi moment d'ordre un de la fonction d'autocorrélation est donné par:

$$\hat{v}_{pp} = \frac{\lambda}{4\pi T_S} \cdot \mathbf{arg}[R_{ZZ}(T_S)] \quad (\text{II.19})$$

avec $\mathbf{arg}[R_{ZZ}(T_S)]$, dénote l'argument de la fonction d'autocorrélation complexe $R_{ZZ}(T_S)$.

❖ **Estimation de la largeur spectrale**

Le moment du second ordre, appelé aussi variance spectrale de la vitesse est donnée par :

$$\sigma_v^2 = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 T_S^2} \left[\mathbf{1} - \frac{R_{ZZ}(T_S)}{R_{ZZ}(0)-N} \right] \quad (\text{II.20})$$

Et la largeur spectrale de la vitesse est donnée par :

$$\hat{W}_{pp} = \sqrt{\sigma_v^2} = \frac{\sqrt{2\lambda}}{4\pi T_S} \sqrt{\left| \mathbf{1} - \frac{R_{ZZ}(T_S)}{R_{ZZ}(0)-N} \right|} \quad (\text{II.21})$$

Avec N : puissance d'un bruit blanc qui caractérise le clutter, et le bruit thermique.

Les équations (II.18), (II.19), (II.20) et (II.21) décrivent une méthode d'estimation de la vitesse moyenne et sa variance pour le cisaillement du vent. Ceci est réalisé dans le domaine temporel en se basant sur les impulsions reçues sous la forme de séries complexes (I et Q).

Une estimation équivalente peut être obtenue pour le spectre du signal en notant que :

$$R_{ZZ}(T_S) = \sum_{k=0}^{M-1} S_Z(k) \exp\left(\frac{2\pi k T_S}{M-1}\right) \quad (\text{II.22})$$

Où :

$S_Z(k)$: est la densité spectrale de puissance.

En calculant le spectre de puissance par l'utilisation de la transformée de Fourier discrète DFT, l'argument de la fonction d'autocorrélation complexe $R_{ZZ}(T_s)$ peut être formulé comme suit [16] :

$$\arg[R_{ZZ}(T_s)] = \arctg\left(\frac{\text{Im}(R_{ZZ}(T_s))}{\text{Re}(R_{ZZ}(T_s))}\right) = \arctg\left\{\frac{\sum_{k=0}^{M-1} S_Z(k) \sin\left(\frac{2\pi k T_s}{M-1}\right)}{\sum_{k=0}^{M-1} S_Z(k) \cos\left(\frac{2\pi k T_s}{M-1}\right)}\right\} \quad (\text{II.23})$$

Et ainsi l'estimation de la puissance moyenne de l'écho Radar et de la vitesse moyenne V_{pp} la variance σ_{pp} , et la largeur du spectre W_{pp} Doppler reçu peuvent être établit comme dans les équations (II.18), (II.19), (II.20) et (II.21).

II.3.METHODE DE FOURIER

II.3.1. Description générale de la méthode de Fourier [10]

L'utilisation de la méthode de Ramanujan dans le domaine d'évaluation de spectre Doppler des signaux Radar météorologique, suscite un intérêt croissant pour les chercheurs. Cette méthode a été employée par Ramanujan, pour la première fois, en tant des moyens pour représenter la série arithmétique par des sommes infinies par Ramanujan.

L'évaluation de moment de spectre d'ordre zéro, un et deux (largeur de puissance, de vitesse et de spectre) pour un signal Radar météorologique pulsé-Doppler ont été traités tout en utilisant la transformée de Fourier discrète (DFT). Une certaine notion des sommes de Ramanujan a été introduite. La transformé Ramanujan-Fourier (RFT) est présenté comme nouvel outil dans le traitement des signaux des ordres arithmétiques, basé sur la théorie de nombre premier.

II.3.2. Développement de l'algorithme Fourier

❖ Estimation de la vitesse moyenne [15]

Soit $V[0]$, $V[1]$, $V[M-1]$, M échantillons temporels du signal reçu, espacés de T_s La puissance totale reçue par l'antenne Radar émanant des rétro diffuseurs visés par le

$$\hat{P} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |V(m)|^2 \quad (\text{II.24})$$

Faisceau du Radar à travers les M échantillons est

Le périodogramme est calculé par l'expression suivante :

$$\hat{S}(k) = \frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} V(m) e^{-j\frac{2mk}{M}} \right|^2 \quad (\text{II.25})$$

Avec $k = 0, M - 1$

La vitesse moyenne de mouvement des rétro-diffuseurs dans la cellule de distance considérée est

$$\hat{v}_{ft} = -\frac{\pi}{2\hat{P}T_s} \sum_{k=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \hat{S}(k) \left(\frac{k}{M-1} \right) \quad (\text{II.26})$$

Un autre estimateur de la vitesse moyenne proposé par D.Zrnich est exprimé par

$$\hat{v}_{ft} = -\frac{\pi}{2M} \left\{ \frac{k_m}{T_s} + \frac{1}{\hat{P}T_s} \sum_{k=k_m-\frac{M}{2}}^{k_m+\frac{M}{2}} (k - k_m) \hat{S}[\text{mod}_M(k)] \right\} \quad (\text{II.27})$$

Où k_m désigne l'indice du coefficient de Fourier le plus grand et $\text{mod}_M(k)$ désigne le reste de la division de k par M .

L'estimateur de la vitesse moyenne est biaisé à cause de la résolution fréquentielle limitée associée au calcul de la FFT Ceci est un sérieux problème lorsque la taille M de l'échantillon considéré est petite.

❖ Estimation de la largeur spectrale [10]

Ce paramètre, très important, aide à l'interprétation et la confirmation des résultats relatifs à l'estimation de la vitesse moyenne. L'expression de la variance spectrale σ^2 est

$$\widehat{W}_{ft}^2 = \frac{\pi^2}{4PT_s^2} \sum_{k=\frac{M}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \widehat{S}(k) \left(\frac{k}{M-1} + 2\widehat{v}_{ft} \frac{T_s}{\pi} \right)^2 \quad (\text{II.28})$$

Par conséquent la largeur spectrale est la racine carrée de la variance ainsi calculée dont l'unité de mesure est [m/sec].

Un autre estimateur de la largeur spectrale des vitesses est proposé.

$$\widehat{W}_{ft}^2 = \frac{\pi^2}{4PT_s^2} \sum_{k=k_m-\frac{M}{2}}^{k_m+\frac{M}{2}} \widehat{S}[\text{mod}_M(k)] \left(\frac{k}{M} + 2\widehat{v}_{ft} \frac{T_s}{\pi} \right)^2 \quad (\text{II.29})$$

L'estimateur de la largeur du spectre des vitesses σ_v est sans biais dans le cas où ladite largeur est petite par rapport à l'intervalle des vitesses non-ambigues.

Le même estimateur est biaisé pour des SNR élevés dans le cas où le spectre a une largeur comparable à l'intervalle de Nyquist.

Il est à noter que sur ce plan la méthode Pulse pair présente de meilleures performances que celles fournies par la méthode spectrale (Fourier).

L'estimateur de la largeur du spectre des vitesses σ_v , est encore biaisé à cause de l'effet de fenêtrage associé avec la FFT Le biais est d'autant plus important que la valeur de la largeur spectrale est importante.

II.4. METHODE AUTOREGRESSIF (AR)

Dans ce type de modélisation, le signal $x(n)$ est supposé être prédictible en fonction d'un certain nombre de ses valeurs antérieures [2].

Il peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + e(n) \quad (\text{II.30})$$

Les coefficients $(a_k)_{k=1..p}$, constituent les paramètres du modèle et $e(n)$ représente un bruit blanc non-corrèle avec $x(n)$ ayant une variance σ^2 qui représente l'erreur de prédiction. La transformée en Z de l'équation (II.30) donne :

$$X(z)(1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-1}) = E(z) \tag{II.31}$$

D'après ce modèle, le signal $x(n)$ peut être vu comme le résultat du passage d'un bruit blanc $e(n)$ de variance σ^2 à travers un filtre de fonction de transfert $H(z)$ [17].

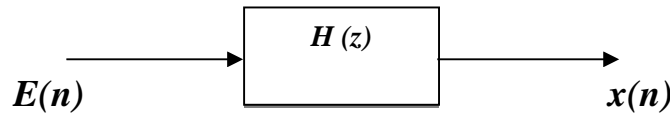


Figure (II.1) : Principe de prédiction AR.

Avec :

$$H(f) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j2\pi f k T}} \tag{II.32}$$

a_k : Coefficients du model AR

P : Ordre du model AR.

T : Intervalle d'échantillonnage.

Les paramètres $(a_k)_{k=1..p}$ Permettent d'estimer la densité spectrale de puissance $P_{AR}(f)$ selon l'expression suivante :

$$P_{AR}(f) = \frac{T\sigma_p^2}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j2\pi f k T}|^2} \tag{II.33}$$

Les coefficients $(a_k)_{k=1..p}$ sont déterminés à partir d'un critère de minimisation d'erreur quadratique donne par l'expression suivante [18] :

$$E[e_a(n)^2] = E[(x(n) - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k))^2]$$

Ou

$$X_k(n - 1) = [(x(n - 1), x(n - 2), \dots \dots \dots x(n - k))]^T$$

Et

$$A_k = [a_1 a_2 \dots \dots \dots a_k]^T$$

En annulant la dérivée de cette expression par rapport à A_k , on obtient la solution :

$$A_k = R_k^{-1} r_k^a \tag{II.34}$$

Avec :

$$R_k = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(k-1) \\ r^*(1) & r(0) & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & r(1) \\ r^*(k-1) & \dots & r^*(1) & r(0) \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice d'autocorrélation}$$

$$r_k^a = \begin{bmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \dots \\ r(k) \end{bmatrix} \quad : \text{Vecteur d'autocorrélation.}$$

Pour cette valeur de A_k la variance minimale de l' excitation est donnée par :

$$E_{ak} = r(0) - r_k^{aT} A_k \tag{II.35}$$

En écrivant (II.34) et (II.35) sous une forme matricielle unique, il vient :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r_k^{aT} \\ r_k^a & R_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ -A_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ak} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Cette équation présente la forme avant de l'équation de Yule-Walker. Qui permet de déterminer le vecteur A_k à partir de la matrice d'autocorrélation R_k et de l'énergie d'erreur de prédiction avant E_{ak} . Cependant, le cout en temps de calcul est de l'ordre de k^3 . Il est possible de résoudre cette équation avec un temps de calcul réduit proportionnel à k^2 en utilisant l'algorithme de Levinson.

II.5. METHODE AUTOREGRESSIF A MOYENNE MOBILE (ARMA)

Ce modèle est obtenu par la combinaison des modèles AR et MA ou le signal $x(n)$ peut s'écrire en fonction de k valeurs passées et de m échantillons d'un bruit blanc décorrélé.

$$x(n) = \sum_{i=1}^k a_i x(n-i) + \sum_{i=0}^m b_i e(n-i) \quad (\text{II.36})$$

Le signal $x(n)$ peut donc être vu comme le résultat du passage d'un bruit blanc $e(n)$ à travers deux filtres de fonctions de transferts respectives $H_1(Z)$ et $H_2(Z)$ [18]:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=1}^k a_i z^{-i}} = \left(\frac{1}{1 - \sum_{i=1}^k a_i z^{-i}} \right) (\sum_{i=0}^m b_i z^{-i}) = H_1(Z) H_2(Z) \quad (\text{II.37})$$

Le premier filtre est identifié au moyen de l'algorithme de Levinson tandis que le deuxième est identifiable de manière approchée au moyen de l'algorithme de Durbin. La densité spectrale de puissance du signal $x(n)$ à partir de ce modèle s'écrit alors [18]:

$$P_{ARMA}(f) = \left| \frac{\sum_{k=0}^m b_k e^{-j2\pi f T}}{1 - \sum_{k=0}^p a_k e^{-j2\pi f T}} \right|^2 \quad (\text{II.38})$$

Dans cette partie notre travail consiste à estimer la densité spectrale de puissance du signal, par la modélisation autorégressive AR. Initialement, l'ordre de prédiction n'est pas défini. Une approche simpliste consiste à considérer un ordre plus élevé pour obtenir un modèle meilleur.

Une première règle basée sur l'expérience est que, si nous avons N échantillons du signal, l'ordre ne devrait pas dépasser $N/3$.

Une solution plus élaborée est basée sur le fait qu'on part de l'hypothèse que l'excitation est un bruit blanc. Une fois les coefficients du modèle déterminent, nous pouvons calculer cette excitation par [18]:

$$e(n) = x(n) - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) \quad (\text{II.39})$$

Ensuite, nous faisons un test de blancheur sur $e(n)$. Si le test n'est pas réussi, nous augmentons l'ordre. Afin d'évaluer l'influence de l'ordre de prédiction sur la qualité des

spectres, considérons des valeurs arbitrairement choisis ($p=5, 6, 7$ et 8). Pour des ordres 5 et 6 , les spectres obtenus sont complètement déformés, tandis que ceux correspondant aux ordres 7 et 8 représentent bien des Laurentiennes affectées par une dégradation considérable de la résolution spectrale. Alors une bonne estimation paramétrique de la DSP du signal ne peut pas être effectuée à partir des ordres de faibles valeurs.

II.6.CONCLUSION

Nous avons essayé dans ce chapitre, de présenter le plus clairement possible les méthodes de traitement du signal Radar, Ces méthodes sont basées dans deux domaines de calcul différents. Une dans le domaine temporel (algorithme puise-pair) qui utilise les fonctions d'autocorrélation des signaux Radar I et Q et les autres dans le domaine fréquentiel FFT « Fast Fourier Transform », Modèle AR « autorégressive » et modèle ARMA ($n, 1$) « autorégressif a moyenne mobile ». Qui elles utilisent les densités spectrales de puissance des signaux.

III.1.INTRODUCTION

On a longtemps espéré que le Radar pourrait être utilisé pour mesurer des précipitations. Plusieurs techniques de mesure qui emploient de diverses propriétés des signaux Radar ont été suggérées. D'abord, les études empiriques indiquent un rapport entre le facteur Z de réflectivité et le taux R de précipitations, la plupart des évaluations de précipitations à partir de Radar sont basées sur ce concept (Brandes et Wilson, 1986). En second lieu, parce que le degré d'atténuation de pluie est une fonction de longueur d'onde, des précipitations peuvent être déterminées en mesurant l'atténuation utilisée par un Radar à ondes courtes (Doviak et Zrnica, 1984), à mesures de Z a deux pôles fournissent les informations supplémentaires sur des tailles de goutte de pluie et le taux de précipitations (Seliga et Bringi, 1976) [11].

Ce chapitre consiste à étudier les différentes mesures de Radar météorologique Doppler tel que le taux de précipitation, la réflectivité et la vitesse doppler.

III.2.REFLECTIVITE

La réflectivité (Z) est la puissance retournée à un Radar météorologique quand le faisceau rencontre des hydrométéores (pluie, neige, etc.). Elle est défini par la surface équivalente Radar σ par mètre cube [m³] pour de petites sphères ayant une permittivité, ou constante diélectrique, non nulle. Comme chaque goutte ou flocons a un diamètre différent, la réflectivité est donc la somme de la réflectivité individuelle de toutes les gouttes ou flocons, ce qui donne [1], [5]:

$$Z = \int_0^{Dmax} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD \quad (III.1)$$

Λ : 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

η (La réflectivité Radar) = $\sum \sigma_i / V$

En utilisant l'approximation de Rayleigh :

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

L'écho de retour 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). Cette intensité varie en fait comme la 6^{ème} puissance du diamètre des cibles de diamètre D (le sixième moment) multiplié par la distribution des gouttes de pluie ($N[D]$ de Marshall-Palmer) ce qui donne une fonction Gamma tronquée. Ce Z est en $mm^6 m^{-3}$, ce qui donne des unités plutôt inhabituelles. De plus, cette formule ne tient pas compte de la nature de la cible. Pour obtenir la réflectivité équivalente (Z_e) que voit le Radar, on doit normaliser et multiplier par le carré de la constante diélectrique (K) de la cible pour tenir compte de son efficacité à réfléchir.

$$Z_e = |K|^2 \left(\frac{Z}{Z_0} \right) = \left(\frac{|K|^2}{Z_0} \right) \left(\int_0^{D_{max}} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD \right) \quad (III.3)$$

$\left\{ \begin{array}{l} Z_0 = 1mm^6m^{-3} \text{ soit le retour equivalent d'un volume rempli de gouttelettes avec } D = 1 \text{ mm} \\ |K|^2 = 0,93 \text{ pour l'eau et } 0,24 \text{ pour la neige} \end{array} \right.$

- La variation de diamètre et la constante diélectrique entre les différents types de précipitations (pluie, neige, bruine, grêle, etc.) est très grande et la réflectivité équivalente est donc exprimée en dBZ (10 fois le logarithme du rapport ou décibel Z)
- 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 (Pr) est reliée à une quantité Z, le facteur de réflectivité par l'équation Radar suivante:

$$\bar{P}_r = \frac{cZ_e}{r^2} \quad (III.4)$$

Dans cette expression, C'est le constant 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. Le constant diélectrique dépend de la phase des hydrométéores (eau liquide ou glace).

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

III.2.1. La bande brillante

La «bande brillante» est un effet de rehaussement des réflectivités dans les précipitations fondantes. Ceci est une situation normale dans les latitudes moyennes terrestres alors que les précipitations à grande échelle se forment en altitude, là où la température est sous le point de congélation de l'eau, sous forme de cristaux de glace.

L'image ci-contre montre les données prises par un Radar météorologique pointant verticalement. Dans la moitié de droite, à environ 2,4 km d'altitude, la ligne de couleur rouge indique des réflectivités plus intenses qu'au-dessus et en dessous. C'est un exemple de bande brillante.

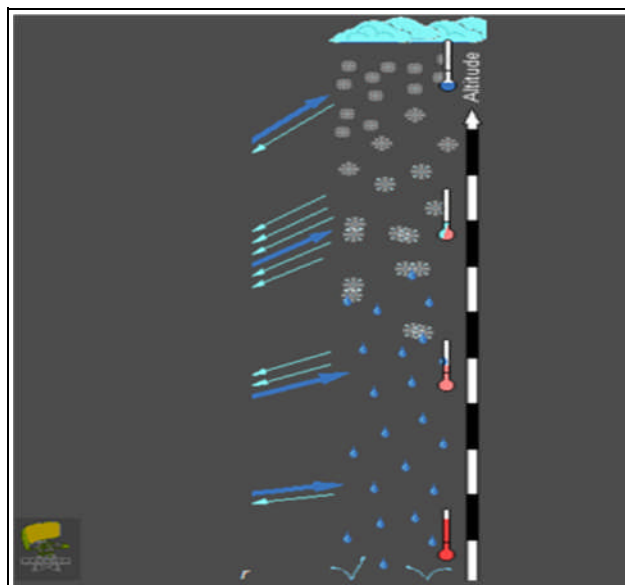


Figure III.1 : La bande brillante

Le diagramme montre ce qui se passe quand la neige produite en altitude tombe dans une couche au-dessus du point de congélation et se change en pluie:

- À haute altitude les précipitations débutent sous forme de très petits cristaux de glace dans l'air très froid. En tombant, ceux-ci croissent par déposition de vapeur d'eau et par collision pour finalement donner des flocons de neige. La réflectivité augmente donc graduellement durant la chute de ces flocons à cause de l'accroissement de leur diamètre.
- En général, la température de l'air augmente en s'approchant sur sol. Lorsque les flocons passent dans la couche au-dessus du point de congélation, ils commencent à fondre. C'est d'abord l'extérieur qui se transforme en eau, enrobant ce qui reste du flocon. Comme l'eau est de 9 à 10 fois plus réflective que la glace et que le diamètre du flocon est encore important, cela optimise les deux facteurs influençant la réflectivité.
- Pour un Radar, la neige fondante donnera une réflectivité très augmentée par rapport à la neige, jusqu'à 10 dBZ, faussant l'estimation du taux de précipitations. C'est ce qu'on nomme la bande brillante.
- Les flocons finissent par fondre complètement. Les gouttes de pluie en résultant sont très petites et tombent plus rapidement que la neige. Comme le diamètre et la concentration diminuent grandement, la réflectivité retombe vers une valeur plus caractéristique.
- L'altitude où l'on retrouve la bande brillante varie avec la saison. Elle se retrouve à plusieurs kilomètres au-dessus du sol en été et descend graduellement à l'automne. Elle est absente en hiver lors de chutes de neige et remonte au printemps.

III.2.2 Les produits de réflectivité [13]

Les produits de réflectivité (R) fournissent des affichages des données de réflectivité pour chaque balayage d'angle d'altitude aux résolutions spatiales. Les produits sont disponibles pour plusieurs combinaisons de résolution et d'assurance d'affichage, chaque produit est disponible pour 8 et 16 niveaux hiérarchiques de données. Une version séparée de chaque produit est disponible pour chaque balayage d'antenne, selon le VCP utilisé.

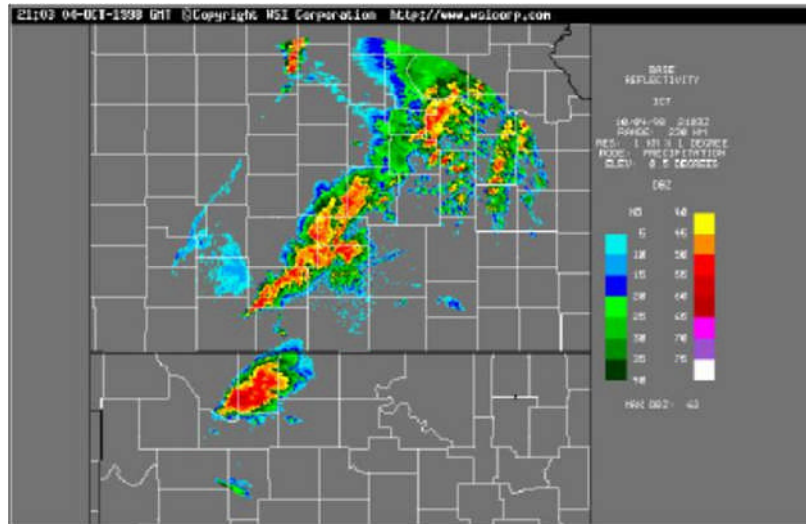


Figure III.2 : Le produit de réflectivité (R)

➤ **Utilisation [13]**

- Comme aide dans l'analyse des événements météorologiques.
- La sensibilité du WSR-88D permet la détection des cristaux de glace, certains en tant que nuages cordiformes et à mi-niveau. La portée de détection dépend de la composition de cristal et de flocon de neige de glace du nuage
- Des nuages de Stratocumulus contiendront souvent la précipitation en haut comme gouttes de pluie ou cristaux et flocons de neige de glace, ou toutes les deux, assez grands pour être détectés par le WSR-88D.
- Le stratus (et le brouillard) habituellement ne seront pas détectés à la petite structure de gouttelette.
- Des événements de précipitation peuvent être surveillés pendant qu'ils évoluent, se développent, et/ou absorbés par des observations des modèles de réflectivité.
- On peut observer l'humidité ou les couches turbulentes, ou toutes les deux, de la rétrodiffusion des fluctuations de réfringence.
- L'évolution de la couche limite planétaire peut être surveillée de la rétrodiffusion de la structure ou des substances particulières de réfringence.
- Des rouleaux horizontaux et l'évolution des rues de nuage au-dessus de la couche limite planétaire peuvent être surveillés. La profondeur de la couche limite planétaire peut être surveillée pendant un cycle journalier.
- On peut observer des dispositifs tels que la bande lumineuse.

➤ **Applications [13]**

- Observer l'intensité, le mouvement, et les tendances de précipitation.
- Évaluer les conditions environnementales et les caractéristiques météorologiques telles que des inversions ou des couches d'humidité, particulièrement en mode d'air limpide.
- Identifier les couches de nuage de glace et même les caractéristiques très légères de précipitations.
- Identifier et localiser la congélation fondant de niveau.
- Observer et dépister parfois même les phénomènes de non-précipitation tels que des oiseaux, des bates, des insectes, la fumée, la cendre volcanique, des paillettes, etc.
- Les retours faibles des gradients d'indice de réfraction et les petites substances particulières telles que des insectes indiquent beaucoup de caractéristiques de la couche limite.
- Déterminer l'endroit et le mouvement des lignes et des frontières de cisaillement du vent telles que des avants de rafale, avants synoptiques, brises marines, et vent-décale de toutes les sortes.

➤ **Limitations [13]**

- Des valeurs de niveau hiérarchique de données ne peuvent pas être changées.
- Des retours faibles ne sont pas détectés en mode de précipitation.
- L'image de fond résiduelle de la terre et de point, et AP peut souiller des données.
- Le prélèvement discret d'altitude de n'importe quel VCP limite le prélèvement d'écho seulement aux angles d'altitude balayés. Des secteurs entre les faisceaux non-contigus et au-dessus de l'altitude du faisceau le plus élevé (4.5° ou 19.5° selon VCP) ne sont pas prélevés du tout.
- Il est souvent difficile de distinguer des échos de paillettes des échos de précipitation.
- Rayonner l'élargissement avec l'augmentation de la détection de limites de gammes des dispositifs qui sont petits comparés à la largeur de faisceau. Ceci désigné sous le nom du « allongement » ou rapport de la largeur de faisceau à la taille de dispositif.
- Le blocage de faisceau est possible sur des angles d'altitude inférieurs par les gratte-ciel voisins ou des dispositifs orographiques tels que des montagnes.

