

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**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 d'obtention du Diplôme Master Académique en Aéronautique

**Option: CNS/ATM**  
Communication Navigation Surveillance/Air Traffic Management

**Thème:**  
**Estimation du Spectre Doppler Météorologique  
par des méthodes multi-résolution adaptatives**

**Réalisé par:**

Abdelhak BOUHALI

**Encadré et dirigé par:**

Dr. Mohand LAGHA

**Membres du jury:**

Mr L. BOUNATIRO

Professeur USDB

Président

Mr H. BENCHOUBENE

Maitre de conférences USDB Examineur

Mme S. BENCHIKH

Chargée de cours USDB Examinatrice

Mr M. LAGHA

Maitre de conférences USDB Promoteur

**Promotion: 2011-2012**

## ملخص:

مذكرة الماستر هذه مكرسة خصوصا للمعالجة الرقمية لإشارة رادار نبض دوبلر. هذه الدراسة تركز أساسا حول تخمين و تقدير مختلف المقادير الإحصائية لطيف الرادار و بالخصوص استطاعة ، سرعة ، مجال تغيرات السرعة ومنحى مختلف الاضطرابات الجوية الخطيرة كاضطرابات و هيجانات الرياح، الأعاصير، ... الخ.

الإثبات في البداية يتم عن طريق البرامج و المناهج الكلاسيكية التالية: Pulse Pair (زوجية النبض) ، Fourier (فورييه) و AR (ذاتية الارتداد). في سياق آخر و في مرحلة ثانية ، يتم تطوير و تطبيق تقنية حديثة مبنية على أساس مبدأ تعدد الحل (multi-resolution) تحت تسمية الموجات (les ondelettes) ذات عتبات متنوعة (ثابتة ومتأقلمة).

## Abstract:

This Master's memory is devoted essentially to the numerical processing of Weather Pulse Doppler Radar Signal. It consists principally on the estimation of Radar Spectrum Moments such as: the power, the velocity, the variance and the direction of the severe meteorological phenomena, like wind shear, tornadoes ...etc.

In a first time, the validation will be making via the following classical algorithms: Pulse Pair, Fourier and AR. In second time, is a phase of development and application of an estimator based on a multi-resolution method called « *Wavelet's Theory* » with different types of thresholding (fixed and adaptive).

## Résumé:

Ce mémoire de Master est consacré essentiellement au traitement numérique du signal Radar Météorologique Pulse Doppler. Il consiste principalement sur l'estimation des moments spectraux Radar tels que, la puissance, la vitesse, la variance et la direction des phénomènes météorologiques sévères tels que: les cisaillements de vent, tornades, ...etc.

La validation dans un premier temps se fera via les algorithmes classiques suivants: Pulse Pair, Fourier et AR. En second lieu, c'est la phase du développement et d'application d'un estimateur basé sur la méthode multi-résolution dite des ondelettes à différents types de seuils (fixes et adaptatifs).

## Remerciements

- *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 tiens à remercier également mon encadreur Dr M.LAGHA qui m'a accompagné durant ce PFE le long de tout un semestre; pour avoir proposé et dirigé ce projet, ainsi que pour l'aide et les conseils qu'il m'a prodigué.*
- *Je tiens à exprimer ainsi ma profonde gratitude à l'ensemble des étudiants Master2 CNS/ATM pour leur chaleureux accueil, ainsi que pour leurs efforts de m'intégrer dans leur groupe dès mon incorporation au DAB en Master1, sans oublier l'ensemble de mes enseignants qui n'ont plus hésité de me faire bénéficier de leurs aides; que ce soient pédagogiques ou psychologiques.*
- *J'adresse aussi mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.*
- *Au personnel des œuvres universitaires de Blida que j'adresse mes sincères reconnaissances et en particulier A.Krim de la DOUB, A.Krim et Zohir de la cité2.*
- *Sans oublier Halim A.Meziane (Air Algérie), Djamel (UGEL de la cité1) et Lyes (Mosquée de la citée1).*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

- *A mon cher père qui a souffert pour me voir grandir et instruit.*
- *A ma chère mère qui m'a donnée tant d'affection et de tendresse, qui m'a soutenue à tout moment, et qui est à l'origine de tous mes succès.*
- *A ma grand-mère.*
- *A tous mes frères, mes sœurs et leurs époux.*
- *A ma petite nièce "LINA".*
- *A ma petite cousine "KAMILIA".*
- *A toute ma famille.*
- *A mes amis: M'henni, Billal, Mouhou, Nabil, Nassim et tous ceux qui je n'ai pas pu citer sans exception.*
- *A mon copain de chambre "Kheïrou" et son ami "Ramzi".*
- *Et à tous ceux qui me connaissent ou que je connais du prêt ou du loin.*