III.2.3. Réflectivité et précipitations

Le Radar est devenu un élément essentiel de la mesure des précipitations et de la détection du temps violent. La formation des nuages et de leurs précipitations sont dus au transfert de chaleur et de mouvement dans l'atmosphère par différents processus. Dans les systèmes de grande échelle, comme les tempêtes de neige, c'est un mouvement mécanique qui soulève d'air. Dans un orage, c'est la différence de température entre l'environnement et une parcelle d'air plus chaude qui produit le même effet. Dans les deux cas, l'air soulevé se refroidit à cause du changement de pression et quand l'humidité contenue dans l'air atteint le point de saturation, il y a formation des nuages et relâchement de chaleur latente.

Le mouvement de l'air varie continuellement dans les nuages, selon les conditions ambiantes. Dans le cas d'un orage, ces mouvements sont rapides et comportent une phase de croissance, suivie de la maturité du cumulonimbus puis de sa dissipation. Dans le cas de précipitations continues, les mouvements sont plus lents et le plus souvent on retrouve de la neige en altitude et de la pluie au sol. Il est donc important de suivre l'évolution de la structure des précipitations, pas seulement leur déplacement.

Le Radar est un instrument de télédétection qui permet de couvrir une région entière et supplémente les données recueillies par les stations météorologiques de surface. Selon les besoins, la fréquence de sondage peut varier. Ainsi, pour estimer la quantité de pluie tombée durant une période donnée, un sondage au 15 minutes peut être suffisant, mais pour suivre un orage violent, une fréquence de 5 minutes est nécessaire.

Dans ces deux applications, l'intérêt du Radar météorologique est de mesurer le taux de précipitations. Celle-ci est mesurée par la réflectivité (Z) qui va varier grandement entre la bruine et les pluies torrentielles ou la grêle. Pour compliquer les choses, des échos non météorologiques peuvent se mêler aux précipitations. Les avions, les oiseaux, les échos de sol et autres artefacts sont généralement reconnaissables pour un utilisateur expérimenté, car ils ont des caractéristiques particulières, mais contaminent les données. C'est pourquoi on utilise une échelle logarithmique pour Z qui peut débiter autour de 0 dBZ et aller à plus de 80 dBZ.

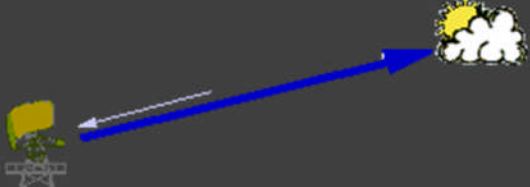
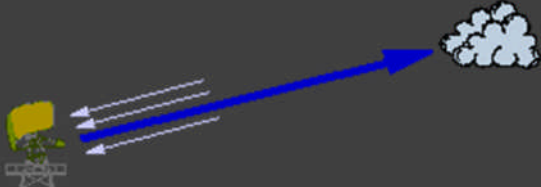
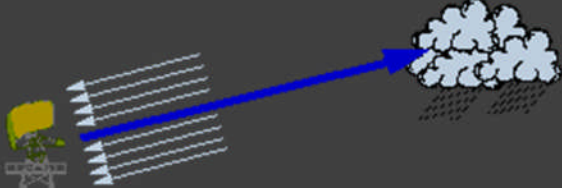
<p>Cas A</p>	<p>La réflectivité retournée par un nuage qui ne contient pas de précipitations est généralement nulle. Seul les radars ayant une très courte longueur d'onde, bande L, peuvent obtenir un très faible retour.</p>	
<p>Cas B</p>	<p>De la pluie ou bruine faible donnera des échos faibles.</p>	
<p>Cas C</p>	<p>Dans le cas de pluie forte, parfois avec de la grêle, les retours seront très importants.</p>	

Figure III.3: Comparaison graphique de l'intensité des échos Radar selon la précipitation

➤ **Réflectivité versus type de précipitations ou de cibles non météorologiques**

Tous les objets dans l'atmosphère vont retourner une partie du faisceau Radar. Certains sont très réfléchif alors que d'autres sont beaucoup moins. Dans la figure (III.4), nous avons une comparaison des réflectivités (Z) notées par un Radar météorologique selon le type de précipitations ou d'artefacts. La figure ne comporte pas d'unités car il est juste pour montrer la relation entre les différents retours d'un Radar météorologique. Il est important de se rappeler que la longueur d'onde utilisée par un Radar d'un autre type peut être absorbée par les précipitations fortes et que la progression dans cette figure ne reflète pas ce qui est noté par ce type de Radar.

Réflectivité	Précipitations/ Artefacts
Maximum	Échos de sol
▼▼▼▼▼	Aéronefs
▼	Grêle et/ou pluie
▼▼▼▼▼	forte
▼▼▼▼▼	Pluie
▼▼▼	Neige fondante
▼	Neige
Minimum	Bruine

Figure III.4: Comparaison de la réflectivité entre les divers types de précipitations

III.3.TAUX DE PRECIPITATION

L'utilisation d'un Radar métrologique pour l'estimation des taux de précipitation nécessite un étalonnage de celle-ci par confrontation directe avec des mesures au sol fournies par des pluviomètres classiques. Une méthode d'étalonnage originale et simple est proposée, basée sur un ajustement uniforme parabolique des estimations Radar à celle des pluviomètres prises comme référence.

Les résultats obtenus ont permis de dégager les performances de la méthode d'étalonnage mais aussi la nécessité d'une normalisation des données de référence que sont les mesures pluviométrique. On montre que la normalisation préalable de celles-ci, combinée à l'étalonnage parabolique des mesures par Radar, améliore de manière significative la précision et la représentativité des estimations de taux de précipitation par Radar.

III.3.1.Distribution des gouttes de pluie

La distribution des gouttes de pluie ou granulométrie de la pluie est la répartition du nombre de gouttes de pluie selon leur diamètre (D). En effet, trois processus contribuent à la formation des gouttes, la condensation de vapeur d'eau sur une goutte, l'accrétion de petites gouttes sur de plus grosses et les collisions entre gouttes de taille similaire. Selon le temps passé dans le nuage, le mouvement vertical dans celui-ci et la température ambiante, on aura

donc des gouttes qui auront une histoire très variée et une distribution de diamètres qui va de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres.

En général, cette distribution est représenté comme une fonction gamma tronquée, entre un diamètre nul et un diamètre maximum puisque les gouttes ne peuvent grossir indéfiniment :

$$\text{Distribution generale} = N(D) = N_0 D^\mu e^{-\Lambda D} \quad (\text{III.5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_0, \mu \text{ et } \Lambda \text{ sont des constantes.} \\ N(D) \text{ représente le nombre de gouttes dont le diamètre est } D. \end{array} \right.$$

III.3.1.1. La mesure de distribution de gouttes de pluie

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 put déterminer la distribution en comptant le nombre de marques correspondant à chaque grosseur de goutte. Ceci se passait immédiatement après la Seconde Guerre mondiale.

Le taux de précipitation (R) est égal au nombre de particules (n(D)), leur diamètre

(D) et leur vitesse de chute (v(D)):

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

Différents appareils ont été développés pour obtenir cette distribution de façon plus exacte :

-Disdromètre.

-Profileur de vents modifié.

❖ Distribution de Marshall-Palmer

L'étude la plus connue sur le sujet est celle de Marshall et Palmer faite à l'Université McGill de Montréal en 1948. Ils ont trouvé une distribution des gouttes dans la pluie stratiforme, ce qui revient à une distribution exponentielle :

$$\text{Distribution Marshall – Palmer} = N(D)_{MP} = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (\text{III.7})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_0 = 8000m^{-3}mm^{-1} \\ \Lambda = 4,1R^{-0,21}mm^{-1} \\ R : \text{etant le taux de precipitation dans stratiforme} \end{array} \right.$$

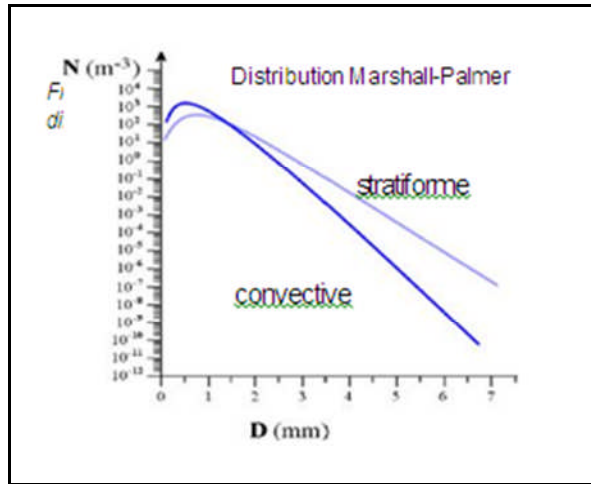


Figure III.5 : Distribution de gouttes: Nombre par mètre cube versus leur diamètre (D)

❖ Distribution d'Ulbricht

La distribution de Marshall et Palmer utilise une fonction exponentielle qui tient difficilement compte des gouttes de très petits diamètres. Plusieurs expériences ont montré que le nombre réel de ces gouttelettes est inférieur à la courbe théorique. Carlton W. Ulbricht a développé une formule plus générale en 1983 en tenant compte qu'une goutte est sphérique si $D < 1mm$; au-delà c'est un ellipsoïde dont le pôle inférieur est d'autant plus aplati que D est grand. Il est mécaniquement impossible de dépasser $D=10 mm$ la goutte se brise. À partir de la distribution générale, le spectre des diamètres change, $\mu=0$ à l'intérieur du nuage, où l'évaporation des petites gouttes est négligeable en raison des conditions de saturation et $\mu=2$ hors du nuage, où les petites gouttes s'évaporent car elles se trouvent dans un air plus sec. Avec les mêmes notations que précédemment, on a pour la bruine la distribution d'Ulbricht :

$$N_0(cm^{-4-\mu}) = \left[\frac{6}{\pi(+3)!} \right] \left(\frac{M_i}{10^{-3}\rho_e} \right) \Lambda^{\mu+4} \quad (III.8)$$

Et

$$\Lambda(cm^{-1}) = \frac{3,67+\mu}{D_0} \quad (III.9)$$

Où M_i est le contenu en eau liquide, ρ_e la masse volumique de l'eau et $D_0 \approx 0.2mm$ est une valeur moyenne du diamètre de la bruine. Pour la pluie, en introduisant le taux de précipitation R (mm/h), c'est-à-dire la hauteur d'eau tombée sur une surface unité en une heure :

$$D_0 \approx 0,13R^{0,14} \quad (III.10)$$

Et

$$N_0 \approx 6 \times 10^{-2} \exp(3,2 \times \mu) \quad (III.11)$$

II.4. LA RELATION ENTRE LE FACTEUR DE REFLECTIVITE ET LE TAUX DE PRECIPITATION

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 [12]. On veut trouver ainsi la relation entre la réflectivité des échos Radar et ce qu'on mesure avec un appareil comme le disdromètre.

Le taux de précipitation (R) est égal au nombre de particules ($N(D)$), leur volume ($\pi D^3/6$) et leur vitesse de chute ($v(D)$) [12]:

$$R = \int_0^{Dmax} N(D) \left(\frac{\pi D^3}{6} \right) v(D) dD \quad (III.12)$$

$v_T(D)$ vitesse de chute obtenue empiriquement :

$$v_T(D) = 386.6D^{0.67} \text{ [Atlas et Ulbrich 1977]}$$

La réflectivité donne :

$$Z_{pluie} = |K_{pluie}|^2 \int_0^{Dmax} N(D) D^6 dD \quad (III.13)$$

Où K est le constant diélectrique de l'eau

On voit donc que Z et R ont une formulation similaire et en résolvant les équations on arrive à une relation, dite Z-R.

Pour les précipitations, la relation entre Z et D n'est valide que dans les limites de la loi sur la diffusion de Rayleigh. Z ($\text{mm}^6/\text{m}^{-3}$) est proportionnel au taux de précipitations R (mm/h) que si D est au moins 10 fois plus petit que la longueur d'onde utilisée par le Radar. Dans ce cas, on trouve que [12]:

$$Z = aR^b \quad \text{(III.14)}$$

Les facteurs a et b vont varier selon le type de nuages qui produit les précipitations et le type de précipitations elles même. Cette relation dépend de la distribution de gouttes de pluie ou de flocons de neige. Pour reconnaître le type de précipitations, les observations de surface dans la région environnantes ont toujours été essentielles et certaines signatures dans les réflectivités. Plus récemment, l'utilisation de la double polarisation du faisceau Radar est employée pour obtenir l'information plus directement.

Diameter (cm)	Taux de précipitations (mm/h)			
	0,25	1,25	2,5	12,5
	% du continu			
0,05	28,0	10,9	7,3	2,6
0,10	50,1	37,1	27,3	11,5
0,15	18,2	31,3	32,8	24,5
0,20	3,0	13,5	19,0	25,4
0,25	0,7	4,9	7,9	17,3
0,30	-	1,5	3,3	10,1
0,35	-	0,6	1,1	4,3

Tableau III.1 : Nombre de gouttes par mètre cube versus leur diamètre (D)

III.4.1.Relations courantes

Il est théoriquement possible avec un appareil appelé disdromètre de trouver la distribution exacte de diamètre des gouttes lors d'événement particulier, Mais en général on

utilise des valeurs moyennes que l'on ajustera grâce aux mesures de précipitations des stations météorologiques environnant le Radar. Dans le tableau (III.1) on retrouve les valeurs de a et b classiques.

En général dans les latitudes moyennes la relation $Z = 200 \cdot R^{1,6}$ est utilisée dans la pluie et $Z = 2000 \cdot R^2$ dans la neige. Il s'agit de la relation de Marshal-Palmer.

Pluie stratiforme	$Z = 200 \cdot R^{1,6}$
Pluie orographique	$Z = 31 \cdot R^{1,71}$
Nuages convectifs	$Z = 286 \cdot R^{1,37}$
Neige	$Z = 2000 \cdot R^2$

Tableau III.2 : Relation Z-R pour diverses situations

III.4.2. Échelle R versus intensités des précipitations

Les valeurs obtenues par la relation Z-R permettent de déterminer l'intensité de la pluie (selon le FAA américain):

- Légère, moins de 2 mm/h (pluie) et moins de 1 cm/h (neige)
- Modérée, de 2 à 7 mm/h
- Forte, plus de 7 mm/h
- Très forte, plus de 16 mm/h
- Intense, plus de 32 mm/h
- Extrême, plus de 64 mm/h

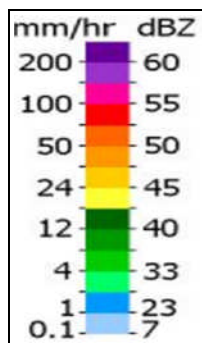


Figure III.6 : Légende de couleur sur un Radar météorologique avec dBZ et mm/h pour de la pluie

III.5.VITESSE RADIALE DOPPLER

Les Radars météorologiques modernes mesurent la vitesse de déplacement des précipitations en utilisant l'effet Doppler-Fizeau. Ce dernier est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. On peut de manière alternative noter la différence de phase entre deux impulsions successives émises et retournées par les cibles.

Le décalage ne donne cependant que le déplacement par rapport au Radar, soit la composante radiale de la vitesse. Les valeurs les plus grandes sont lorsque le Radar «regarde» dans la même direction que le mouvement et les plus petites se trouvent dans les directions tangentiels à celui ci. La valeur de la composante radiale Doppler est positive quand la cible s'approche du Radar et négative quand elle s'en éloigne.

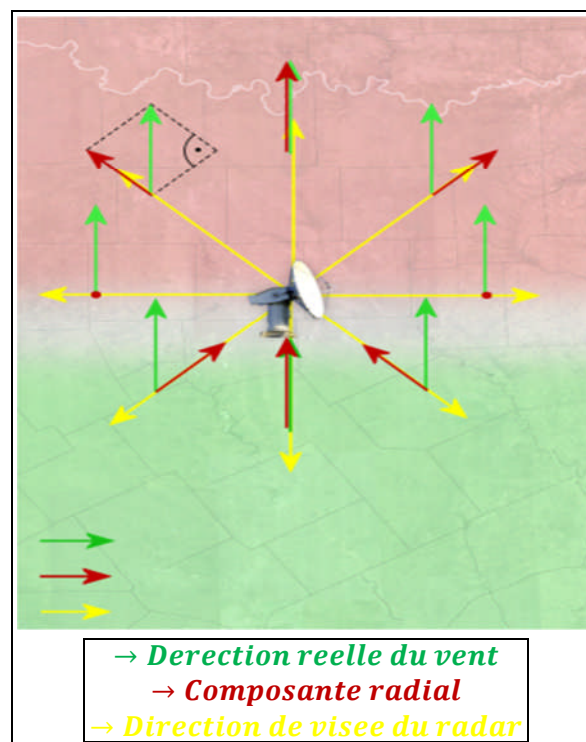


Figure III.7: Explication de la vitesse radiale

Les précipitations ne sont pas des cibles ponctuelles mais plutôt volumiques ce qui veut dire que la vitesse notés est celle moyenne dans le volume sondé. De plus, les précipitations couvrent de grandes superficies qui permettent de voir la composante radiale de plusieurs directions. Si les précipitations couvrent une bonne partie de l'écran cela permet d'estimer les vraies directions et intensités du déplacement des gouttes ou flocons. Comme ils ont une très faible masse, ils se déplacent plus ou moins à la vitesse du vent. On peut ainsi estimer la vitesse et la direction de vent autour du Radar par l'analyse de l'image des données Doppler.

Les précipitations se déplacent avec le vent et permettent d'obtenir des informations sur sa direction et sa vitesse grâce aux données Doppler. En air clair près du sol, le déplacement des insectes peut être aussi perçu par un Radar météorologique et donner le déplacement des brises de mer et des fronts de rafales sortant des orages.

Dans un cas de pluie stratiforme, le sondage permettra d'obtenir la direction et la vitesse de vent à différentes altitudes, comme si on avait fait un radiosondage. En situation convective, il peut détecter des rotations dans les nuages qui peuvent être associées avec des tornades. Il peut également repérer des zones de convergence ou de divergence de vent près du sol associés avec de la forte turbulence.

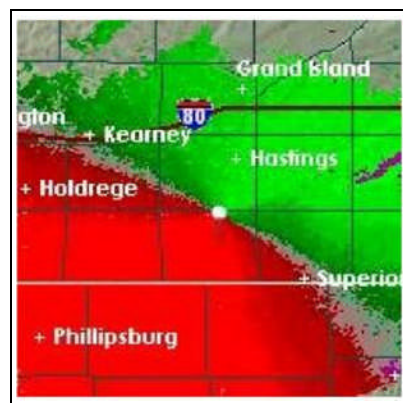


Figure III.8 : Affichage de vitesse Doppler pour un Radar météorologique

La figure (III.8) montre un dégradé de couleur proportionnel à la composante radiale de la vitesse de déplacement des gouttes de précipitations dans un cas réel simple. Le Radar est placé au centre et par convention, le bleu/vert est utilisé pour les vitesses qui s'approchent, alors que le rouge pour celles qui s'éloignent. La ligne grise de gauche à droite montre la ligne de vitesses radiales nulles.

Ces exemples sont très simples, dans une situation réelle, le vent peut varier d'un endroit à l'autre et l'image demandera un examen plus détaillé. Cependant, en se rappelant qu'on a la composante radiale en tout point, un utilisateur peut obtenir beaucoup d'information météorologique.

III.5.1. 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 la vitesse 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 [14].

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).

La vitesse peut être exprimée par la relation suivante :

$$v = k \arg \sum_{n=1}^{N-1} [Z_n^* Z_{n+1}] \quad (\text{III.15})$$

Où :

K : constante spécifiée.

arg[] : l'argument ou angle de la quantité.

Z : signal complexe de la forme $Z = I + jQ$.

Z* : conjugué de Z, $Z^* = Z - jQ$.

n : index de séquences d'échantillons.

N : nombre total d'échantillons.

En raison de la nature discrète de l'échantillonnage, la vitesse angulaire du vecteur représenté par Z est mesurée comme une différentielle. Par exemple : soit un vecteur donné $Z = 3 + 3j$ dans le premier quadrant comme indiqué sur la figure (III.9.a).

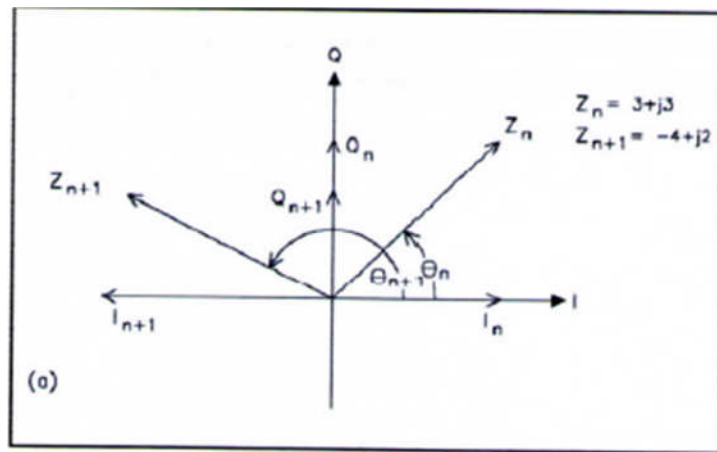


Figure. III.9.a : Représentation vectorielle de deux échantillons complexes consécutifs (I, Q)

Considérons qu'après un temps PRT, le prochain échantillon $Z_{n+1} = -4-2j$ apparait dans le second quadrant correspondant à un déplacement de 108° entre les échantillons. Il résulte de la multiplication complexe du deuxième échantillon Z_{n+1} et du conjugué du premier Z_n^* , un vecteur dont l'amplitude est égale au produit des deux amplitudes et dont l'angle est égal à la différence d'angle entre Z_n et Z_{n+1} ou le déplacement du vecteur par PRT comme indiqué sur la figure (III.9.b).

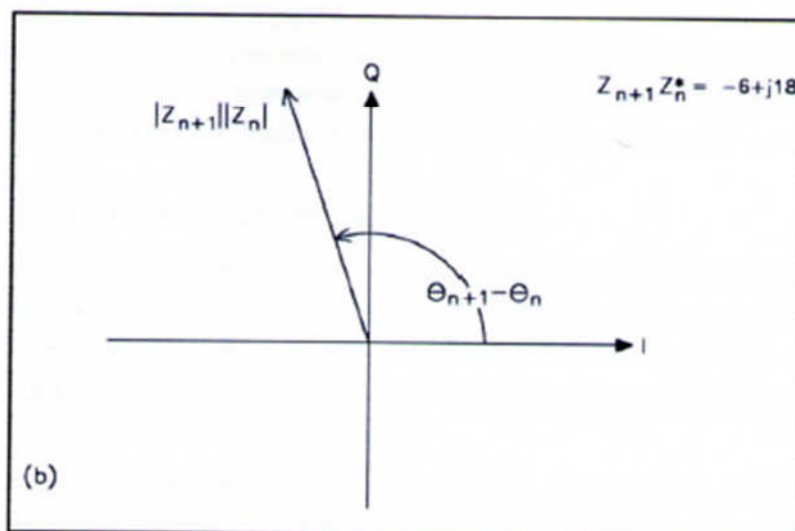


Figure III.9.b : Résultats de la multiplication complexe

III.6 .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.

La première partie de ce chapitre a été consacrée 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 réfléchiée des particules de précipitations dans un volume élevé. La seconde partie représente la mesure de vitesse Doppler de déplacement des précipitations.

IV.1.INTRODUCTION

Il y a eu le développement des Radars météorologiques à effet Doppler terrestre. Ce type de Radar est utilisé pour la détection et l'estimation des différents paramètres de ce phénomène (vitesse, largeur, direction, etc...). L'élément clé de ce système est celui de la haute résolution obtenue par l'utilisation des techniques récentes du traitement numérique du signal, pour l'extraction et l'analyse des échos météorologiques reçus.

La présente étude traite principalement de l'estimation des moments spectraux et de l'analyse d'un spectre de Radar Doppler reçu représentant une micro-rafale de vent. L'estimation de la vitesse du cisaillement de vent, sa variance et sa largeur spectrale se feront via les méthodes pp (Pulse-pair), FFT (Fast Fourier Transform).

Tout ce travail sera accompli sous l'environnement Matlab pour faire une simulation de spectre Doppler et les deux signaux I et Q, ainsi l'estimation de taux de précipitation par l'estimation de la réflectivité.

IV.2. ETUDE ET SIMULATION DE L'ACQUISITION DES SIGNAUX RADAR Z (K T S)

Le schéma du principe de fonctionnement d'un Radar pulse Doppler météorologique est donné ci-dessous, dans la figure IV.1 [2]:

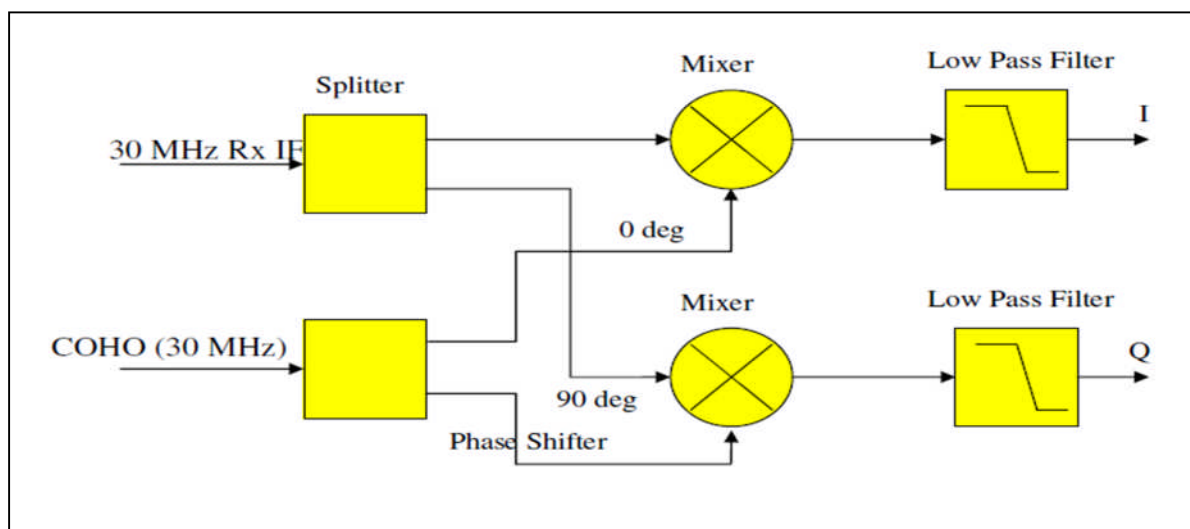


Figure IV .1 : La chaîne d'acquisition du signal d'un Radar pulse Doppler Météorologique terrestre de type TDWR

Ce signal sera ensuite réfléchi par la cible, c'est à dire la masse d'air qui constitue un cisaillement de vent et qui présente un changement de vitesse radiale moyenne v_r , allant de 5 à 50 m/s, Notons que la portée effective de ce type de radar est de $R_{MAX} = \frac{c}{2.PRF}$.

Le signal réfléchi sera de même nature que le signal émis sauf qu'il aura un $2v_r$, changement de fréquence appelée fréquence Doppler $f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$ correspondante à la fréquence engendrée par le déplacement de la perturbation du vent. En plus du signal utile ($f_e + f_d$) on a supposé un bruit de fond blanc gaussien pour simuler les échos fixes (cutter sol).

Après réception du signal retourné par la masse d'air au niveau du duplexeur, ce dernier sera ensuite modulé sans porteuse, c'est à dire qu'il est multiplié une fois par le signal d'origine (émis (f_e)) déphasé de 90° et une deuxième fois par le signal lui-même sans déphasage 0° , voir les figures IV.1 et IV.2, et en utilisant deux filtres qui ont des fréquences de coupures respectivement de f_d et $2.f_e + f_d$. Les deux voies I et Q sont ainsi générées comme l'illustre la figure IV.1, et le prélèvement des valeurs de ces deux voies pour les besoins de simulation s'effectuera entre deux émissions successives séparées d'une fréquence de répétition $PRF=2000$ H z.

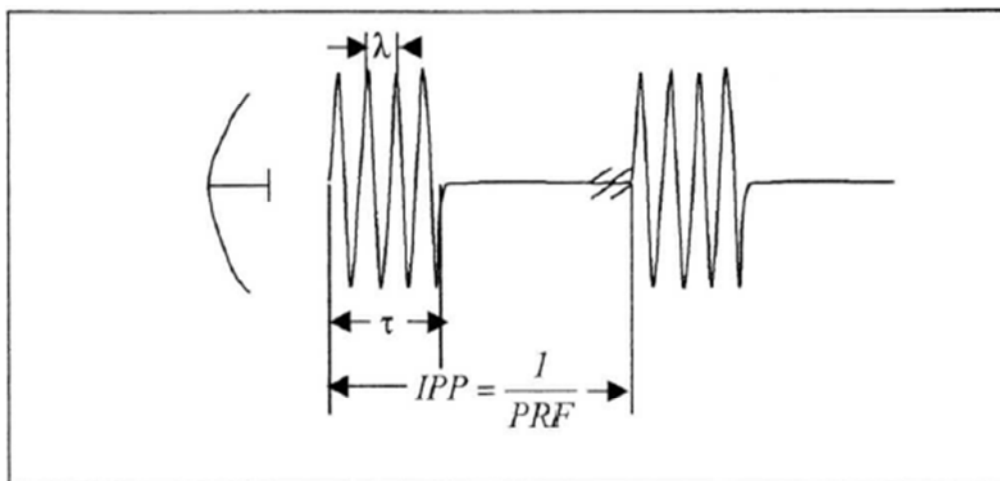


Figure IV.2 : Le signal émis par le Radar pulse Doppler météorologique

Dans cette partie on a élaboré un programme de génération des signaux I (en phase) et Q (Quadrature de phase) avec la supposition d'une certaine distribution statistique Gaussienne modélisant le spectre de puissance des échos météorologiques reçus du cisaillement de vent.

IV.3. ESTIMATION DE SPECTRE DOPPLER

L'évaluation de spectre Doppler d'un signal Radar météorologique d'une manière classique peut être faite par deux méthodes, le temporel basé dans l'autocorrélation des signaux réussis, considérant que l'autre emploie l'évaluation de la densité spectrale PSD de puissance en employant transforme de Fourier, 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 qui perturbe le message Radar transmis est un processus de bruit blanc gaussien Cette hypothèse n'est pas sans fondement. D'une part, le bruit thermique produit par les composantes de l'émetteur et du récepteur est représenté adéquatement par une variable aléatoire gaussienne. D'autre part la théorie des probabilités nous enseigne que la densité de probabilité de la somme de n variables aléatoires indépendantes tend vers une densité gaussienne quand n croît indéfiniment. Ce principe peut être utilisé dans le cas des systèmes de communications car l'on peut imaginer biens des situations où une multitude de phénomènes aléatoires indépendants combinent leur effet pour perturber le canal de transmission.

Le bruit blanc gaussien est un bruit 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° . Ce qui signifie qu'on a réellement un seul signal et l'autre (Q) est identique au signal (I) mais

seulement décalé de $\frac{\pi}{2}$, 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.

IV.4. ESTIMATION DES MOMENTS SPECTRAUX [10]

Le Radar pulsé doppler délivre les tensions en sortie, I en phase et Q en quadrature de phase qui forment l'écho complexe $Z(I, Q)$. La densité spectrale de puissance est donnée par la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation $R_{ZZ}(\tau)$.

$$S_Z(f) = \mathfrak{F}\{R_{ZZ}(\tau)\} \tag{IV.1}$$

Le spectre Doppler reçu aura la forme représentée sous la figure IV.3.

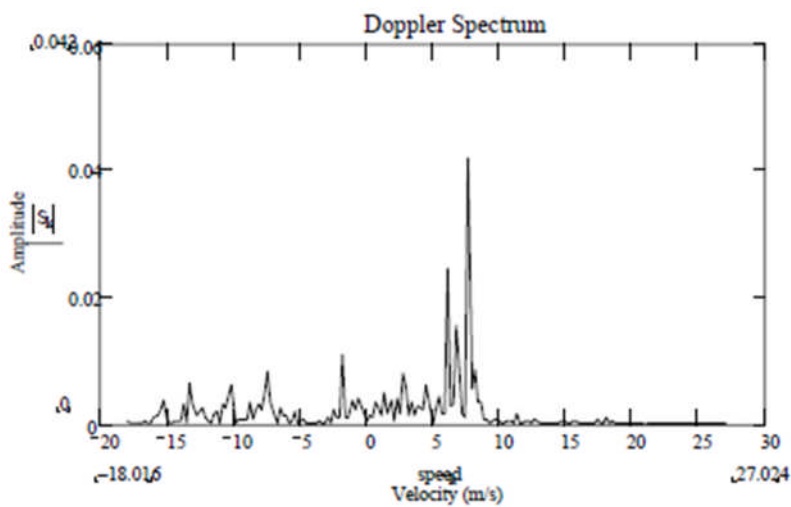


Figure IV.3 : Spectre Doppler reçu pour une cellule de distance

Le spectre Doppler reçu représente la densité spectrale de puissance du signal reçu pour un volume de détection. Par ailleurs la puissance totale de l'écho, sans prendre en compte la puissance du bruit est donnée par la fonction du moment d'ordre zéro:

$$P = \int S(v) dv \tag{IV.2}$$

La vitesse moyenne ou le moment normalisé d'ordre un est donné :

$$\bar{v} = \frac{1}{p} \int v S(v) dv \quad (\text{IV.3})$$

La largeur spectrale de la vitesse moyenne du spectre Doppler est donnée par la racine carrée du moment central de second ordre normalisé:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{p} \int (v - \bar{v})^2 S(v) dv \quad (\text{IV.4})$$

Le spectre Doppler $S(f)$ peut s'écrire en fonction de la vitesse comme $S(v)$ en utilisant la relation entre la vitesse et la fréquence Doppler avec λ est la longueur d'onde du signal émis :

$$\hat{v} = \left(\frac{\lambda}{2}\right) f \quad (\text{IV.5})$$

De la même manière, on peut écrire la relation entre la largeur spectrale de la vitesse moyenne et la déviation standard du spectre Doppler par:

$$\hat{w} = \left(\frac{\lambda}{2}\right) \sigma_f \quad (\text{IV.6})$$

IV.5. MODELISATION GAUSSIENNE DES ECHOS RADAR

Le signal de retour au Radar à partir d'une porte à distance est généré car a rétrodiffusion d'un grand nombre de particules distribuées aléatoirement et/ou par des variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Le processus du signal reçu peut alors, être considéré (théorème de la limite centrée) ou approximé par un processus aléatoire gaussien [3].

En outre, les signaux météorologiques, dans les zones où la réflectivité est uniforme (élevations moyennes), devraient avoir des spectres ressemblant beaucoup à des fonctions gaussiennes.

Par ailleurs, l'écho Radar d'une perturbation météorologique est processus supposé stationnaire. Il est caractérisé par la densité spectrale de puissance (PSD) de la distribution statistique gaussienne donnée par l'expression [8]:

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{IV.7})$$

f : est la fréquence utilisée par le Radar, [Hz].

f_d : est la fréquence Doppler de la perturbation météorologique, [Hz].

σ : est la largeur du spectre, [Hz].

La relation entre la fréquence Doppler f_d et les vitesses radiales v de déplacement de la perturbation est :

$$f_d = 2 \frac{v}{\lambda} \quad (\text{IV.8})$$

Et la relation entre l'étendue du spectre σ est celle de la vitesse radiale σ_v , est :

$$\hat{\sigma} = 2 \frac{\sigma_v}{\lambda} \quad (\text{IV.9})$$

IV.6. GENERATION DES DONNEES DE SIMULATION

Les techniques de simulation sont utilisées dans divers domaines d'engineering pour déterminer le comportement d'un système sous diverses conditions défavorables. Avec l'avènement d'ordinateurs de plus en plus puissants et rapides, la puissance de ces techniques s'est considérablement accrue.

En ce qui nous concerne, nous avons utilisé la technique de génération des signaux et spectres Doppler météorologiques qui pourraient être utilisés par un Radar Doppler météorologique. Pour cela, certaines hypothèses doivent être posées [8] :

- Le spectre d'un écho météorologique est à bande étroite, contrairement à celui du bruit (principalement thermique) du récepteur du Radar qui est, lui, à bande large.
- La puissance du signal météorologique est plus élevée que celle duit du récepteur
- Les propriétés statistiques de l'écho météorologique et celles du bruit du récepteur sont presque similaires.

Pour une porte en distance considérée le i^{eme} échantillon des composantes phases I et en quadrature Q peut s'écrire.

$$\begin{cases} I(i) = S(i) \cos(\varphi(i)) + n(i)\cos(\varphi(i)) \\ Q(i) = S(i) \sin(\psi(i)) + n(i)\sin(\psi(i)) \end{cases} \quad (IV.10)$$

Où

$s(i)$: Enveloppe du signal atmosphérique

$\varphi(i)$: Phase uniformément distribuée du signal $s(i)$

$n(i)$: Enveloppe du bruit.

$\psi(i)$: Phase uniformément distribuée du bruit $n(i)$

L'expression (IV.10) peut, aussi, être écrite comme suit :

$$I(i) + jQ(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_k e^{j\theta_k} e^{-j\frac{2\pi}{n}ki} \quad (IV.11)$$

Où P_k désigne la puissance instantanée et θ_k désigne la phase instantanée du signal augmenté du bruit.

L'ordonnancement des étapes de l'algorithme est le suivant :

1-Générer le spectre de puissance d'un signal de forme arbitraire S_k .

2- Choisir la puissance N du bruit de manière à avoir un taux du signal au bruit.

$$SNR = \frac{signal}{Bruit} = \frac{1}{nN} \sum_{k=1}^n S_k \quad (IV.12)$$

Où nN représente la puissance totale du bruit.

3- Pour chaque fréquence du spectre, ajouter au spectre le SNR correspondant puis multiplier le tout par le logarithme d'une variable aléatoire $X_k = 0$ à 1 pour obtenir la composante P_k de la puissance spectrale désirée.

$$P_k = (S_k + N) \ln(X_k) \quad (\text{IV.13})$$

IV.7.ROUTINE DE GENERATION DES DONNEES RADAR

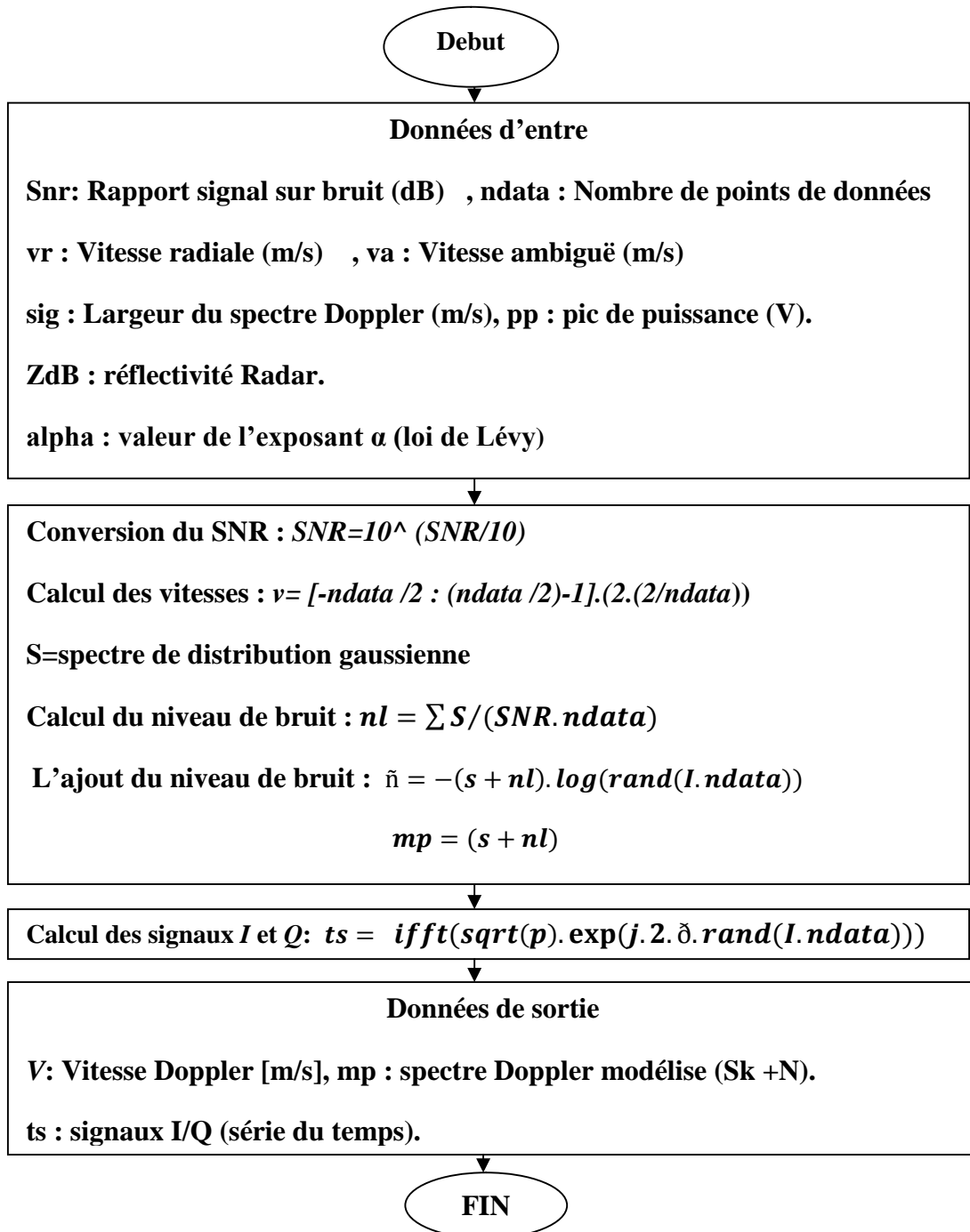
Nous employons des spectres avec la forme gaussienne avec des moments d'ordre zéro, un et deux pour. Nous devrions produire le spectre Doppler et ce en employant l'algorithme de **Zrnic**, pour produire les signaux Radar **I** et **Q**.

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 noir » de la figure (IV.4) or la réalité est tout autre vu la nature omniprésente du bruit, ce qui nous a amené à bruiteur notre spectre par un bruit blanc, la superposition du signal et du bruit est donnée par le spectre « en bleu » de la figure (IV.4). Notons que ces opérations ont lieu dans le domaine fréquentiel d'où le passage vers le domaine temporel exige l'application de la transformée de Fourier inverse donnant naissance aux séries temporelles **I** et **Q** illustrées dans la figure (IV.4). On donne également les caractéristiques Radars utilisés pour la simulation.

Les variables d'entrée pour notre routine devraient inclure le rapport signal sur bruit (SNR), la vitesse radiale vr , n_{data} nombre des points de données, la vitesse ambiguë va , la largeur spectrale ν . et la puissance du signal émis pp ainsi que la réflectivité Radar dBz. Les données en sortie doivent être, les vitesses Doppler, le spectre Doppler et les signaux **I** et **Q** (séries temporelles) [17].

- $f_i = 2.85 \cdot 10^9$ Hz (fréquences du signal émis).
- $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f_i$ m (longueurs d'onde du signal émis).
- $T_s = 1/PRF$, $PRF=1000$ s (période d'échantillonnage PRF).
- $SNR = 12$ dB (Rapport signal sur bruit).

- **ndata = 128** (Nombre de points (échantillons)).
- **$V_r = 5 \text{ ms}^{-1}$** (vitesse radiale de l'écho).
- **$V_a = \lambda/4.T_s = 26.78 \text{ ms}^{-1}$** (Vitesse ambiguë).
- **$\text{Sig} = 2 \text{ ms}^{-1}$** (largeur du spectre Doppler).
- **$pp = 750 \cdot 10^3 \text{ Watt}$** (puissance du signal émis)



IV.7.1.Résultats De Simulation

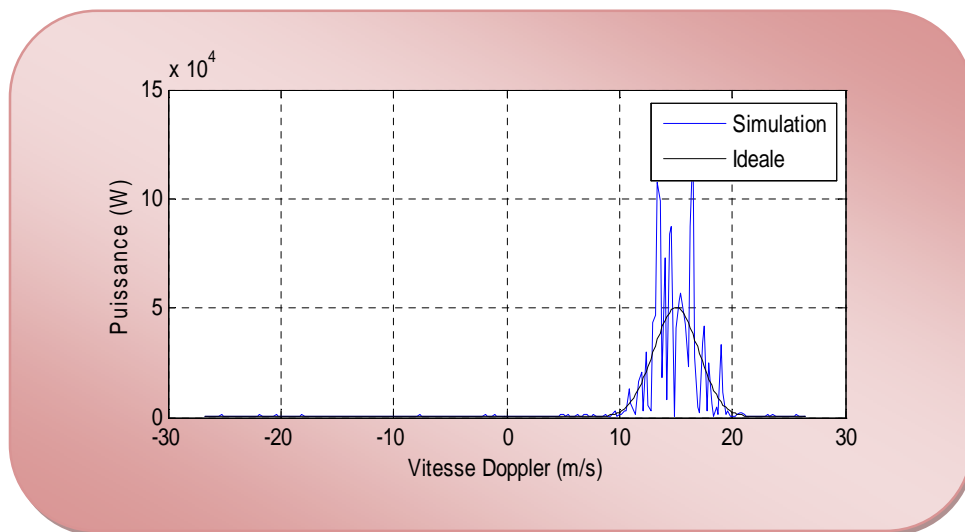


Figure IV.4 : Simulation d'un spectre pur et d'un autre bruité
(Modélisation gaussienne)

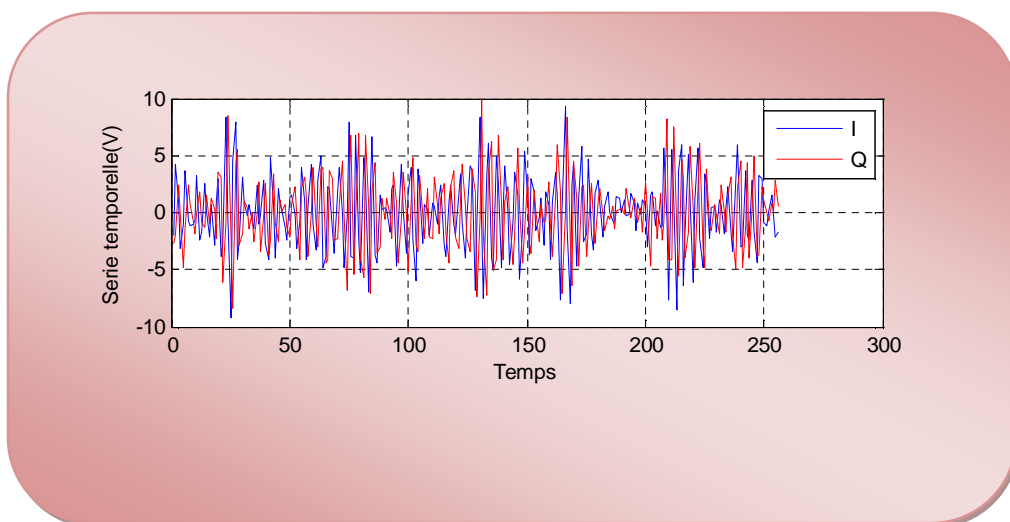


Figure IV.5 : Simulation des séquences I et Q (modélisation gaussienne)

IV.8.EFFETS DES PARAMETRES D'ENTREE

Nous nous sommes assignés à faire discuter de l'effet de chaque paramètres d'entrée de la routine de génération des données de simulation .les graphes obtenus se composent chacun de deux courbes. La courbe supérieure représente les séries temporelles I et Q. La courbe inférieure se compose du spectre idéal (sans bruit) en trait discontinu et du spectre représentant un écho atmosphérique (bruité) en trait continu. La procédure consiste à assigner à chaque paramètre, indépendamment des autres (c.à.d. un par un).

- **L'effet du rapport signal sur bruit SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q**

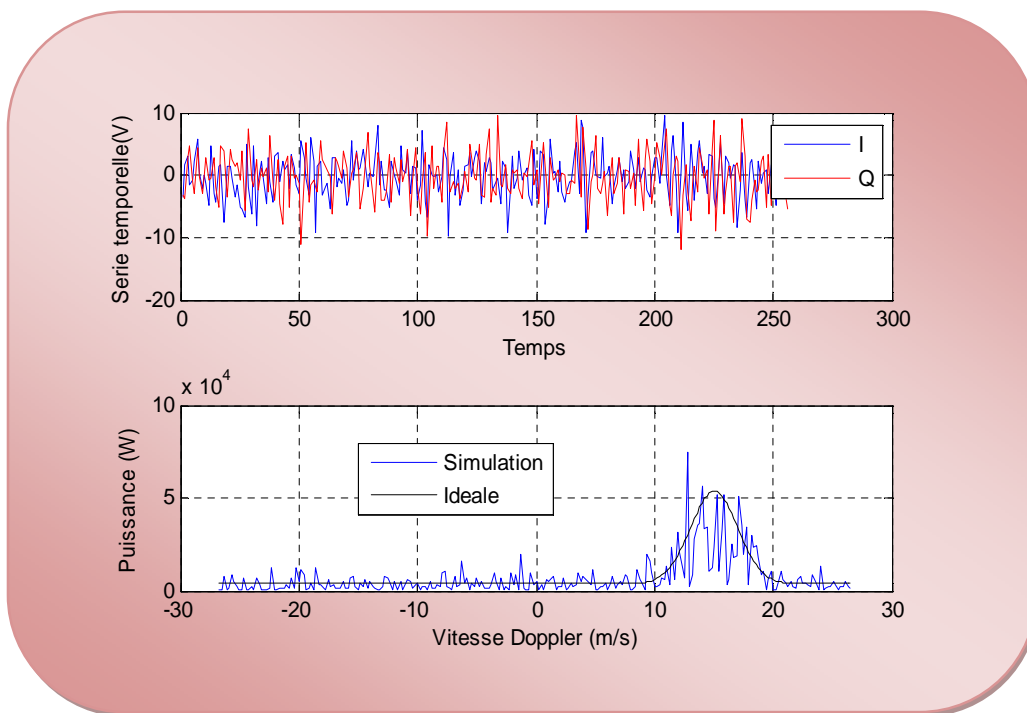


Figure IV.6.a : Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (SNR=1dB)

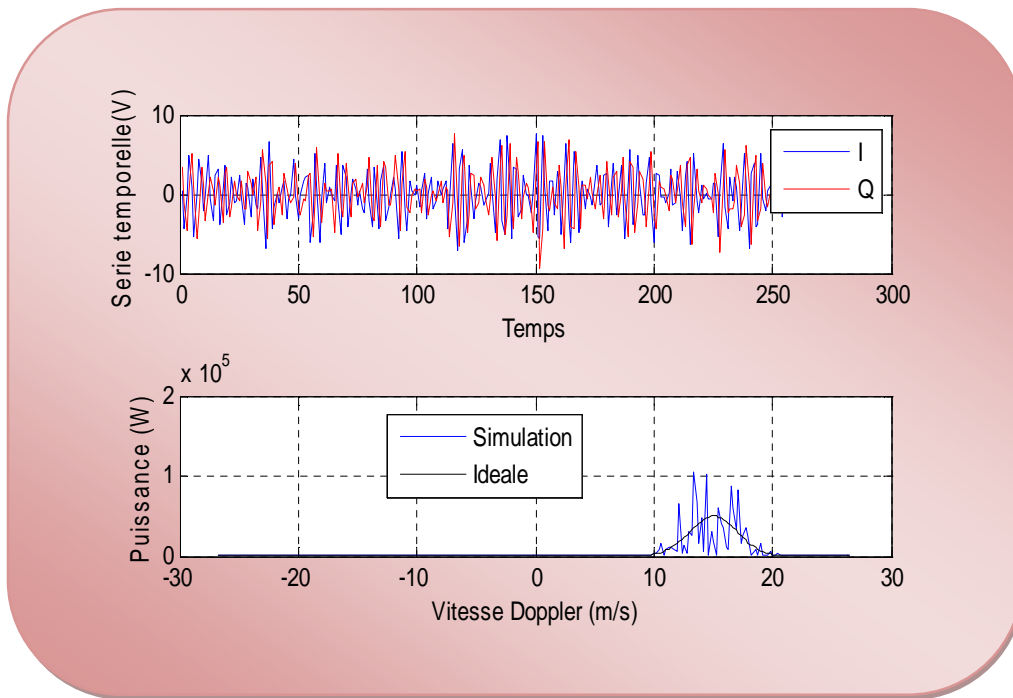


Figure IV.6.b : Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (SNR=12dB)

Ce paramètre renseigne sur le niveau du signal atmosphérique par rapport niveau du bruit, l'utilisation d'un SNR faible de l'ordre de (1dB) a provoqué un fort chevauchement des séries temporelles (I et Q), c'est à dire qu'on ne peut pas les distinguer à vue d'œil. Le spectre doppler quand à lui aussi, n'est pas à l'abri de cette influence.

Par contre, si la valeur de ce paramètre s'éloigne de l'unité (SNR=12dB) alors nous obtiendrons moins de pics secondaires, sera plus lisse et plus présentatif que l'on peut attribuer au bruit. Les signaux (I et Q) dans ce cas-là, seront mieux illustrés et plus homogènes, Cette remarque est bien illustrée par les figures (IV.6.a et IV.6.b).

- L'effet du nombre de points de données n_{data} sur le spectre Doppler et les signaux I et Q

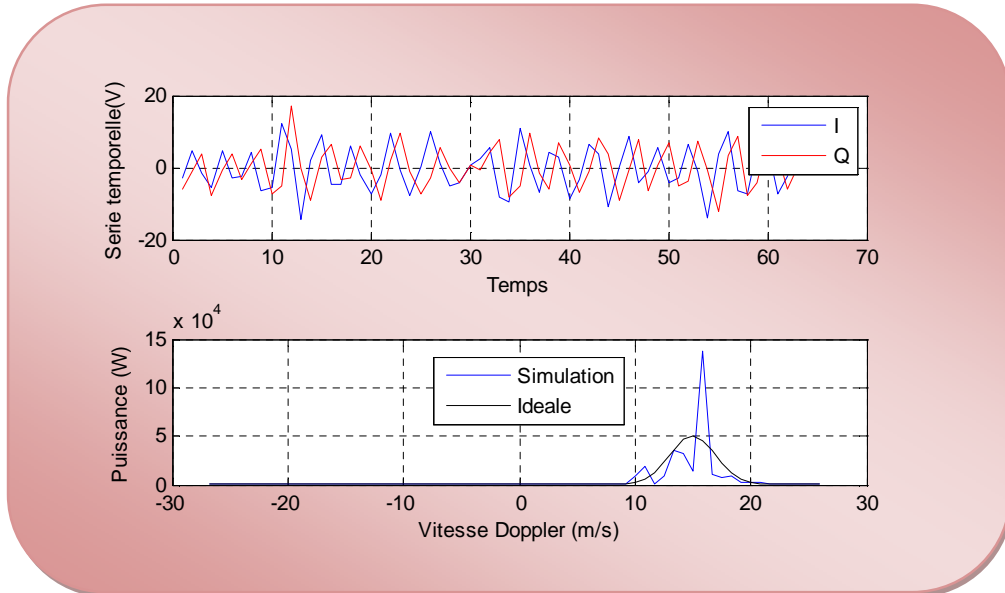


Figure IV.7.a : Effet de n_{data} sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ($n_{data}=64$)

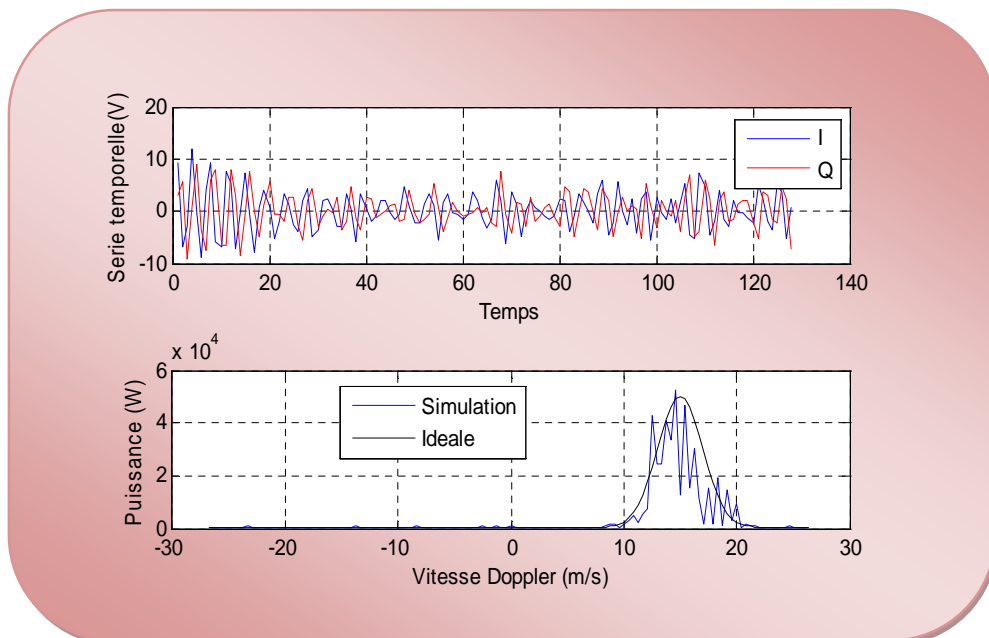


Figure IV.7.b : Effet de n_{data} sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ($n_{data}=128$)

Ce nombre, donné en puissance de deux ($n_{data}=2^n$), est directement lié à la résolution fréquentielle du spectre. L'utilisation d'un nombre limité d'échantillons a une influence directe sur la qualité des signaux générés et a une relation directe avec le temps et la cellule de distance, donc pour avoir une bonne résolution des signaux I et Q et des spectre doppler correspondant ainsi une meilleure restitution des informations transportées il faut augmenter le nombre d'échantillons utilisés.

➤ Effet de la largeur du spectre Doppler (σ)

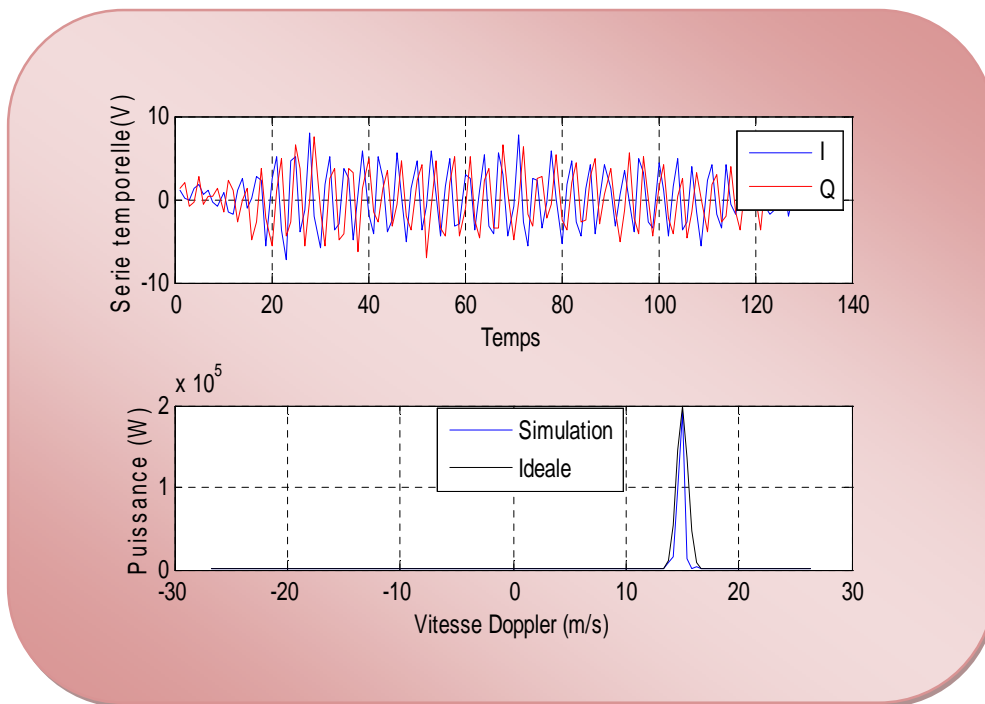


Figure IV.8.a : Effet de σ sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ($\sigma=0.5$)

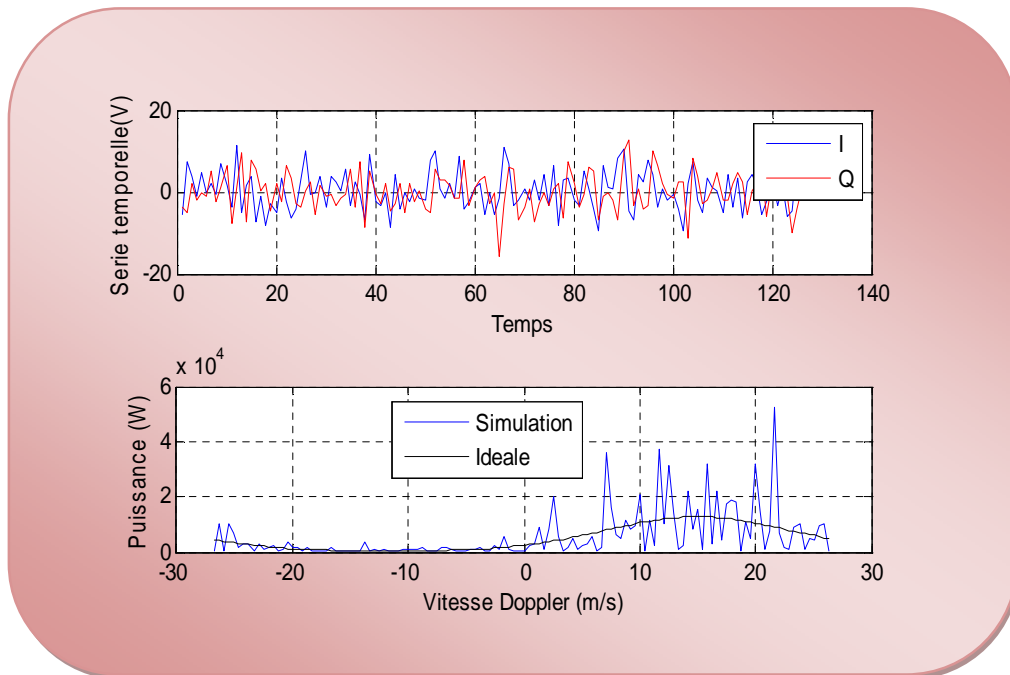


Figure IV.8.b : Effet de σ sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ($\sigma=8$)

Ce paramètre signifie un écart moyenne des variations des vitesses doppler, il mesure également la largeur du spectre considère et joue un rôle très important pour la modélisation des spectres doppler caractérisant les perturbations du vent.

Augmenter sa valeur revient à prendre en considération un plus grand éventail de phénomènes météorologiques. Au contraire, réduire sa valeur revient à sélectionner des phénomènes à prendre en compte. Cela est montré par les figures (IV.8.a) et (IV.8.b):

($\sigma = 0.5$ m/s) \Rightarrow largeur du spectre s'étend d'environs (12 à 15 m/s).

($\sigma = 8$ m/s) \Rightarrow largeur du spectre s'étend d'environs (0 à 30 m/s).

➤ Effet de la puissance de pic (pp)

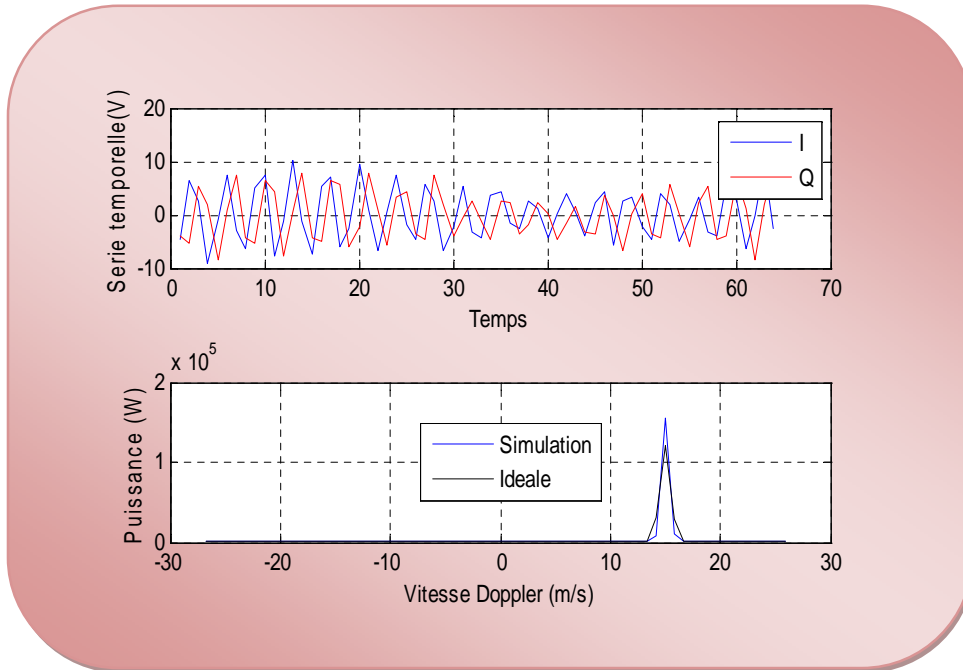


Figure IV.9.a : Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (pp=150 kW)

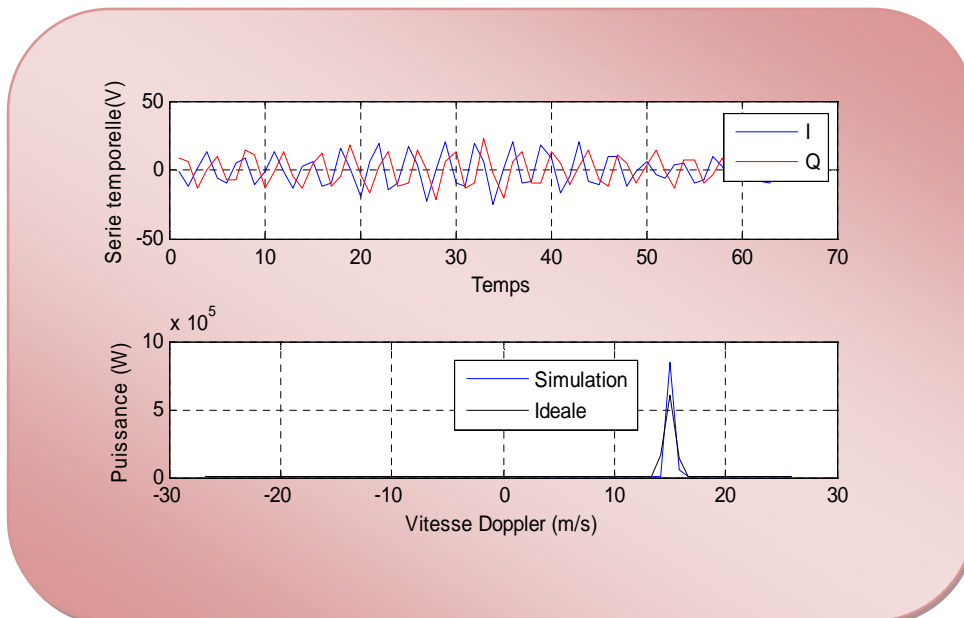


Figure IV.9.b : Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (pp=750 kW)

Le pic principal du spectre représente le maximum de puissance correspondant à la vitesse moyenne de déplacement de la perturbation météorologique détectée. L'émission d'une importante puissance par le Radar influence d'avantage sur l'augmentation de sa portée maximale, et donc sur le volume de cibles sondé. Par conséquent, un grand nombre de cibles détectées implique une importante réflectivité, et donc une puissance réfléchie intéressante.

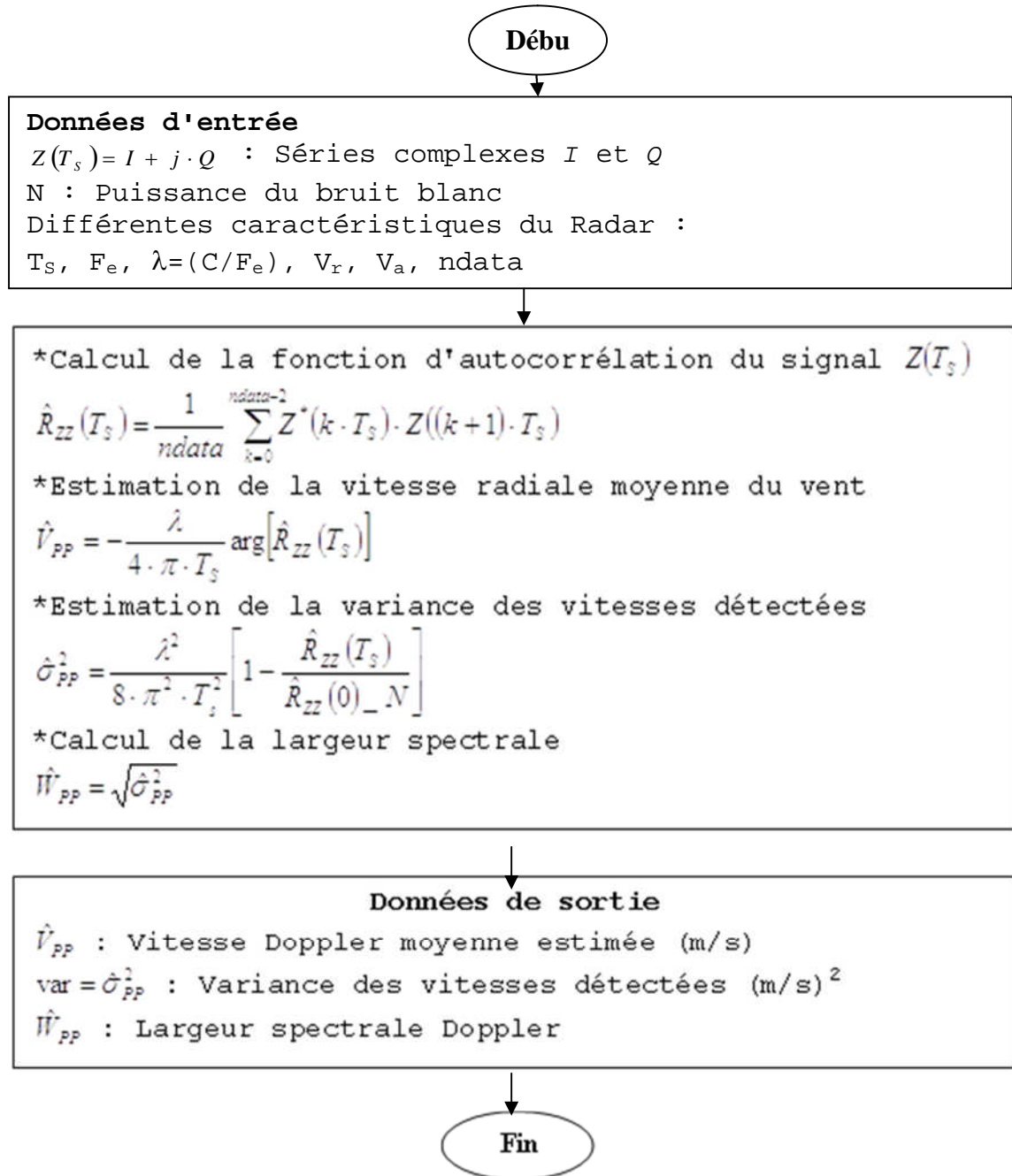
Donc si le pic de puissance augmente, l'amplitude du spectre augmente et l'inverse est vrai, comme on peut le vérifier sur les figures (IV.9.a) et (IV.9.b).

($P_p=150$ kW) \Rightarrow l'amplitude du spectre doppler revient égale ($1.198 \cdot 10^5$ W).

($P_p=750$ kW) \Rightarrow l'amplitude du spectre doppler revient égale ($5.989 \cdot 10^5$ W).

IV.9. ESTIMATION TEMPORELLE (Pulse Pair)

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 $Z(kTs)$ [15].



IV.9.1.Résultats De Simulation

Nous effectuons une comparaison entre la vitesse Doppler v_r introduite et la vitesse Doppler estimée, est nous estimons aussi la largeur de spectre et la variance.

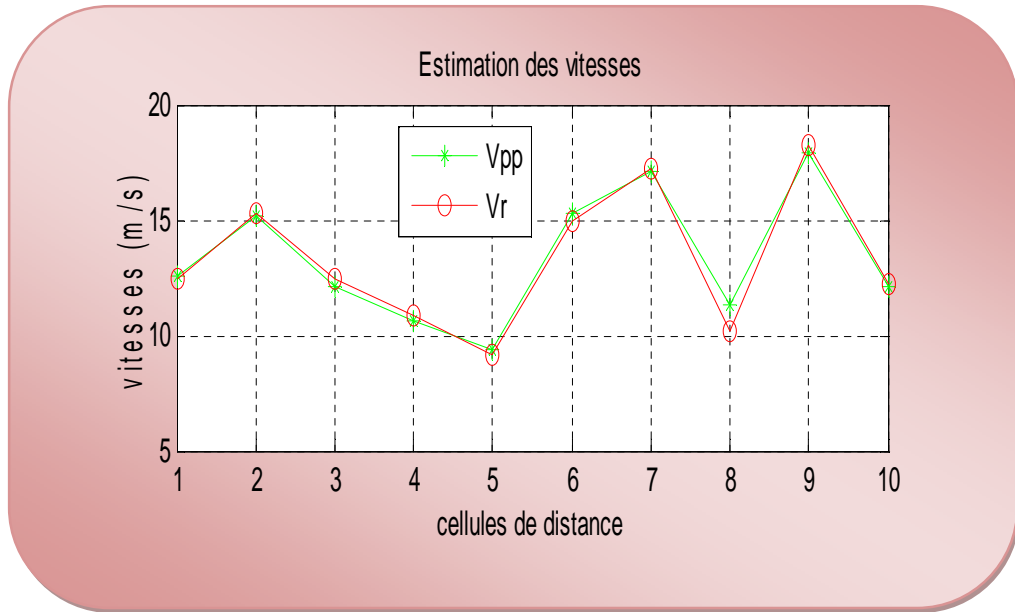


Figure IV.10 : Estimation de la vitesse Doppler radiale moyenne par la méthode Pulse Pair (Données de simulation)

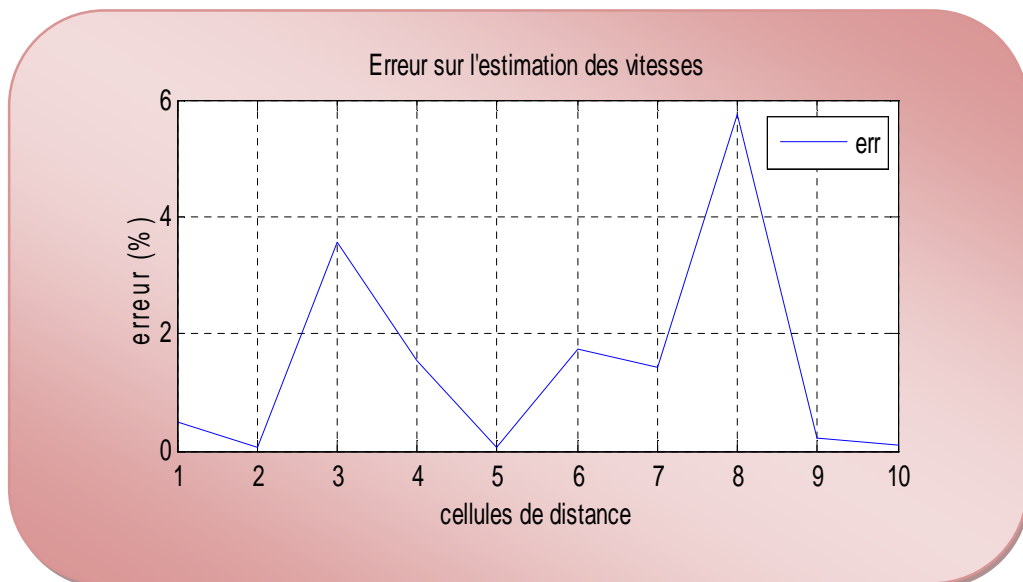


Figure IV.11 : L'erreur sur l'estimation des vitesses par la méthode Pulse Pair (Données de simulation)

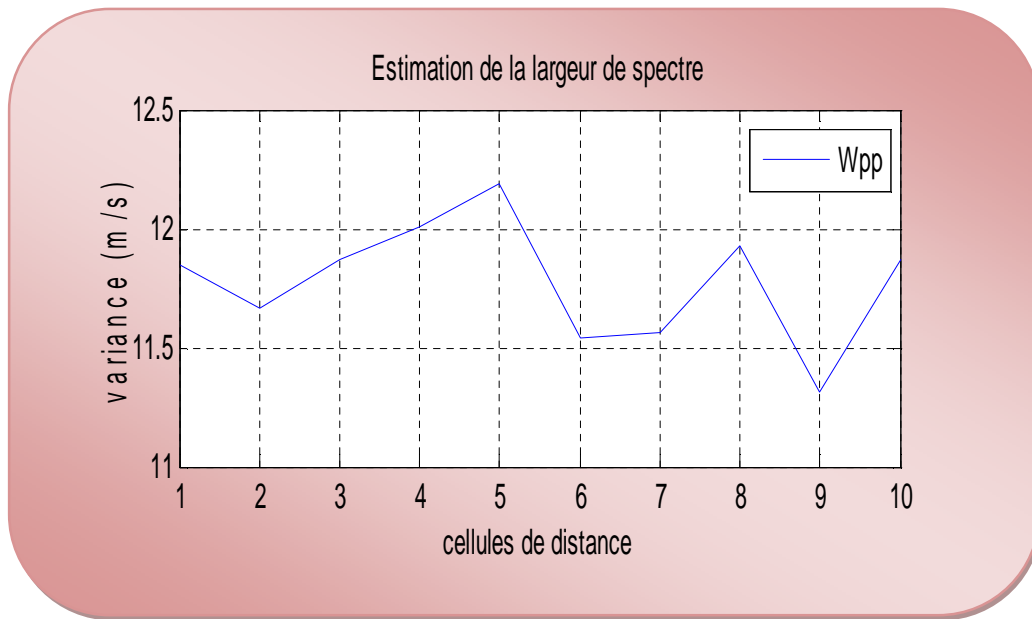


Figure IV.12 : Estimation de la largeur spectrale de la vitesse Doppler radiale moyenne par la méthode Pulse Pair (Données de simulation).

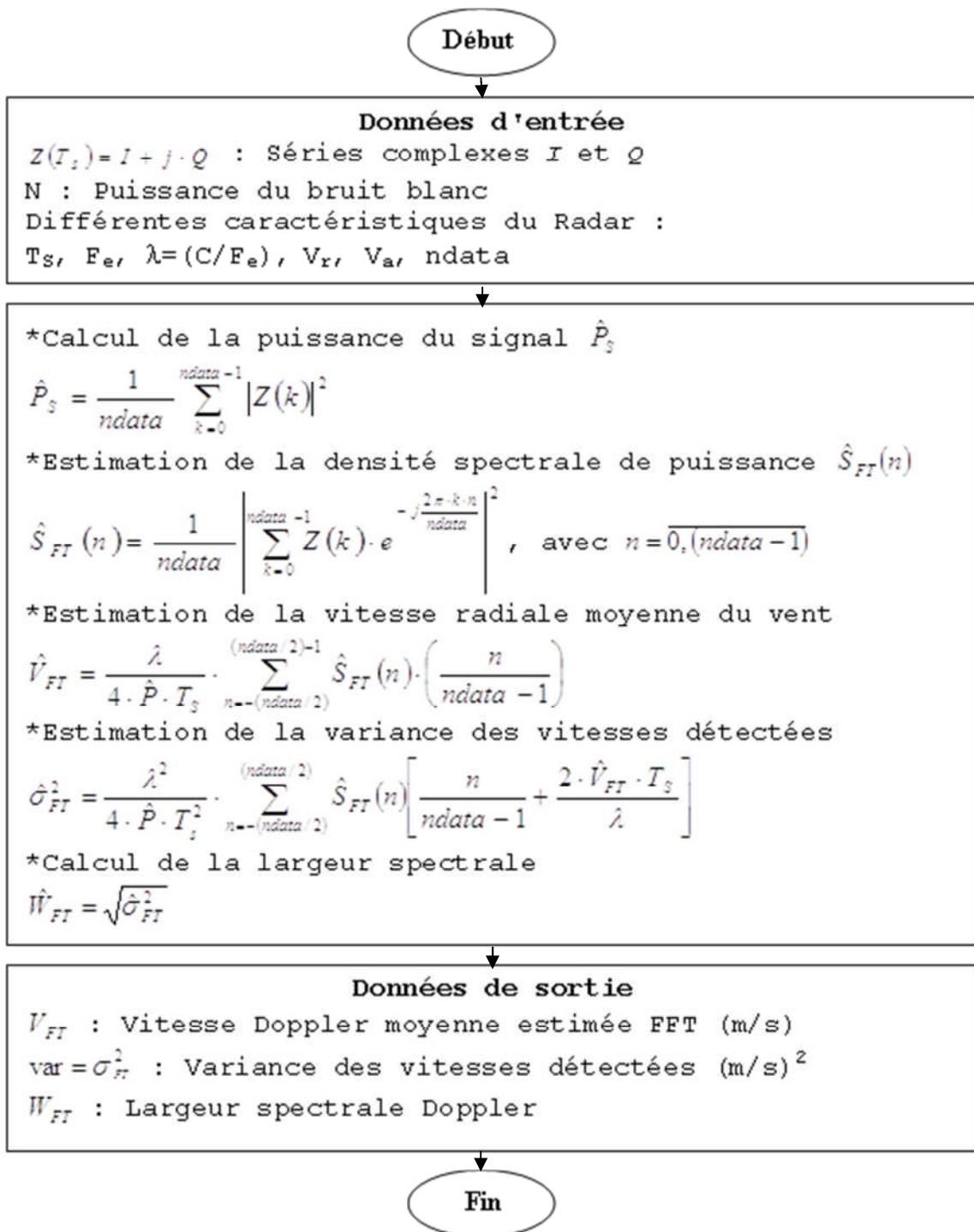
IV.9.2. Interpretation

On voit bien que l'estimation de la vitesse radiale moyenne doppler suit les vitesses de référence qu'on a posée antérieurement grâce au générateur de **Zrnic**. Un résultat qui peut être justifié par le taux d'erreur qui ne dépasse pas généralement les (6%) par contre l'estimation de la largeur du spectre fluctue lentement d'une cellule distance à une autre (11,42(m/s)→12,2 (m/s)).

En effet, on peut adapter cette méthode pour l'estimation des phénomènes météorologique dangereux aux alentours des aéroports pour deux raisons fondamentales : la premier est la vitesse de son exécution (0,0468 (s)), la seconde est l'étendue de sa largeur spectrale qui permet une détection des phénomènes bien précis.

IV.10. ESTIMATION SPECTRALE (Fourier)

Une autre alternative d'estimation de la vitesse moyenne v_{pp} , de la variance σ_v , et de la largeur du spectre w_{pp} Doppler reçu peut être formulée par l'estimation de la densité spectrale de puissance via la transformée de Fourier discrète, comme [15]:



VI.10.1.Résultats De Simulation

L'estimation spectrale de la vitesse radiale Doppler par la méthode de Fourier a donné les résultats suivant :

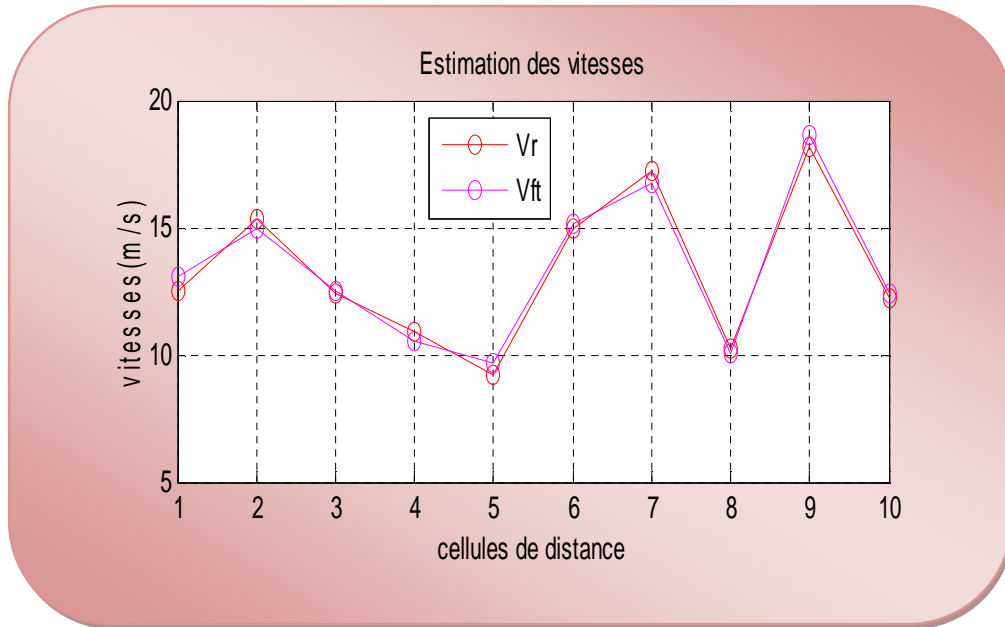


Figure IV.13: Estimation de la vitesse Doppler radiale moyenne par la méthode de Fourier (Données de simulation)

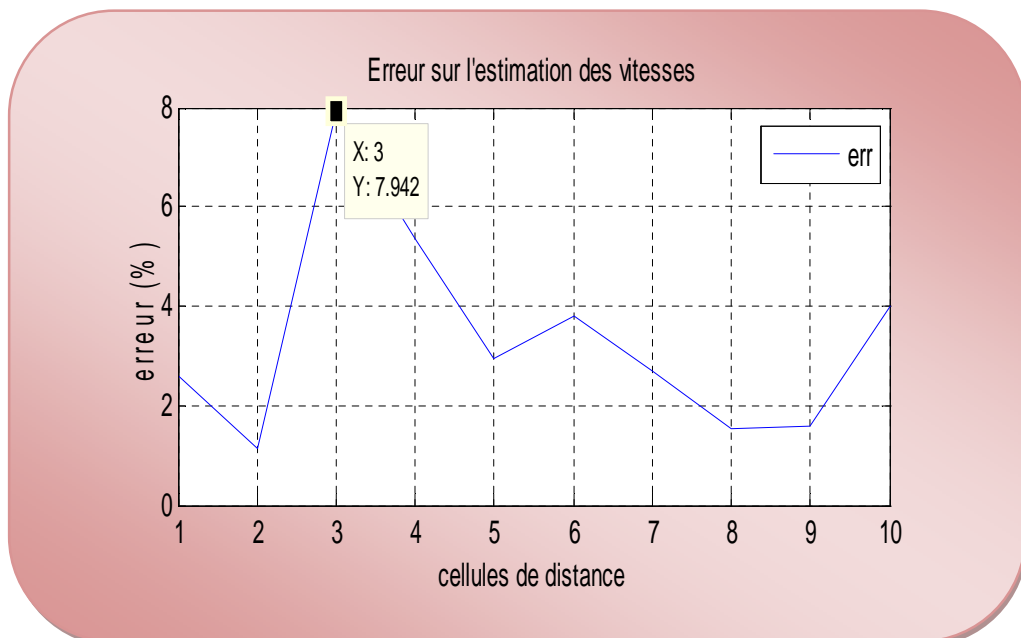


Figure IV.14: L'erreur sur l'estimation des vitesses par la méthode de Fourier (Données de simulation)

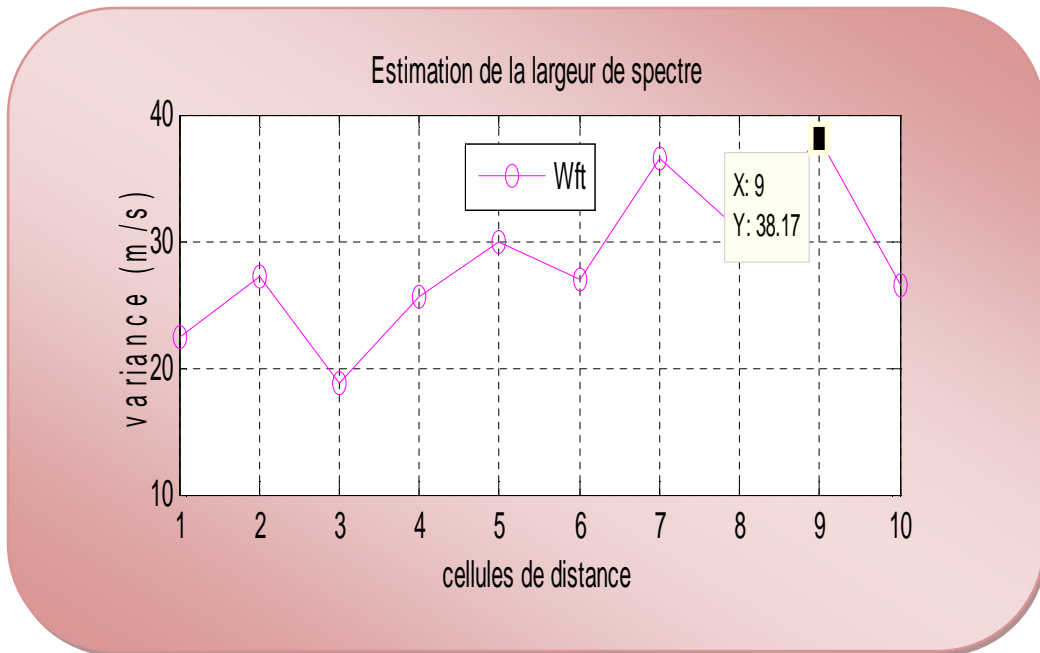


Figure IV.15: Estimation de la largeur de spectre par la méthode de Fourier (Données de simulation)

IV.10.2. Interprétation

Contrairement à la méthode pulse pair qui se base sur le calculs directs et simples de la fonction d'autocorrélation des séries temporelle (I, Q), l'algorithme de Fourier et eu se basant sur la TFD des séries (I, Q), il donne des estimations moins précises par rapport à celle de pulse pair avec des temps d'exécution un peu plus importants (0,1872), ce qui la rend un peu fiable pour les phénomènes critiques (taux d'erreur <7%).

Tandis que la largeur du spectre dans ce cas-là est plus importante (18,84→39,47 (m/s)) permettant ainsi une détection de plusieurs phénomènes.

IV.11.Comparaison Entre La Méthode Pulse Pair Et La Méthode Fourier

Comme on a discuté sur les performances de chaque estimateur indépendamment des autres, Nous avons faire une comparaison entre les méthodes d'estimation pulse pair et Fourier donne le tableau suivant :

Méthodes Paramètres	Pulse pair	Fourier
Temps d'exécution (s)	0.0468	0.1872
Erreur relative max (%)	6	7
Largeur du spectre max (m/s)	12.2	39.47

Tableau IV.1 : Comparaison de différentes méthodes utilisées

VI.11.1.Résultats De Simulation

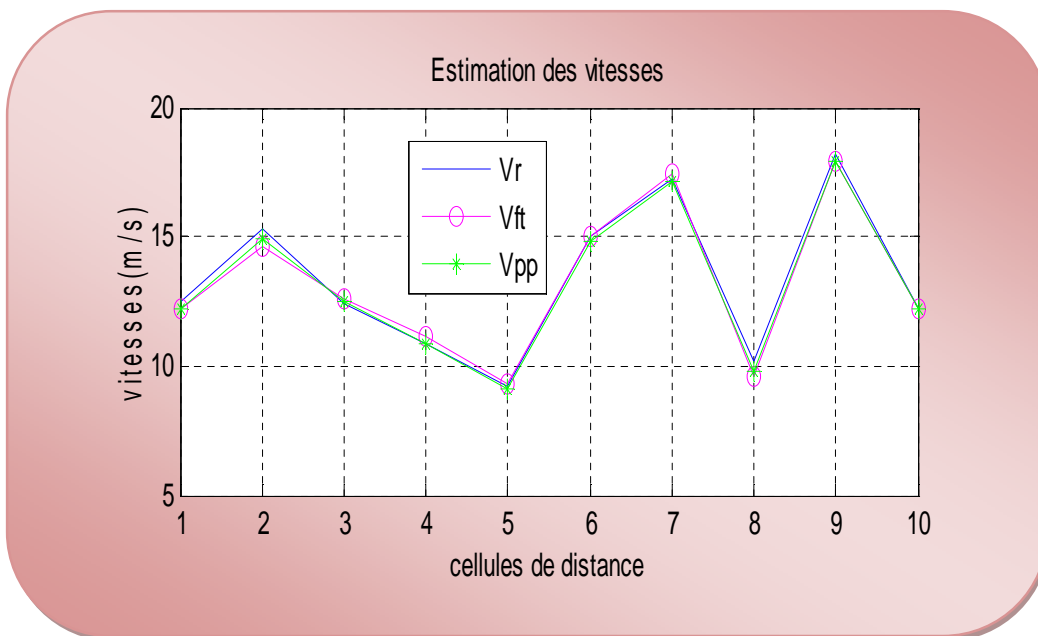


Figure IV.16: Comparaison des différents estimateurs de la vitesse moyenne Doppler

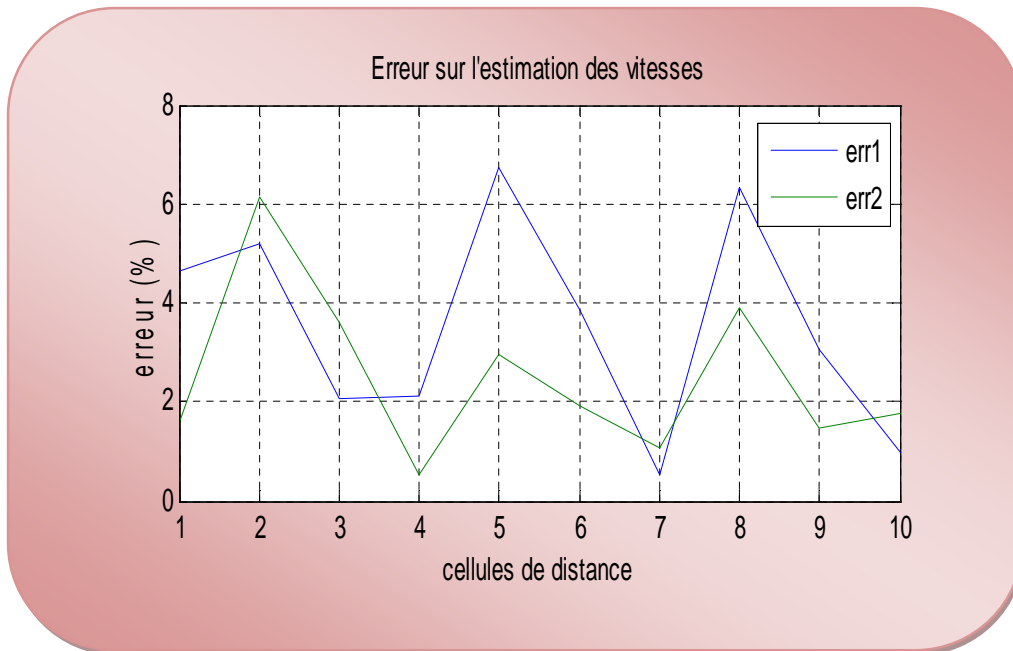


Figure IV.17: Comparaison entre les erreurs sur l'estimation des vitesses par les deux méthodes

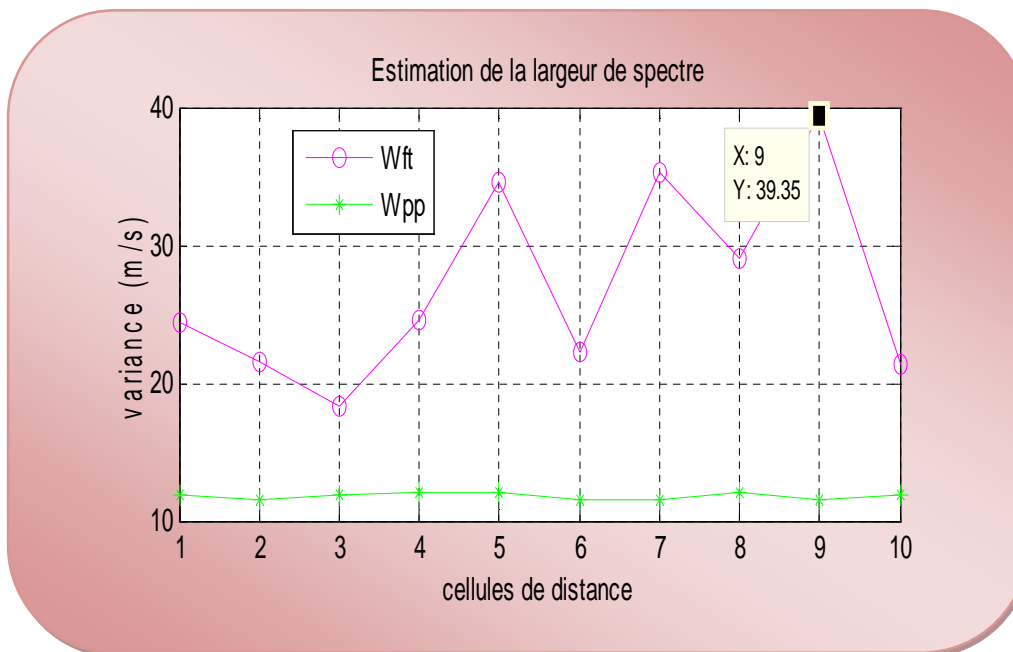


Figure IV.18: Comparaison des différents estimateurs de la largeur spectrale

IV.11.2. Interprétation

Le présent estimateur se base sur l'estimation de la densité spectrale de puissance (PSD) du signal reçu par le biais de la FFT ainsi que l'estimation de la puissance de tout le périodogramme du même signal par contre la méthode pulse pair qui se base sur les calculs directs et simples de la fonction d'autocorrélation des séries temporelle (I, Q).

Nous remarquons que l'estimation de la vitesse radiale moyenne par la méthode de Fourier présente une erreur relative supérieure par rapport à l'algorithme pulse pair. Par contre, l'estimation de la largeur spectrale est largement supérieure à celle fournie par la méthode d'autocorrélation (pulse pair). et cette dernier méthode est très rapide par rapport à l'autre.

IV.12. Estimation de la réflectivité par les deux méthodes classique Fourier et pulse pair

Pour estimer la réflectivité nous utilisons les équations suivant :

$$D = (-vr/386.6)^{1.49} \tag{IV.14}$$

$$Z(mm^6m^{-3}) = \sum(S + N_0). D^6 \quad \text{et} \quad Z(dBZ) = 10 \log|Z|$$

IV.12.1. Estimation de la réflectivité par la méthode pulse pair

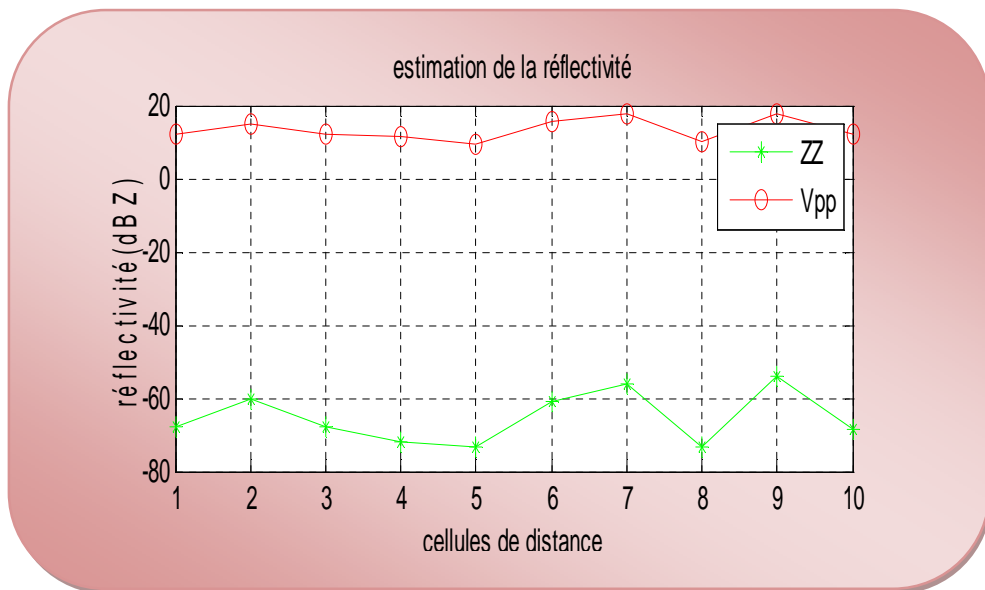


Figure IV.19: Estimation de la réflectivité par la méthode Pulse Pair

IV.12.2. Interprétation

D'après la figure IV.19, nous avons remarqués que l'estimation de la réflectivité par la méthode pulse paire est plus proche de l'estimation de vitesse la moyenne, elles sont proportionnelles quand la vitesse augmente la réflectivité augmente et l'inverse est vrai.

Donc la réflectivité a une relation directe avec la vitesse de précipitations et sa quantité, parce qu'on a l'équation de diamètre en fonction de la vitesse.

IV.12.3. Estimation de la réflectivité par la méthode Fourier

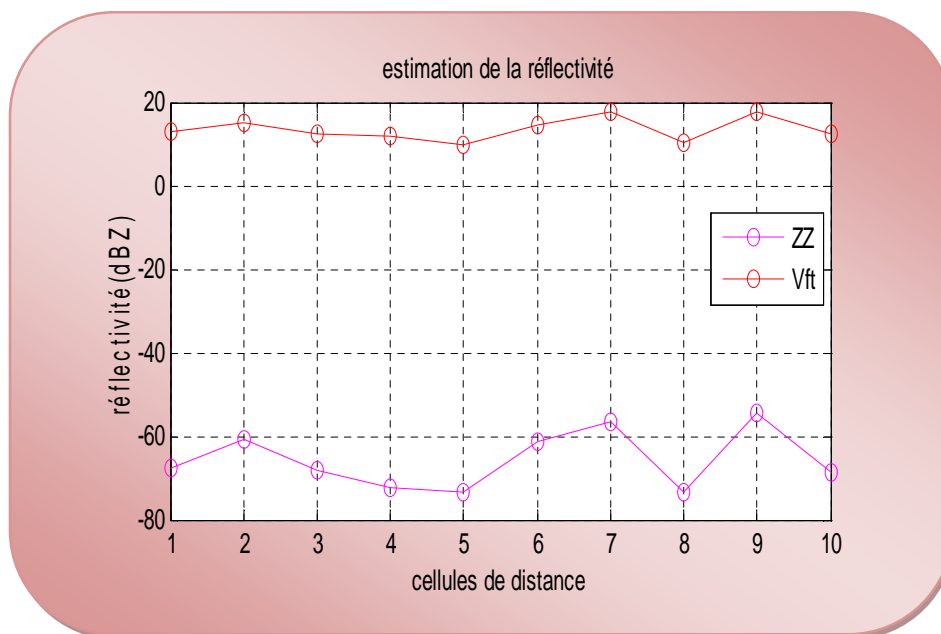


Figure IV.20: Estimation de la réflectivité par la méthode Fourier

IV.12.4. Interprétation

On voit bien que l'estimation de la réflectivité par la méthode Fourier donne le même résultat que l'estimation par la méthode pulse paire mais a une estimation moins précise. Cela est montré par la figure (IV.20).

IV.13. Estimation de taux de précipitation par les deux méthodes classique Fourier et pulse pair

Le Radar météorologique ne calcule pas le taux de précipitations « R » directement, mais il estime plutôt ce taux à partir de l'énergie des particules réfléchi la réflectivité « Z » :

$$Z = aR^b \tag{IV.15}$$

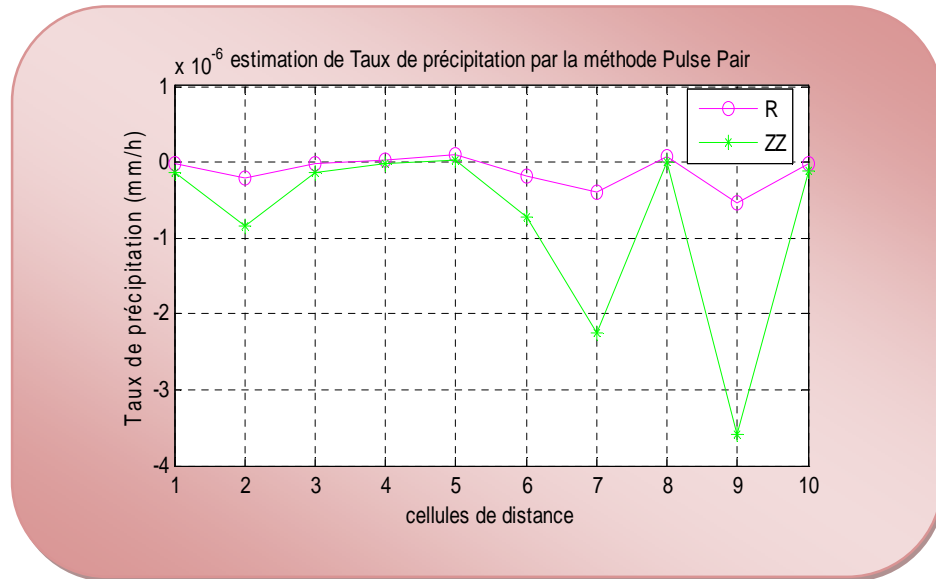


Figure IV.21: Estimation de taux de précipitation par la méthode Pulse Pair

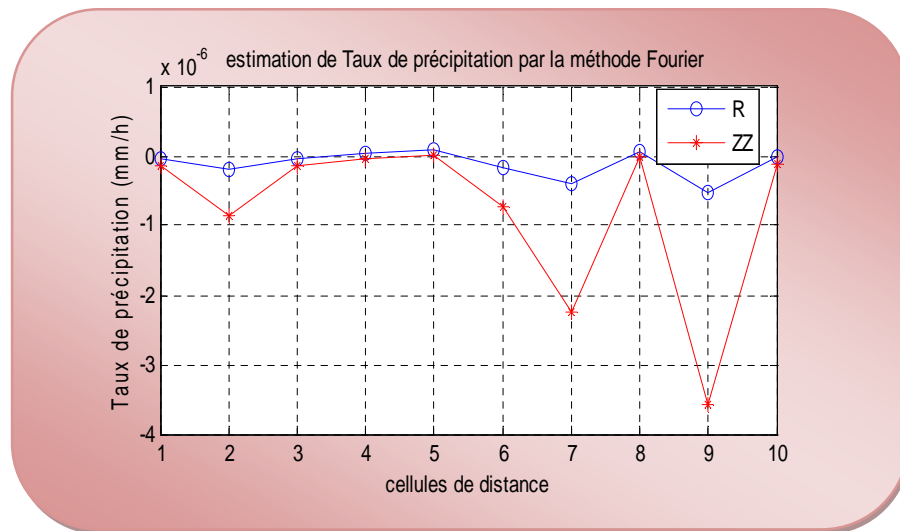


Figure IV.22: Estimation de taux de précipitation par la méthode Fourier

IV.13.1. Interprétation

Les deux figures (IV.21) et (IV.22) représentent l'estimation de taux de précipitations par les deux méthodes pulse pair et Fourier, nous remarquons que ces estimations suivent le même profile que l'estimation de réflectivité, donc le taux de précipitations « R » est proportionnel au la réflectivité « Z ».

IV.13.Conclusion

Dans ce chapitre on a traité d'une manière générale les différents résultats de simulation. Dans un premier temps on va essayer d'étudier l'effet des différents paramètres d'entre de la routine de génération des donne de simulation, sur les séries temporelles I et Q ainsi que sur le spectre Doppler de l'écho météorologique. Des interprétations spécifiques pour les effets et le poids de chacun de ces paramètres. On seconde lieu, nous avons utilisé des technique des estimations des paramètres du spectre Doppler à savoir : la puissance, la vitesse moyenne et sa variance tel que l'estimation temporelle et spectrale.

Pour l'estimation temporelle nous avons utilisé l'algorithme de pulse paire qu'est basée sur les calculs directs et simples de la fonction d'autocorrélation des signaux Radar complexes $Z(kTs)$ mais cet algorithme est difficile à interpréter. Cette méthode offre les résultats les plus performants en termes du taux d'erreur sur l'estimation de la vitesse moyenne, et de faibles variations de la largeur spectrale par contre l'algorithme de Fourier dans le domaine spectral basé sur l'estimation de la densité spectrale de puissance (PSD) du signal reçu le meilleur outil utilisé pour des signaux périodiques ou quasi périodiques, il donne des estimations moins précises par rapport à celle de pulse pair avec des temps d'exécution un peu plus importants.

Finalement, nous avons fait l'estimation de la réflectivité par les deux méthodes précédente est déduire que la réflectivité a une relation directe avec la vitesse de précipitations et sa quantité, ainsi que le Radar ne fait pas l'estimation de taux de précipitation quand la puissance réfléchi est très fable et le taux de précipitation « R » est proportionnel de la réflectivité « Z ».

I.1.INTRODUCTION

La météorologie est un facteur très important pour toutes les activités aéronautique, la connaissance de la météorologie est une donnée essentielle dans la navigation aérienne.

Les météorologistes utilisent d'abord le Radar pour détecter et repérer les précipitations, qu'elles soient dans les nuages ou qu'elles tombent, et en mesurant l'intensité.

Le Radar Doppler permet non seulement de détecter l'intensité et l'emplacement des précipitations à plusieurs niveaux, mais encore de mesurer la vitesse et la direction de déplacement dans la zone balayée, selon qu'elles s'approchent ou s'éloignent de son site.

I .2.HISTORIQUE DES SYSTEMES

Durant la Seconde Guerre mondiale, les opérateurs radars ont remarqué que des échos parasites semblaient venir des précipitations et des techniques furent mises au point pour filtrer ces échos gênants. Cependant, les scientifiques ont rapidement reconnu le potentiel pour la météorologie et dès la fin du conflit, des Radars militaires mis en disponibilité furent utilisés pour la détection des précipitations. Aujourd'hui, les Radars météorologiques sont utilisés par les services météorologiques nationaux, les aéroports, les départements de recherche universitaires en météorologie et même les postes de télévision dans leurs bulletins d'informations quotidiens.

Les données brutes de ces Radars peuvent être utilisés pour faire des images ou être traités par des logiciels spécialisés qui extrapoleront à court terme leur déplacement (prévision immédiate). Leurs informations peuvent même être ingérées dans les modèles de prévision numérique du temps afin d'améliorer leur analyse de la situation météorologique, ce qui leur permettra de faire de meilleures prévisions.

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^e 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. Durant le conflit, les opérateurs des Radars micro-ondes des armées alliées remarquèrent de la contamination qui s'avéra être des échos venant de la précipitation (pluie, neige, etc.). Juste après la guerre, les scientifiques militaires, qui avaient déjà commencé leur

recherche sur les phénomènes rapportés, ont continué leur travail tant dans la vie militaire que civile.

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 Institut of Technology. Il a participé au développement des premiers Radars météorologiques opérationnels. Au Canada, J. Stewart Marshall et Heinrich Rudolf Hertz. Douglas forme 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, les recherches se poursuivirent pour relier les signatures des échos aux caractéristiques des précipitations et sur les possibilités qu'offrent les différentes longueurs d'onde entre 1 et 10 centimètres.

Entre 1950 et 1980, les différents services de météorologie à travers le monde construisent des Radars météorologiques pour suivre la précipitation par sa réflectivité. D'abord ces Radars furent pour usage local dans les grands centres et avec un nombre limité d'angles et provenaient de surplus militaires. Ils étaient opérés en temps réel par les météorologistes qui devaient suivre les échos sur des écrans cathodiques. En 1957, le National Weather Service introduit le WSR-57(weather surveillance Radar 1957), leur premier Radar conçu exclusivement pour la détection des précipitations. En 1953, Donald Staggs, un ingénieur en électricité travaillant pour le " Illinois State Water Survey" est le premier à noter sur les sorties de réflectivité le crochet typique associé à un orage tornadique [4].

Dans les années 1970, les différents Radars commencent à être organisés en réseaux avec un début de standardisation. Les premiers systèmes de capture des images ont été développés. Le nombre d'angles sondés augmente ce qui permet d'obtenir un volume de données en trois dimensions. Les coupes horizontales CAPPI (Constante Altitude Planned Position Indicator) et verticales sont développées. On étudie ainsi la structure des orages et autres nuages (entre autres par Isztar Zawadski). Les groupes de recherche se sont multipliés à travers le monde, en particulier le NSSL aux États-Unis en 1964, qui commencent à expérimenter sur la variation de la polarisation du signal Radar ainsi que sur l'utilisation de l'effet Doppler-Fizeau. En mai 1973, une tornade a frappé la ville d'Union City, juste à l'ouest d'Oklahoma City. Le Radar expérimental de longueur d'onde de 10 cm du NSSL a pu

pour la première fois noter la vie entière de ce phénomène. Grâce à l'effet Doppler, les chercheurs ont pu voir une rotation appelée mésocyclone, dans le nuage orageux avant que la tornade ne se forme ce qui a convaincu le National Weather Service que cette nouvelle information serait très importante pour la prévision des orages violents.



Figure I.1 : *Le radar météorologique*

I.3.LA METEOROLOGIE

La météorologie est l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les pressions et les précipitations pour comprendre comment ils se forment et évoluent.

Le mot vient du grec antique où *météore* désigne les particules en suspension dans l'atmosphère et *logos* veut dire discours ou connaissance.

Plusieurs scientifiques tels que Réaumur, Celsius, Fahrenheit et bien d'autres se sont penchés sur les méthodes des mesures des paramètres météorologiques.

L'estimation et la mesure des paramètres météorologiques PTU (pression, température, humidité, pluie, vent, etc...) nécessitent l'utilisation d'un certain nombre d'appareils aussi précis que possible.

I.3.1.Les Cibles

I.3.1.1.Les cibles météorologique

Au sens large du terme, une cible 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, pluie, oiseaux, insectes, météores,) qui interceptent aussi l'énergie et la renvoient.

Une précipitation est un ensemble de particules aqueuses liquides ou solides, cristallisées ou amorphe, qui tombent d'un nuage ou d'un ensemble nuageux et qui atteigne le sol.

L'observation des cibles météorologiques est complétée par les observations effectuées à l'aide des radars météorologiques.

❖ **Les nuages**

Un nuage est un ensemble visible de minuscules particules d'eau liquide ou de glace, ou des deux à la fois.

L'appellation des nuages repose sur deux principes simples, l'altitude de leur base et leur forme. On partage d'abord les nuages en quatre groupes. Les trois premiers, selon la hauteur moyenne de la base; le quatrième groupe tient compte de la forte extension verticale de certains nuages qui peuvent se retrouver sur plus d'un étage à la fois.

On définit trois formes de nuages:

1. Les cirrus, ou boucle en latin, ont l'aspect de filaments blancs et délicats. On les nomme Cirrus (Ci), Cirrostratus (Cs) et Cirrocumulus (Cc).
2. Les status, signifiant allongé ou étalé, sont gris et forment une nappe basse et uniforme. Ce sont les Status (St), Nimbostratus (Nb) et Stratocumulus (Sc).
3. Les cumulus, ou en latin tas ou monceau, ont une grande extension verticale et peuvent toucher plusieurs niveaux. Ce sont les Cumulus (Cu) et les Cumulonimbus (Cb).

Le préfixe Nimbo ou le suffixe Nimbus est associé à la précipitation. (Nimbus signifie d'ailleurs "pluie d'orage" en latin). La combinaison des préfixes et des formes donne 10 genres de nuages. De façon à parfaire la description de ces genres, on reconnaît 14 espèces et 9 variétés. La classification internationale définit aussi 6 autres particularités supplémentaires et 3 nuages annexes. Les nuages se transforment d'un genre à l'autre quand l'humidité ou la

température varie. Donc, si on remarque un changement dans les nuages, c'est signe que le temps va se modifier.

Voici un résumé des groupes des nuages:

GROUPE: étage supérieur; PRÉFIXE: cirr...; Ci, Cs, Cc.

GROUPE: étage moyen; PRÉFIXE: alto...; As, Ac

GROUPE: étage inférieur; PRÉFIXE: stra...; St, Sc

GROUPE: à développement vertical; PRÉFIXE: cum...; Cu, Cb, Ns

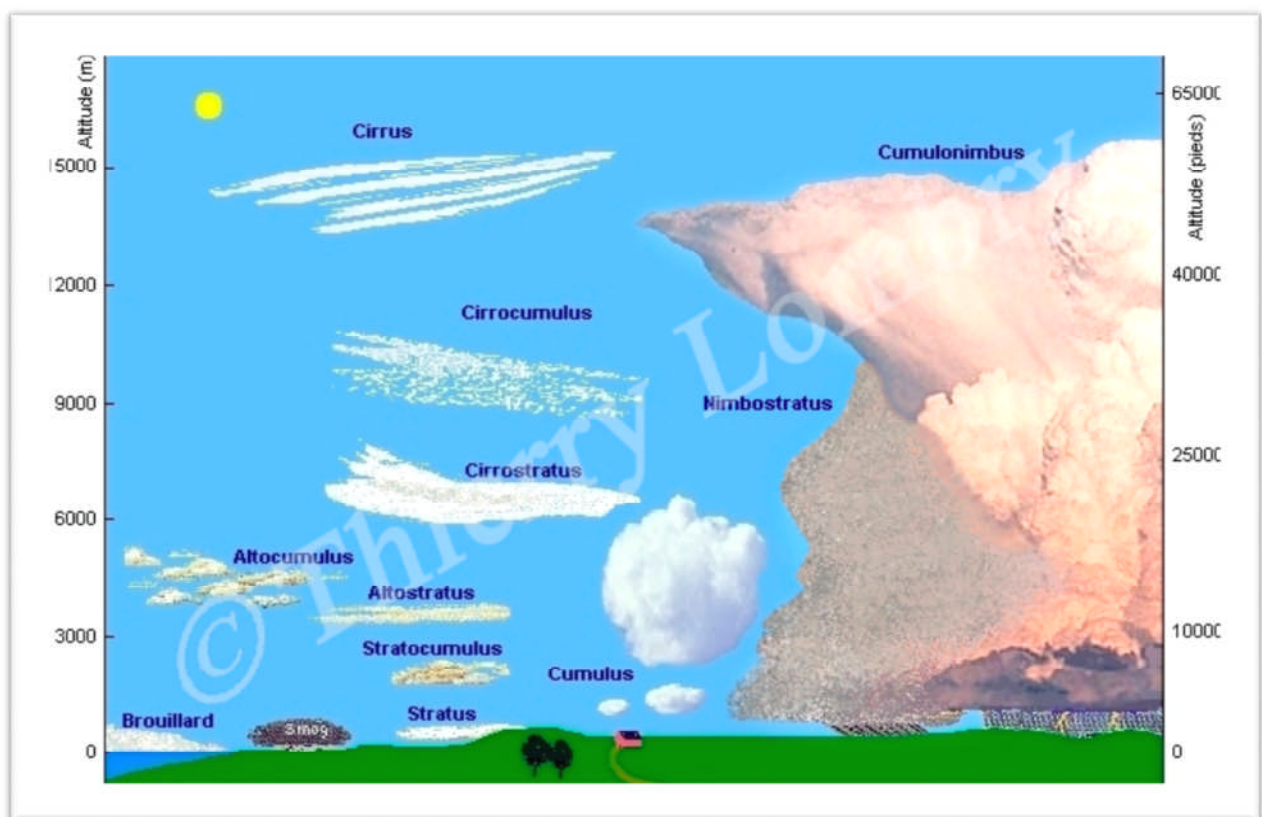


Figure I.2 : Les groupes des nuages

❖ Les météores

Nous entendons par météores les types de précipitations suivantes :

- **Précipitations liquide**

Bruine: fine gouttelette, qui semble flotter dans l'air. elle est produite par des couches denses de stratus dont la base touche parfois le sol.

Pluie : Précipitation de gouttes d'eau qui tombe d'un nuage.

- **Précipitations solide**

Neige : cristaux de glace hexagonaux dont la plupart sont ramifiés.

à des températures supérieures à 5°C, les cristaux s'agglutinent et forment des flocons.

Grêle : globules ou morceaux de glace transparente dont le diamètre varie entre 5 mm et 10 mm (parfois plus) et qui tombent séparément ou agglomérés.

Elle est souvent accompagnée d'orages violents.

Cristaux de glace : non ramifiés, ayant la forme d'aiguilles, de colonne ou de plaques Ils se produisent lors de températures très basses tombent d'un nuage ou d'un ciel clair.

❖ Le vent

Le vent est la composante (radiale) horizontale du déplacement d'une masse d'air par rapport au sol. Les mouvements de l'air ne sont pas exclusivement horizontaux. Il existe donc une composante verticale du déplacement de l'air, elle se nomme « turbulence » [7].

Le vent au sol est mesuré au sommet d'une tour de 10 mètre de hauteur, la vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre et sa direction est donnée par une girouette.

La variation de ce dernier nous donne les rafales et les grains [6].

-Les rafales : une rafale est définie comme une variation brusque de la vitesse du vent d'au moins 20m /s par rapport à la vitesse moyenne pendant moins d'une seconde.

-Les grains : les grains est un phénomène atmosphérique caractérisé par une variation très importante de la vitesse du vent, débutant brusquement, d'une durée de minutes et s'amortissant plutôt rapidement.

❖ Les turbulences :

La turbulence est un phénomène souvent observé et génère des mouvements parfois violents pouvant perturber le vol. Même si les accidents avec destruction des aéronefs restent exceptionnels, les accidents corporels dus à la turbulence sont nombreux, surtout en aviation commerciale (passagers, et majoritairement équipages).

On ne peut éviter ces incidents que par une bonne information sur l'état de l'atmosphère, une bonne compréhension des paramètres entrant en jeu, et des réactions appropriées [6].

La turbulence désigne des mouvements aléatoires de l'air se superposant au mouvement moyen. La turbulence aéronautique est associée à toute variation de la direction et/ou de la vitesse du vent (cisaillement) engendrant des accélérations verticales ou horizontales pouvant modifier les paramètres de vol non compensés par des méthodes normales de pilotage [7].



Figure I.3: La turbulence

❖ **Le cisaillement de vent [6]**

Le long du point de jonction de masses d'air de vitesse ou de direction différente, il se crée une sorte de déchirure de l'atmosphère, qui résulte en un mouvement vertical du vent : Le cisaillement. Selon la direction des masses, il résulte une divergence ou une convergence, la divergence horizontale en altitude engendre un mouvement ascendant dans les niveaux inférieurs, alors que la convergence en altitude crée de la subsidence dans les niveaux inférieurs.

Le cisaillement peut être causé par un obstacle au sol ou simplement par une saute de vent en altitude, ce qui est fréquemment le cas où il y a des vallées (aérodrome de Constantine - Algérie), à l'approche d'une dépression hivernale. Dans cette vallée, le vent soufflera sur une direction, alors que juste au-dessus, il souffle dans le sens opposé.

I.3.1.2. Les cibles non météorologiques

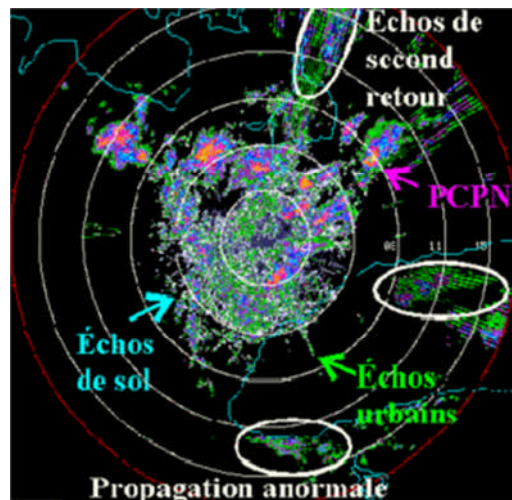


Figure I.4: Les cibles non météorologiques

Le signal retourné au Radar peut contenir plusieurs types d'échos parasites. Voici quelques exemples qui sont parfois très surprenants:

- **Insectes**

Les insectes ont une section équivalente Radar qui peut être assez importante quand ils se déplacent en nuée. La rétrodiffusion de ces cibles, spécialement à bas angle de site, peut servir de «traceur» pour divers phénomènes en air clair comme les vents de bas niveau où les brises de mer car ils sont concentrés par la convergence des vents. Ils sont surtout perceptibles près du Radar.

- **Échos de mer**

Lorsque le faisceau d'un Radar rase ou frappe la mer ou un lac, une partie de son énergie peut être retournée au Radar par la surface (une goutte d'eau dans un nuage ou sur la mer a les mêmes propriétés). De plus, si les conditions de vents sont favorables, des vagues vont se former et donner une vitesse à ces échos, le sommet des vagues se déplaçant entre chaque impulsion.

Ces échos sont donc difficiles à peuvent également se mêler au signal de vraies précipitations pour fausser l'analyse.

Propagation anormale

Sous certaines conditions atmosphériques, l'indice de réfraction de l'air s'éloigne de la normale et le faisceau Radar suit une trajectoire anormale, soit vers

la surface, soit vers le haut. C'est ce qu'on nomme la propagation anormale. Le faisceau n'étant pas à l'endroit où il devrait être, les échos de retour seront mal placés. La propagation anormale la plus commune se produit dans une inversion de température à basse altitude et le faisceau frappe alors le sol, retournant des échos intenses au Radar.

- **Navires**

Les échos de mer peuvent subir une perturbation lors du passage de navires.

- **Oiseaux et chauves-souris**

Les oiseaux et les chauves-souris ont une importante section équivalente Radar ce qui les rend visible au Radar, surtout en temps de migration alors que des milliers d'individus remplissent le ciel. Pour les gros oiseaux, il ne faut qu'un individu par cellule de résolution pour simuler des précipitations. Même les petits oiseaux passereaux causent des échos importants car ils se déplacent en énormes groupes. Le traitement Doppler permet d'en filtrer une partie car leur vitesse de déplacement est généralement caractéristique. Une meilleure technique est celle du radar à double polarisation.

- **Échos de sol**

Le faisceau radar peut frapper des obstacles à basse altitude comme des collines, des édifices, des forêts, etc. qui vont donner de forts échos permanents.

- **Avions**

Pour un Radar météorologique, la réflexion d'un avion passant dans sa région de couverture est considérée comme un écho parasite. Comme généralement les avions n'occupent qu'une faible portion du volume sondé et en sortent avant le sondage suivant, ils n'apparaissent que comme des échos très ponctuels et sont faciles à discerner.

I.4. LE RADAR METEOROLOGIQUE DOPPLER

I.4.1. Définition

Le mot RADAR est un acronyme de **R**adio **D**étection **A**nd **R**anging qui signifie "Détection et Télémétrie Radioélectrique".

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.

Les Radars plus récents comportent un module de traitement du déplacement des cibles sondées par l'effet Doppler-Fizeau, dont les principes sont également utilisés par les Radars primaires de surveillance aérienne. Ces Radars obtiennent donc deux informations des précipitations: leur réflectivité et leur vitesse radiale. Ceci permet de mieux connaître les mouvements dans les précipitations, comme les rotations annonciatrices de tornades, et d'éliminer les échos parasites. En effet, ces derniers ont une vitesse caractéristique généralement nulle.

I.4.2.L'effet Doppler

L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. Cet effet fut découvert par le physicien allemand Christian Doppler en 1842 et fut également proposé par Hippolyte Fizeau pour les ondes électromagnétiques en 1848.

L'effet Doppler Fizeau est utilisé par un Radar pour deux tâches:

1. Mesure de la vitesse des cibles.
2. Filtre des faux échos pour la Visualisation des cibles mobiles

Pour comprendre ce phénomène, il s'agit de penser à une onde à une fréquence donnée qui est émise vers un observateur en mouvement, ou vis-versa. La longueur d'onde du signal est constante mais si l'observateur se rapproche de la source, il se déplace vers les fronts d'ondes successifs et perçoit donc plus d'ondes par seconde que s'il était resté stationnaire, donc une augmentation de la fréquence. De la même manière, s'il s'éloigne de la source, les fronts d'onde l'atteindront avec un retard qui dépend de sa vitesse d'éloignement, donc une diminution de la fréquence [3].

Dans le cas sonore, cela se traduit par un son plus aigu lors d'un rapprochement de la source et un son plus grave en s'éloignant de celle-ci. Dans le domaine de la lumière visible, on parle de décalage vers le bleu pour un rapprochement et vers le rouge dans le cas

d'éloignement en se référant au spectre lumineux. La même chose s'applique à toutes les gammes d'ondes électromagnétiques dont les ondes utilisées par les Radars.



Figure I.5: Animation de l'effet Doppler-Fizeau

En termes mathématiques, la variation de fréquence peut être exprimée par [1],[2]:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

f_d = Fréquence Doppler [Hz]

λ = Longueur d'onde [m]

v_r = vitesse relative source-observateur [m/s]

La vitesse v_r est la composante radiale de la vitesse réelle de l'observateur car la variation de fréquence est due au déplacement relatif entre la source et l'observateur. La composante tangentielle de la vitesse réelle n'implique pas d'éloignement ou de rapprochement et donc ne peut pas être perçue. Ainsi, un Radar qui sonde l'atmosphère ne peut percevoir que la composante radiale de sa vitesse par l'effet Doppler. Pour connaître sa vitesse complète, il faut noter sa position angulaire entre chaque sondage ce qui donne la composante tangentielle.

I.4.3. Les fréquences Radar

Le tableau suivant regroupe les différentes bandes de fréquences de signaux électromagnétiques pouvant être utilisés par les Radars [3]:

Désignation	Bande	Longueurs d'ondes (λ)
HF	3 - 30 MHz	10 - 100 m
VHF	30 - 300 MHz	1 - 10 m
UHF	300 - 1000 MHz	0.3 - 1 m
L	1 - 2 GHz	15 - 30 cm
S	2 - 4 GHz	8-15 cm
C	4 - 8 GHz	4 - 8 cm
X	8 - 12 GHz	2.5 - 4 cm
Ku	12 - 18 GHz	1.7' - 2.5 cm
K	18 - 27 GHz	1.2 - 1.7 cm
Ka	27 - 40 GHz	.75 - 1.2 cm
W	40 - 300 GHz	1 - 7.5 mm

Tableau I.1: les fréquences Radar

I.4.4. Le principe de fonctionnement Radar météorologique

L'émetteur Radar envoie dans l'atmosphère une impulsion RF à une puissance maximale 250 KW avec durée d'impulsion très courte μ s, L'énergie émise est concentrée en un faisceau de faible ouverture par une antenne directive.

une partie de cette puissance réfléchi par des hydrométéore (goutte de pluie, nuage,...etc) et renvoyée vers un récepteur qui reçoit cette puissance réfléchi (écho Radar) et faire la numérisation à la fréquence intermédiaire FI et acheminer vers le processeur de signaux pour le traitement afin de produire les moments standard de réflectivité non corrigé (U), de réflectivité corrigé (Z) et de vitesse radial (V) ainsi que la largeur du spectre (W) et l'affichage de ces donnée dans la station de travail.

Ce type de Radar utilise le décalage de phase entre la fréquence émise et la fréquence reçus qui s'appelle le décalage Doppler pour mesurer la vitesse radial et la largeur de spectre à partir de la formule suivante :

$$\Delta F = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (I.2)$$

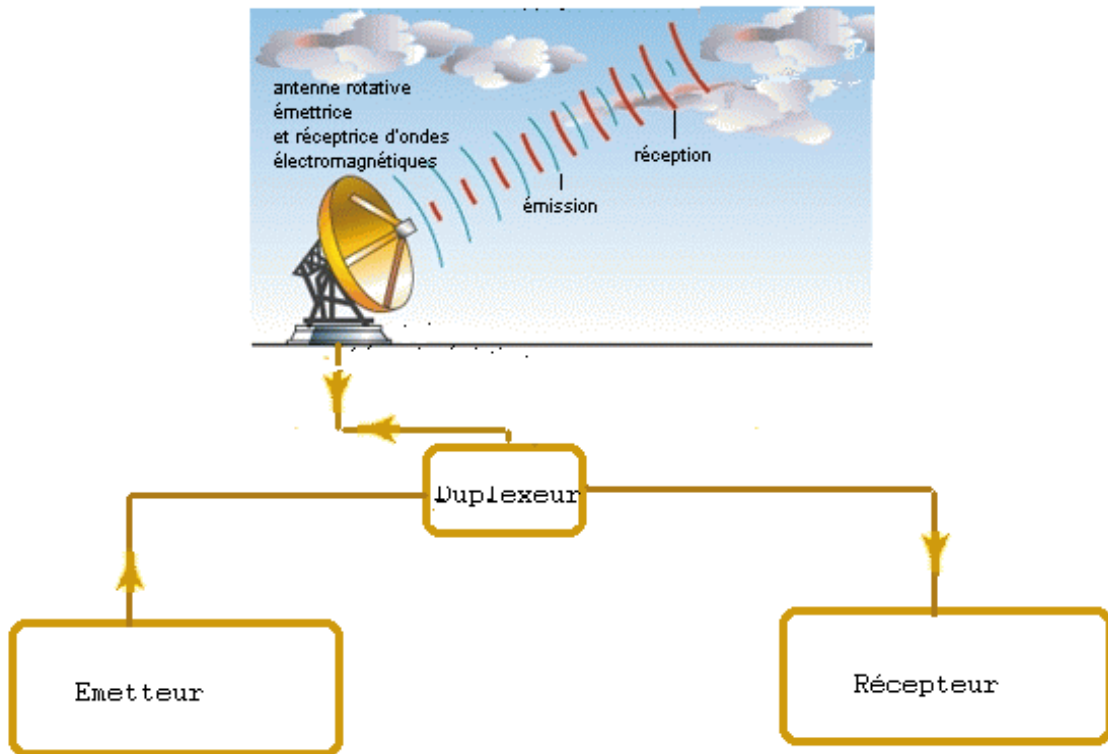


Figure I.6: Schéma synoptique d'un Radar météorologique

I.4.5. 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 mono cible. 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 [5]:

$$I = A \cos \left[\frac{4\pi r}{\lambda} - \psi \right] \quad (I.3)$$

$$Q = A \sin \left[\frac{4\pi r}{\lambda} - \psi \right] \quad (I.4)$$

où :

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

λ : La longueur d'onde du signal Radar [m]

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

Ψ : 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 $t (4\pi r/\lambda) - \Psi$, devient en fonction du temps. Le taux de changement de phase est la vitesse angulaire ω dont l'expression est la suivante :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{4\pi r(t)}{\lambda} - \Psi \right] = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{d[r(t)]}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} v_r = \omega \quad (\text{I.5})$$

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 $\omega=2\pi f$.

$$2\pi \frac{2v_r}{\lambda} = 2\pi f d \quad (\text{I.6})$$

La fréquence Doppler est donnée par :

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (\text{I.7})$$

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.

Ainsi, l'estimation de ces propriétés électriques du signal fournit une estimation des paramètres météorologiques correspondants.

I.4.6. Décalage en phase

La phase d'une onde est un point spécifique ou un repère le long de cette onde.

Un déphasage est un repositionnement observable de ce repère entre les transmissions successives. Un Radar pulsé Doppler, sous sa forme la plus simple, fournit un signal de référence par lequel des variations de la phase des impulsions successivement reçues

peuvent être identifiées. La phase connue du signal transmis permet la mesure de la phase du signal reçu. L'effet Doppler s'est associée à l'écho à partir duquel le retour lancé est calculé à partir du taux de variation de la phase.

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot \frac{d_r}{dt} = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot v_r \quad (\text{I.8})$$

I.4.7. Vitesse Ambigüe

La fréquence Doppler maximale $f_{d_{max}}$, appelée aussi fréquence de Nyquist. Pouvant être mesurée sans ambiguïté vaut la moitié de la fréquence de répétition d'impulsion (Pulse Répétition Fréquence = PRF) du radar

$$f_{d_{max}} = \frac{PRF}{2} \quad (\text{I.9})$$

Par conséquent, la vitesse maximale non ambiguë (Nyquist) est

$$v_a = \pm PRF \cdot \lambda / 4 \quad (\text{I.10})$$

Ainsi, l'intervalle des vitesses non ambiguës mesurées est $[-v_a, +v_a]$. une vitesse $v > v_a$ serait interprétée comme une vitesse de sens opposée.

I.4.8. Dilemme Doppler

Si l'on veut détecter de plus grandes vitesses sans ambiguïté, on agit soit sur la longueur d'onde du signal en l'étirant (mais alors, il serait impossible de détecter une partie des plus petites particules. diffusion de Rayleigh) soit sur la PRF en l'augmentant.

La portée maximale non ambiguë est définie comme étant la distance maximale à partir de laquelle le signal réfléchi d'une impulsion est reçu avant la transmission de l'impulsion suivante.

$$r_a = \frac{c}{2 * PRF} \quad (\text{I.11})$$

L'écho d'une cible à une distance $r > r_a$ est interprété comme étant l'écho d'une nouvelle impulsion à une distance $r = r_a$.

Le dilemme Doppler est résumé par l'expression suivante :

$$v_a \times r_a = c \frac{\lambda}{8} \quad (\text{I.12})$$

Le dilemme de Doppler est provoqué par des restrictions physiques basées sur les lois de la nature. Une des manières du Radar WSR-88D de gérer ce dilemme est de fonctionner à des PRFs variables, collectant l'information de réflectivité à de basses PRFs et des informations de vitesse à de hautes PRFs. Les deux ensembles d'informations réunis sont comparés et traités pour estimer les vraies vitesses et portées radiales.

I.4.9. Les Composantes d'un Radar météorologique

Les composants de base du Radar, dans n'importe quelle configuration, comprennent :

➤ L'émetteur

L'émetteur est un appareil électronique qui génère une impulsion électromagnétique de la gamme des ondes radio qui sera envoyée à l'antenne pour diffusion. Il doit pouvoir :

- Produire l'onde de radiofréquence à une puissance moyenne et de pointe désirée.
- Émettre des ondes sur une gamme de fréquences.
- Émettre de façon stable afin de permettre un traitement reproductible des données.
- Être modulable en fréquence ou en phase pour les besoins de la formation de l'impulsion.
- Être fiable, facile à entretenir et efficace pour une très longue durée de vie.

➤ L'antenne :

L'antenne est une des parties les plus importantes d'un Radar. Elle réalise les fonctions essentielles suivantes :

- Elle transfère la puissance de l'émetteur à des signaux dans l'espace avec l'efficacité voulue et là selon la répartition nécessaire. Le même processus est appliqué à la réception.

- Elle permet d'obtenir le diagramme de rayonnement souhaité. En général il sera suffisamment étroit dans le plan horizontal pour obtenir la précision et la résolution demandée en azimut
- Elle doit assurer la mise à jour de la position de la cible à la fréquence voulue. Dans le cas d'une antenne à balayage mécanique, cette mise à jour se fera au rythme de la rotation de l'antenne. Une vitesse de rotation élevée peut poser des problèmes mécaniques importants, notamment pour les équipements qui émettent dans des bandes de fréquences nécessitant l'utilisation d'antennes imposantes et pouvant peser plusieurs tonnes.
- Elle doit mesurer sa direction de pointage avec une grande précision voir figure(I.7)

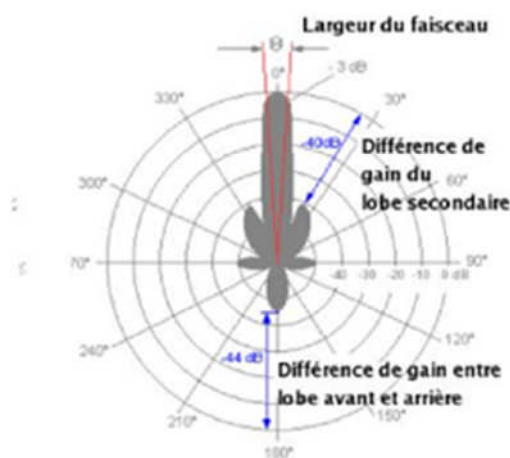


Figure I.7 : Diagramme d'émission d'une antenne en coordonnées polaires

➤ Récepteur :

Le récepteur reçoit les échos de retour qui ont été perçus par l'antenne. Il transforme le signal à haute fréquence du faisceau en un signal modulé de fréquence intermédiaire (FI) qui contient l'information des échos, l'amplifie et les transmet ensuite au système de traitement du circuit Radar qui en retirera ensuite les cibles d'intérêt. Le récepteur idéal doit :

- Amplifier les signaux reçus sans y ajouter de bruit de fond ou distorsion.
- Optimiser la probabilité de détection de signaux grâce à une bande passante adaptée.
- Avoir une large plage d'intensités qu'il peut traiter sans saturation.
- Rejeter les signaux d'interférence pour optimiser l'extraction de l'information.

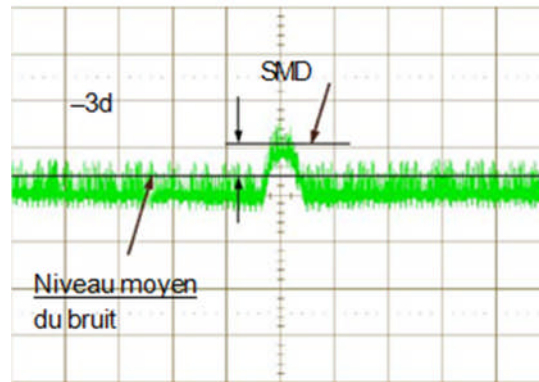


Figure I.8 : *Bruit blanc et un signal dépassant*

I.4.10. Types du radar météorologie

❖ Radar conventionnel

Les Radars utilisés le plus couramment sont ceux à balayage horizontal.

Il s'agit de Radars utilisant une antenne parabolique de grand format (3 à 10 mètres de diamètre) et qui fonctionnent dans les longueurs d'onde les moins atténuées, soit de 5 à 10 cm.

❖ Radar d'aéroport

Les aéroports ont des besoins très spécifiques en plus de la détection des précipitations. Entre autres, le cisaillement de vent près des pistes est un élément important à connaître pour la sécurité des vols. Certains Radars spécialisés sont utilisés à cet effet. Ils sondent également horizontalement mais font moins d'angles d'élévation, à plus haute résolution et plus souvent. Un bon exemple est celui des Radars météorologiques d'aéroport TDWR (Terminal Doppler Weather Radar).

❖ Profileur de vent

Un profileur de vent est un type de Radar monté verticalement utilisé en météorologie pour mesurer la direction et la vitesse des vents en utilisant l'effet Doppler-Fizeau à très grande résolution (typiquement 100 à 200 m à la verticale et moins de 100 m à l'horizontale). Il note la variation de l'indice de réfraction de l'air selon la théorie de la diffusion de Bragg (Loi de Bragg). 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 I.9: Profileur de vents

❖ Radar mobile

Plusieurs universités et certains services météorologiques ont développés des Radars qui peuvent être déplacés d'un site à un autre pour des études sur divers phénomènes météorologiques (domaine hydrologique). Certains sont des Radars pleine grandeur qui peuvent être démontés et placés à un endroit pour des études de longue haleine. D'autres comportent de plus petites antennes montées sur un camion et qui peuvent suivre la météo, là où elle se produit. Ces Radars utilisent une plus petite longueur d'onde pour conserver une bonne résolution.



Figure I.10 : Radar mobile

❖ Radar embarqué

Radar météorologique dans le nez d'un avion de recherche de la NASA

L'une des utilisations importantes pour la sécurité des passagers des avions est le Radar météorologique aéroporté. Il permet au pilote de suivre les précipitations et le cisaillement de vent. En général on retrouve le Radar dans le nez de l'avion, mais il peut également se retrouver sous l'appareil, sous l'une des ailes ou à la queue, selon la configuration ou les besoins.

Contrairement aux Radars au sol, l'antenne d'un Radar aéroporté doit être utilisée à des angles variables qui tiennent compte de l'attitude de l'appareil. En effet, ce dernier peut être en montée, en descente ou en virage, et un mécanisme gyroscopique compensateur doit être intégré pour donner une image constante de l'environnement.



Figure I.11 : Radar embarqué

I.4.11. Affichage d'un Radar météorologique

➤ **PPI**

Les données des Radars météorologiques sont affichées de plusieurs façons. La plus commune est l'affichage PPI (indicateur de position prévue). Il s'agit d'un affichage des données sur tous les azimuts disponibles sur un seul angle d'élévation. Le Radar se trouve au centre de l'image et les données sont pointées selon leur position azimutale et radiale.

Avec un Radar de surface, les données sont sur 360 degrés autour du Radar mais dans un avion, les données sont généralement limitées à la vision vers l'avant. Il faut se rappeler que le faisceau s'élève avec la distance au Radar et donc que ces données sont de plus en plus en altitude lorsqu'on s'éloigne du Radar.



Figure I.12 : Affichage d'un Radar aéroporté

➤ **CAPPI**

Un CAPPI (Constante Altitude Planned Position Indicator) est une coupe horizontale des données en trois dimensions de l'espace sondé par le Radar. Sur la figure (I.13), on a un certain nombre d'angles d'élévation, allant de 0,5 à 15 degrés, qui ont été balayés jusqu'à un maximum de 45 kilomètres du Radar. Le CAPPI de 4 000 pieds d'altitude utilisera donc les données les plus près de cette hauteur à une distance du Radar. Cette coupe peut également être une moyenne des informations sur plusieurs angles qui ont des données près de cette hauteur (les boîtes grises).

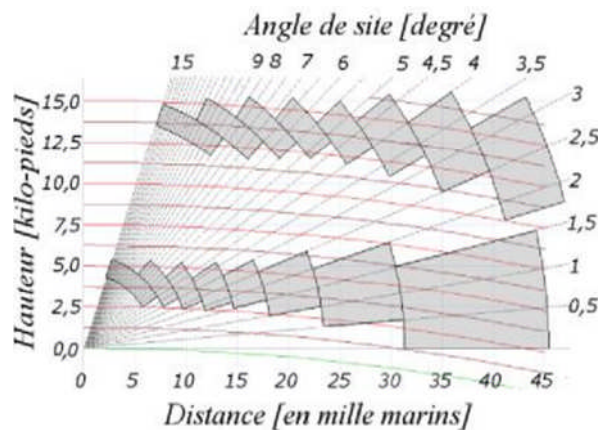


Figure I.13 : Affichage de CAPPI

I.5.CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur le Radar météorologique à effet Doppler est leur fonctions de base, ainsi que l'explication des phénomènes atmosphériques tels que les nuages et les précipitations pour comprendre comment ils se forment et évoluent.

S O M M A I R E D E C H A P I T R E I

Chapitre I : Le Radar Météorologique Doppler

I.1.Introduction1

I .2.historique des systèmes1

I.3.la météorologie3

I.3.1.les cibles3

I.3.1.1.les cibles météorologique.....3

- ❖ Les nuages.....4
- ❖ Les météores5
- ❖ Le vent.....6
- ❖ Les turbulences6
- ❖ Le cisaillement de vent.....7

I.3.1.2.les cible non météorologique8

- Insectes.....8
- Échos de mer.....8
- Propagation anormale.....8
- Navires.....9
- Oiseaux et chauves-souris.....9
- Échos de sol.....9
- Avions.....9

I.4. le radar météorologique doppler9

I.4.1.Définition9

I.4.2.L’effet Doppler10

I.4.3.Les fréquences radar.....11

I.4.4.Le principe de fonctionnement12

I.4.5.Frequence doppler.....13
I.4.6.Decalage en phase.....14
I.4.7.vitesse ambigüe.....15
I.4.8.Dilemme Doppler15
I.4.9.Les composante de radar météorologique.....16
I.4.10.Les types du radar météorologique.....18
I.4.11.Affichage d'un radar météorologique.....20
I.5.Conclusion.....21

CONCLUSION GENERALE

Notre travail du mémoire de fin d'études 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 forts précipitations afin d'éviter les catastrophes et améliorer la sécurité aérienne.

Dans ce travail nous avons étudié les voies et les moyens menant à l'estimation de la vitesse radiale Doppler moyenne \hat{v} et la largeur \hat{w} du spectre des vitesses de déplacement ainsi que le taux de précipitation et la réflectivité d'une perturbation météorologique détectés par un radar météorologique pulse Doppler positionné au sol.

A cet effet, plusieurs algorithmes ont été mis en œuvre par des recherches. Certains algorithmes sont déjà opérationnels : pulse pair (dans le domaine temporel) et Fourier (dans le domaine fréquentiel), d'autres algorithmes sont restés à l'état de proposition, pour le moment Autorégressif (AR) et Autorégressif à moyenne mobile (ARMA).

Ces méthodes ont été appliquées sur des données de signaux radar pulse Doppler (I et Q) avec des caractéristiques des échos de temps, générées par simulation des signaux d'un radar. Ces données ont été générées par l'algorithme de simulation développé par **Zrnic** en 1975, repris dans les projets de recherche de Traitement des signaux radar du laboratoire **d'électrotechnique de l'Université de Nebraska-Lincoln (aux USA)** par le professeur B. Palmer .

Notre recherche consacrée sur l'estimation de la réflectivité par ce que tous les objets dans l'atmosphère vont retourner une partie du faisceau radar. Certains sont très réfléchif alors que d'autres sont beaucoup moins. Il est donc important de suivre l'évolution de la structure des précipitations, pas seulement leur déplacement. Ainsi, pour estimer la quantité de pluie tombée durant une période donnée, dans ces deux cas l'intérêt du radar météorologique est de mesurer le taux de précipitations à partir de l'énergie réfléchie des particules de ces précipitations dans un volume élevé. Le radar météorologique ne calcule pas le taux de précipitations directement, mais il estime plutôt par la réflectivité (Z).

CONCLUSION GENERALE

À cet effet, on a utilisé les deux méthodes classiques d'estimation, et on constate la différence entre les deux méthodes. L'estimateur le plus utilisé dans le domaine des fréquences est celui de Fourier. Il se base sur l'estimation de la densité spectrale de puissance de Fourier des signaux radar complexes $Z(I, Q)$. L'avantage de travailler dans le domaine fréquentiel est de facilité d'interprétation des résultats obtenus, car on a l'étendue spectrale et les composantes principales reflétant les perturbations météorologiques.

En contrepartie la méthode d'estimation temporelle pulse-pair est une méthode simple à programmer vue qu'elle ne fait appel qu'au calcul de la fonction d'autocorrélation des signaux complexes $Z(kTs)$ de l'écho radar Doppler reçu. C'est une méthode très rapide, car le temps d'exécution d'ensemble de ces instructions pour toute la portée radar nécessite, en compares par rapport l'autre méthode.

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. 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. 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). Donc pour calculer le taux de précipitation il faut estimer d'abord la réflectivité.

REFIRONCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Robert J. Serafin, "METEOROLOGICAL RADAR", Chapter23, pp. 1-33,Radar Handbook, McGraw-Hill Book Company, 2nd édition, 1990.
- [2] : David D. Aalfs, Ernest G. Baxa and Emedio M . Bracalente, "SIGNAL PROCESSING ASPECTS OF WINDSHEAR DÉTECTION" - Technical Feature, Microwave Journal, pp.76-96, September 1993.
- [3]: R. Jeffrey Keeler and Richard E. Passarelli," SIGNAL PROCESSING FOR ATMOSPHERIC RADARS", Chapter 20a, pp. 199-229, Radar in Meteorôlogy, A M S book, Atlas 1990.
- [4]: Turkish State Meteorological Service (12-16/09/2005); Training course on Weather Radar Systems "MODULE C: PROCESSING BASICS IN DOPPLER WEATHER RADARS".
- [5]: Skolnik, M. I., «RADAR HANDBOOK», McGraw-Hill Book Company, 2nd édition.1990.
- [6] : Département Transport Aérien, « CISAILLEMENT DU VENT DE BASSES COUCHES SUBDIVISION METEO »- Ecole Nationale de l'Aviation Civile - 1991.
- [7] : J . Besse, A Fournie et M . Renaudin. « METEOROLOGIE - METEOROLOGIE AERONAUTIQUE »,TOME 3,Ecole Nationale de l'Aviation Civile – 3^{ème} Edition, 1989.
- [8]: D. S. Zrníc' and J.T. Lee, "PULSED DOPPLER RADAR DETECTS WEATHER HAZARDS TO AVIATION," Journal of Aircraft, Vol. 19, No 2, Feb. 1982, pp. 183-190.
- [9]: B. M. Keel, "AUTOCORRELATION BASED MOMENT ESTIMATORS", Technical Memorandum, Radar Systems Laboratory, Clemson University, Jul. 1996, pp.1-4.
- [10]: K. S. Milller and M. M. Rochwarger, "Some Remarks on Spectral Moment Estimation," IEEE Trans. Commun. Technol. vol. Com-19, April 1972, pp. 260-262.
- [11]:PETER S .RAY ,"MESOSCOLE METEOROLOGY AND FORECASTING"
,American meteorological society Boston 1986.
- [12] :Reinhard Teschl_, Walter L. Randeu, Franz Teschl Neural Networks 20 (2007) 519–527
"IMPROVING WEATHER RADAR ESTIMATES OF RAINFALL USING FEED-FORWARDNEURAL NETWORKS", 2007 Special Issue.
- [13]: Federal Meteorological Handbook No. 11, "DOPPLER RADAR METEOROLOGICAL OBSERVATIONS » part cwsr-88d products and algorithms .Washington, DC April 2006.
- [14]: Melle.Naima LEBAL Melle. Lynda HAREDJ « SIMULATION DES ECHOS ET CALCUL DE REFLECTIVITE POUR UN RADAR METEOROLOGIQUE » 2008 -2009.

[15]: Mohamed TIKHMIRINE (DAB_2009); « ESTIMATION DES SPECTRES RADAR DOPPLER PAR LA METHODE DES ONDELETTES » (Thèse de Magister).

[16]: Mohand LAGHA – Messaoud BENSEBTI; Performances comparison of pulse-pair and 2-step prediction algorithms for the Doppler spectrum estimation; Springer Science+Business Media, LLC 2007.

[17]: Mohand LAGHA (DAB_2008); « Estimation des propriétés dynamiques d'un signal Radar par l'utilisation des méthodes spectrales » (Thèse Doctorat).

[18]: Cours De Series Temporelles Theorie Et Applications « INTRODUCTION A LA THEORIE DES PROCESSUS EN TEMPS DISCRET MODELES ARMA ET METHODE BOX & JENKINS » Université Paris –DAUPHNE.



ANNEXES



***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***



***CONCLUSION
GÉNÉRALE***



BIBLIOGRAPIE

Contrairement aux processus déterministes dont l'évolution future est généralement connue grâce à l'existence des équations mathématiques qui les régissent, les processus aléatoires ou stochastiques servent à eux-mêmes pour décrire et définir les modèles pour les perturbations et les phénomènes s'évoluant aléatoirement dans le temps, et ce afin de pouvoir les traiter et les étudier pour les bien maîtriser.

✚ Définition

Un processus stochastique ou aléatoire est défini en tant qu'une collection de variables aléatoires indexée par un ensemble de paramètres $t \in T$, que l'on considère réellement comme étant le temps. La notation qu'on adopte dans la suite de ce rapport est $X(t)$, sachant que T peut être un ensemble continu ou discret.

✚ Fonction D'autocorrélation

Parfois, et généralement dans le domaine du traitement du signal, on fait recours à l'étude de similarité entre le signal reçu et sa réplique d'émission, pour en extraire les informations correspondantes. La fonction d'autocorrélation est généralement l'outil mathématique le plus approprié pour accomplir cette tâche. Elle est définie comme montrée ci-dessous:

Soit $Z(k)$ un processus aléatoire complexe, alors:

$$R_{ZZ}(k+n, k) = R_{ZZ}(n) = E \left[Z(k+n) \cdot Z(k)^* \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-2} Z(k+n) \cdot Z(k)^* \quad (\text{A.1})$$

Et la puissance moyenne d'un signal aléatoire $Z(k)$ est donnée par:

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Z(k) \cdot Z(k)^* = E \left[Z(k) \cdot Z(k)^* \right] = R_{ZZ}(0) \quad (\text{A.2})$$

✚ Densité Spectrale De Puissance

Précédemment, les outils utilisés pour la représentation fréquentielle des signaux sont très restreints et limités généralement aux transformées de Fourier pour les signaux déterministes. Mais en contrepartie, la plupart des signaux physiques manipulés récemment ne peuvent pas être traités de la même manière que ces derniers à cause de leur caractère aléatoire. Par conséquent, d'autres méthodes ont été élaborées, telles que la *densité spectrale de puissance* (DSP). La DSP est donc un outil mathématique très important permettant de représenter les différentes composantes spectrales d'un signal non déterministe. Elle est basée principalement sur sa fonction d'autocorrélation, et est calculée par la formule suivante:

$$S_Z(f) = \frac{1}{N} \sum_{n \in \mathbb{Z}} R_{ZZ}(n) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot n} \quad (\text{A.3})$$

Nous introduisons dans ce qui suit la notion des sommes de Ramanujan $c_q(n)$. Elles sont définies comme étant la somme des puissances des racines primitives de l'unité :

$$C_q(n) = \sum_{p=1}^q \exp(2i\pi \frac{p}{q} n) \quad (C.1)$$

$(p,q)=1$

où $(p,q)=1$ signifie que p et q sont co-premier.

On peut observer que les coefficients $c_q(n)$ sont des sommes sur l'ensemble des caractères $e_p(n)$.

Avec:

$$e_p(n) = \exp(2i\pi \frac{p}{q} n) \quad (C.2)$$

Les sommes introduites par Ramanujan joueront un rôle de base pour la projection de séquences arithmétiques $x(n)$.

$$x(n) = \sum_{q=1}^{\infty} x_q c_q(n) \quad (C.3)$$

Sur cette équation on peut facilement observer que pour cette série infinie avec $q \rightarrow \infty$ on peut aboutir à la série de Fourier, de plus la transformée de Fourier discrète prend une valeur finie q . La fonction arithmétique $\sigma(n)$ somme des diviseurs de n , peut s'écrire avec les coefficients RFT comme :

$$\sigma_q = \frac{\pi^2 n}{6} \frac{1}{q^2} \quad (C.4)$$

Donc

$$\sigma(n) = \frac{\pi^2 n}{6} \left\{ 1 + \frac{(-1)^n}{2^2} + \frac{2\cos(2n\pi/3)}{3^2} + \frac{2\cos(n\pi/2)}{4^2} + \dots \right\} \quad (C.5)$$

Pour les fonctions $x(n)$ ayant une valeur moyenne-t-on

$$A_v(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{n=1}^t x(n) \quad (C.6)$$

On peut obtenir la formule d'inversion

$$x_q = \frac{1}{\phi(q)} A_v(x(n)c_q(n)) \quad (\text{C.7})$$

Dans tout ce qui suit les coefficients indexés xq dénoteront la transformée Ramanujan-Fourier ou bien RFT. Il s'en suit qu'il y a une propriété multiplicative des sommes (coefficients) Ramanujan :

$$c_{qq'}(n) = c_q(n)c_{q'}(n) \quad \text{si } (q, q') = 1 \quad (\text{C.8})$$

Et la propriété d'orthogonalité est

$$\sum_{n=1}^q c_q^2(n) = q\phi(q) \quad (\text{C.9})$$

On va évaluer les coefficients Ramanujan en utilisant des fonctions de la théorie des nombres. Soit (q, n) le plus grand commun des diviseurs de q et n . on utilisant la décomposition en nombre premiers d'un nombre on peut écrire q et n comme :

$$q = \prod_i q_i^{\hat{a}_i} \quad (q_i \text{ premier}) \quad (\text{C.10})$$

$$n = \prod_k n_k^{\hat{a}_k} \quad (n_k \text{ premier}) \quad (\text{C.11})$$

On peut écrire le nombre $\phi(q)$ des fractions irréductibles du dénominateur q , appelé également la fonction Euler totient, comme.

$$\phi(q) = q \prod_i \left(1 - \frac{1}{q_i}\right) \quad (\text{C.12})$$

La fonction de möbius $\mu(\mathbf{n})$ est définie par

$$\mu(\mathbf{n}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \mathbf{n} \text{ contient des carres } \hat{a}_k > 1 \\ 1 & \text{si } \mathbf{n} = 1 \\ (-1)^k & \text{si } \mathbf{n} \text{ est le produit de } k \text{ nombres premier distincts} \end{cases}$$

Les sommes de Ramanujan sont évaluées par

$$c_q(\mathbf{n}) = \left(\frac{q}{(q, \mathbf{n})} \right) \frac{\phi(q)}{\phi\left(\frac{q}{(q, \mathbf{n})}\right)} \quad (\text{C.13})$$

Il faut noter que les séquences $c_q(\mathbf{n})$ sont périodiques.

En considérant le problème du calcul de la vitesse moyenne du vent et de sa largeur spectrale par la méthode Ramanujan-Fourier, on peut utiliser le calcul de la densité spectrale de puissance dérivée par la transformée de Fourier discrète.

$$\hat{f}_i = \frac{\sum_i f_i S_{RFT}(f_i)}{\sum_i S_{RFT}(f_i)} \quad (\text{C.14})$$

Et

$$\widehat{w^2} = \frac{\sum_i (f_i - \hat{f}) S_{RFT}(f_i)}{\sum_i S_{RFT}(f_i)} \quad (\text{C.15})$$

Ou

$$\hat{v} = \frac{\lambda}{2} \hat{f} \quad (\text{C.16})$$

Avec \hat{v} et \widehat{w} sont respectivement la vitesse moyenne estimée et sa largeur spectrale, et $S_{RFT}(f_i)$ est spectre Ramanujan de la série complexe $Z(I, Q)$.

Soit une cible ponctuelle de section efficace de rétrodiffusion σ_b :

$$P_r = P_t \cdot g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_b \cdot \frac{f^4(\theta, \varphi)}{[(4\pi)^3 \cdot r^4 \cdot l^2]} \quad (\text{B.1})$$

P_t / P_r : puissances émise et reçue [W].

g : gain de l'antenne [dB].

λ : longueur d'onde ($\lambda = c / f$) [m].

r : distance au radar [m].

σ_b : la surface équivalente de la cible.

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

l = atténuation par les hydrométéores et les gaz atmosphériques.

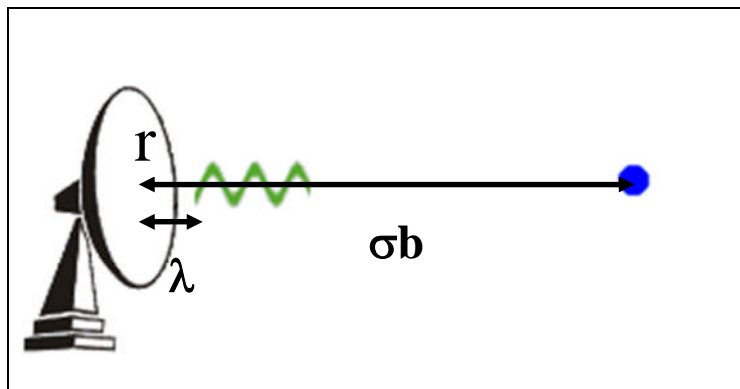


Figure : Schéma de fonctionnement d'un Radar

Intégration sur le volume de résolution :

$$P_r = P_t \cdot \eta \cdot \frac{C}{[r^2 l^2]} \quad (\text{B.2})$$

$$\eta = \text{réflectivité} = \sum \sigma_b N(D) Dd \quad (\text{B.3})$$

$N(D)$ nombre de gouttelettes d'eau de diamètre entre D et $D+dD$ par m^3 .

C = Constante Radar elle est fonction des caractéristiques techniques du Radar

$$C = g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{[c \cdot \tau \cdot \pi \cdot \theta_1^2]}{[(4\pi)^3 \cdot 16 \cdot \ln 2]} \quad (\text{B.4})$$

c = vitesse de la lumière

τ = largeur du pic d'émission

θ_l = ouverture du faisceau à -3dB

Hypothèses : particule d'eau liquide sphérique, diamètre $D \ll \lambda$ (approximation de Rayleigh)

$$\eta = \left(\frac{\pi^5}{\lambda^4}\right) * |Kw|^2 * Ze \quad (\text{B.5})$$

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

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

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

- **Le taux de pluie (m/s) s'écrit :**

$$R = \sum \left(\frac{4\pi}{3}\right) \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \cdot v_r(D) \cdot N(D) Dd \quad (\text{B.6})$$

$v_r(D)$ vitesse de chute obtenue empiriquement :

$$v_r(D) = 9.65 - 10.3 \cdot \exp(-600D) \quad [\text{Atlas et al. 1973}].$$

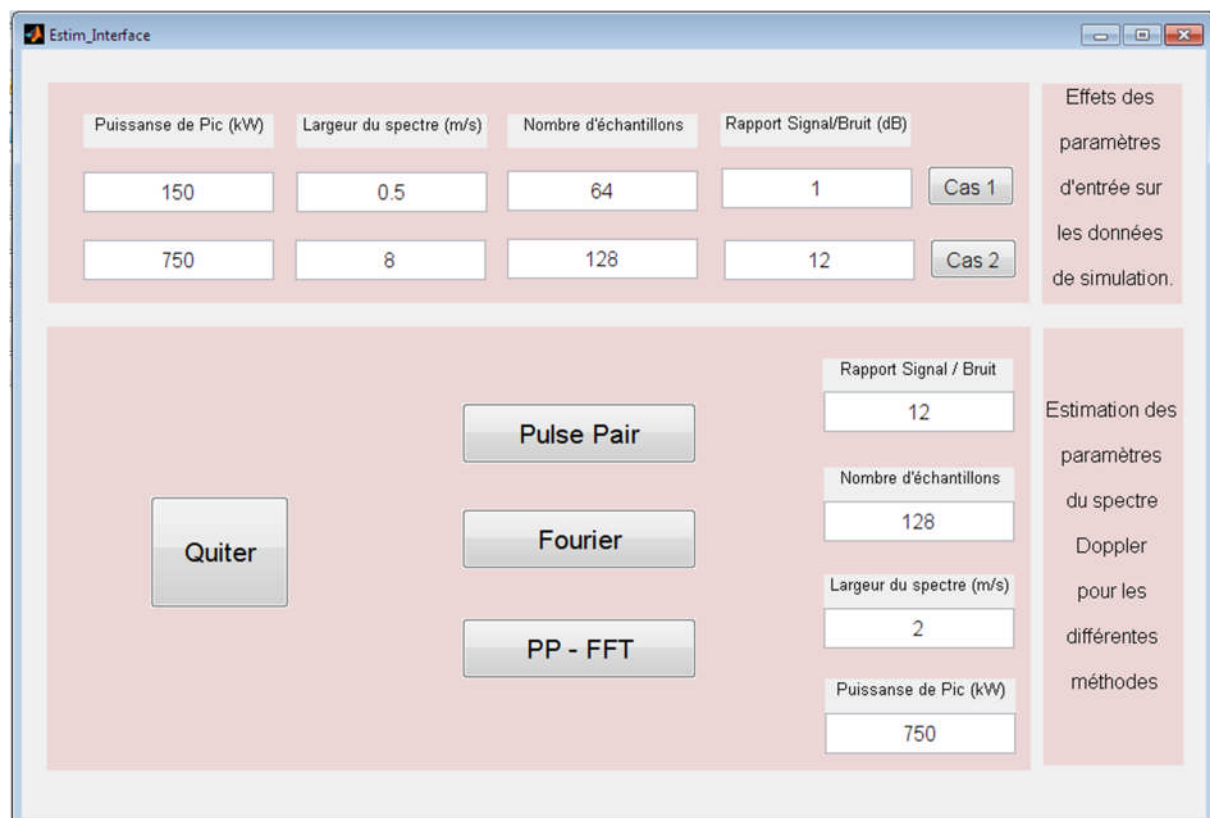
Ou

$$v_r(D) = 386.6D^{0.67} \quad [\text{Atlas et Ulbrich 1977}].$$

- ✚ Dans cette interface, on a présenté les informations de base à propos de notre travail.



- ✚ Et en cliquant sur "ENTRER", la page de simulation suivante va apparaître.



- En cliquant sur le bouton "Cas 1", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.a), Figure (IV.7.a), Figure (IV.8.a), Figure (IV.9.a).
- En cliquant sur le bouton "Cas 2", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.b), Figure (IV.7.b), Figure (IV.8.b), Figure (IV.9.b).
- En cliquant sur le bouton "Pulse Pair", on aura des figures comme celles de Figure (IV.10), Figure (IV.11), Figure (IV.12), Figure (IV.19), Figure (IV.21).
- En cliquant sur le bouton "Fourier", on aura des figures comme celles de Figure (IV.13), Figure (IV.14), Figure (IV.15), Figure (IV.20), Figure (IV.22).
- En cliquant sur le bouton "PP-FFT", on aura des figures comme celles de Figure (IV.16), Figure (IV.17), Figure (IV.18).

- ✚ Dans cette interface, on a présenté les informations de base à propos de notre travail.



- ✚ Et en cliquant sur "ENTRER", la page de simulation suivante va apparaître.



- En cliquant sur le bouton "Cas 1", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.a), Figure (IV.7.a), Figure (IV.8.a), Figure (IV.9.a).
- En cliquant sur le bouton "Cas 2", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.b), Figure (IV.7.b), Figure (IV.8.b), Figure (IV.9.b).
- En cliquant sur le bouton "Pulse Pair", on aura des figures comme celles de Figure (IV.10), Figure (IV.11), Figure (IV.12), Figure (IV.19), Figure (IV.21).
- En cliquant sur le bouton "Fourier", on aura des figures comme celles de Figure (IV.13), Figure (IV.14), Figure (IV.15), Figure (IV.20), Figure (IV.22).
- En cliquant sur le bouton "PP-FFT", on aura des figures comme celles de Figure (IV.16), Figure (IV.17), Figure (IV.18).

- ✚ Dans cette interface, on a présenté les informations de base à propos de notre travail.



- ✚ Et en cliquant sur "ENTRER", la page de simulation suivante va apparaître.

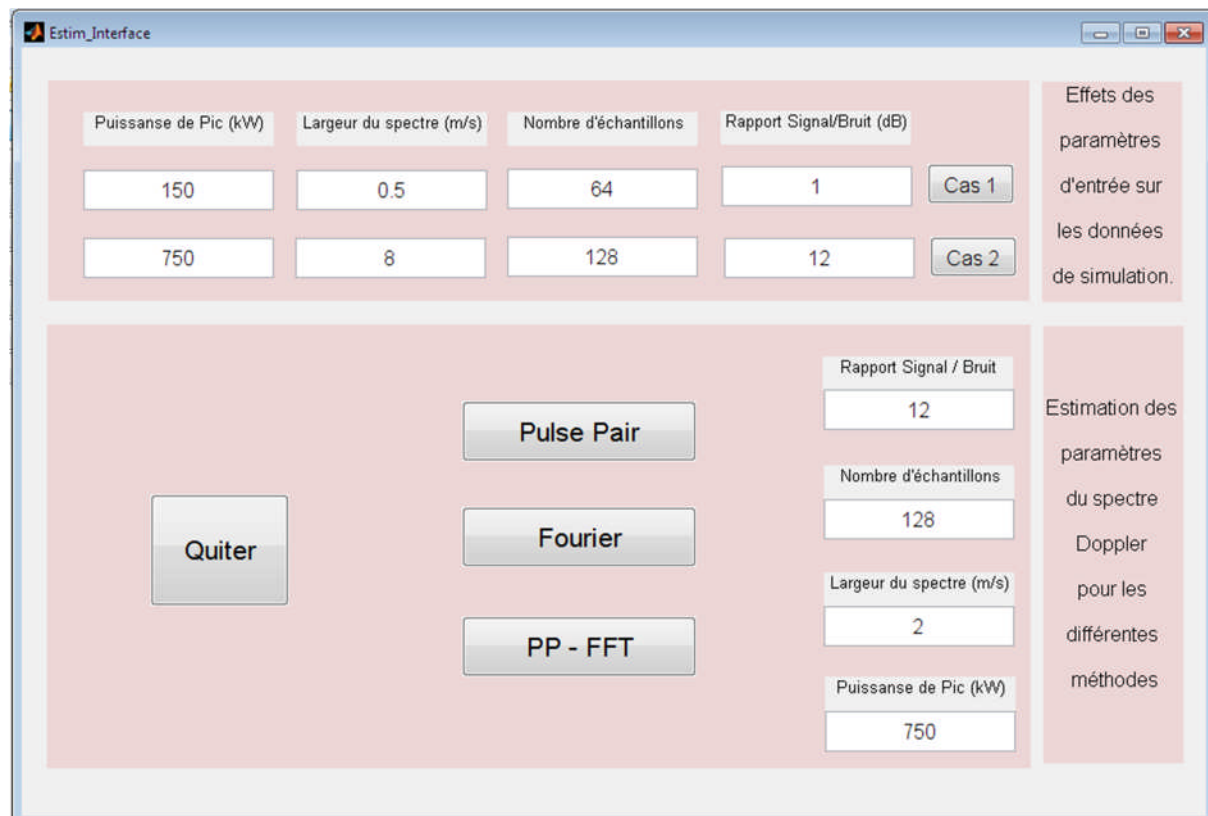


- En cliquant sur le bouton "Cas 1", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.a), Figure (IV.7.a), Figure (IV.8.a), Figure (IV.9.a).
- En cliquant sur le bouton "Cas 2", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.b), Figure (IV.7.b), Figure (IV.8.b), Figure (IV.9.b).
- En cliquant sur le bouton "Pulse Pair", on aura des figures comme celles de Figure (IV.10), Figure (IV.11), Figure (IV.12), Figure (IV.19), Figure (IV.21).
- En cliquant sur le bouton "Fourier", on aura des figures comme celles de Figure (IV.13), Figure (IV.14), Figure (IV.15), Figure (IV.20), Figure (IV.22).
- En cliquant sur le bouton "PP-FFT", on aura des figures comme celles de Figure (IV.16), Figure (IV.17), Figure (IV.18).

- ✚ Dans cette interface, on a présenté les informations de base à propos de notre travail.



- ✚ Et en cliquant sur "ENTRER", la page de simulation suivante va apparaître.



- En cliquant sur le bouton "Cas 1", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.a), Figure (IV.7.a), Figure (IV.8.a), Figure (IV.9.a).
- En cliquant sur le bouton "Cas 2", on aura des figures comme celles de Figure (IV.6.b), Figure (IV.7.b), Figure (IV.8.b), Figure (IV.9.b).
- En cliquant sur le bouton "Pulse Pair", on aura des figures comme celles de Figure (IV.10), Figure (IV.11), Figure (IV.12), Figure (IV.19), Figure (IV.21).
- En cliquant sur le bouton "Fourier", on aura des figures comme celles de Figure (IV.13), Figure (IV.14), Figure (IV.15), Figure (IV.20), Figure (IV.22).
- En cliquant sur le bouton "PP-FFT", on aura des figures comme celles de Figure (IV.16), Figure (IV.17), Figure (IV.18).