*Abdelhak*

# SOMMAIRE

|  |     |
|--|-----|
| <b>RÉSUMÉ</b> .....  | ii  |
| <b>REMERCIEMENTS</b> .....                                       | iii |
| <b>DÉDICACES</b> .....   | iv  |
| <b>SOMMAIRE</b> .....  | v   |
| <b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....                              | ix  |
| <b>LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX</b> .....                       | xi  |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....                               | 1   |
| <b>CHAPITRE I : ATMOSPHÈRE ET PHÉNOMÈNES<br/>MÉTÉOROLOGIQUES</b> |     |
| I.1 Introduction .....   | 5   |
| I.2 Atmosphère terrestre .....                                   | 5   |
| I.2.1 Présentation générale .....                                | 5   |
| I.2.2 Composition chimique .....                                 | 5   |
| I.2.3 Paramètres atmosphériques .....                            | 6   |
| I.2.3.1 Température .....  | 6   |
| I.2.3.2 Pression atmosphérique .....                             | 6   |
| I.2.4 Atmosphère Standard .....                                  | 7   |
| I.2.5 Couches atmosphériques .....                               | 8   |
| I.3 Météorologie et phénomènes météorologiques .....             | 9   |
| I.3.1 Humidité .....   | 10  |
| I.3.2 Nuages .....   | 10  |
| I.3.3 Brouillard et brume .....                                  | 11  |
| I.3.4 Précipitations .....                                       | 11  |
| I.3.5 Orages .....   | 12  |
| I.3.6 Givrage .....  | 12  |
| I.3.7 Vent et phénomènes associés .....                          | 13  |
| I.3.8 Cisaillement de vent .....                                 | 13  |
| I.3.9 Turbulence .....   | 14  |
| I.4 Conclusion .....   | 14  |

## **CHAPITRE II : RADAR MÉTÉOROLOGIQUE PULSE DOPPLER**

|   |    |
|---|----|
| II.1 Introduction .....                                     | 16 |
| II.2 Radar conventionnel à impulsions .....                 | 16 |
| II.2.1 Principe de base .....                               | 16 |
| II.2.2 Mesures et Résolutions d'un Radar impulsif .....     | 17 |
| II.2.3 Équation Radar .....                                 | 18 |
| II.3 Radar impulsif à effet Doppler .....                   | 18 |
| II.3.1 Effet Doppler .....                                  | 18 |
| II.3.2 Mesure de la vitesse .....                           | 19 |
| II.3.3 Radar Pulse Doppler et filtre MTI .....              | 19 |
| II.4 Radar Météorologique Pulse Doppler .....               | 20 |
| II.4.1 Principe de fonctionnement .....                     | 21 |
| II.4.2 Composition de base du Radar Météorologique .....    | 22 |
| II.4.3 Équation du Radar Météorologique .....               | 24 |
| II.4.4 Acquisition des données Radar .....                  | 24 |
| II.4.5 Étalonnage du système Radar .....                    | 25 |
| II.4.6 Radar Polarimétrique et la double polarisation ..... | 26 |
| II.5 Conclusion .....                                       | 26 |

## **CHAPITRE III : ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU SPECTRE DOPPLER**

|  |    |
|--|----|
| III.1 Introduction .....                                   | 28 |
| III.2 Généralités sur les processus stochastiques .....    | 28 |
| III.2.1 Définition .....                                   | 28 |
| III.2.2 Moments statistiques .....                         | 29 |
| III.2.3 Fonction d'autocorrélation .....                   | 29 |
| III.2.4 Densité Spectrale de Puissance .....               | 29 |
| III.2.5 Stationnarité .....                                | 30 |
| III.2.6 Théorème Central Limite .....                      | 30 |
| III.3 Introduction au Traitement Numérique du Signal ..... | 30 |
| III.3.1 Échantillonnage .....                              | 31 |
| III.3.2 Transformée de Fourier Discrète .....              | 31 |
| III.4 Estimation des moments spectraux .....               | 32 |
| III.5 Estimation temporelle par Pulse Paire .....          | 34 |
| III.5.1 Estimation de la puissance totale .....            | 34 |
| III.5.2 Estimation de la vitesse moyenne .....             | 35 |
| III.5.3 Estimation de la variance .....                    | 36 |

|  |    |
|--|----|
| III.6 Estimation fréquentielle via la méthode de Fourier ..... | 36 |
| III.7 Estimation fréquentielle autorégressive .....            | 37 |
| III.8 Conclusion .....   | 38 |

## **CHAPITRE IV : ANALYSE PAR LA MÉTHODE DES ONDELETTES**

|   |    |
|---|----|
| IV.1 Introduction .....   | 40 |
| IV.2 Connaissances de base sur les ondelettes .....               | 40 |
| IV.2.1 Notion d'ondelette .....                                   | 41 |
| IV.2.2 Ondelette Mère et Ondelettes Filles .....                  | 41 |
| IV.2.3 Paramètres de translation et d'échelle .....               | 42 |
| IV.3 Transformée en ondelettes continue (CWT) .....               | 42 |
| IV.4 Discrétisation de la CWT; Séries d'ondelettes (WS) .....     | 43 |
| IV.5 Transformée en ondelettes discrète (DWT) .....               | 44 |
| IV.6 Débruitage par seuillage des coefficients d'ondelettes ..... | 46 |
| IV.7 Seuillage .....  | 47 |
| IV.7.1 Seuil minimax .....  | 48 |
| IV.7.2 Seuil universel .....                                      | 48 |
| IV.7.3 Seuil SURE .....   | 49 |
| IV.8 Choix d'ondelettes .....                                     | 49 |
| IV.9 Conclusion .....   | 50 |

## **CHAPITRE V : SIMULATIONS ET COMMENTAIRES**

|   |    |
|---|----|
| V.1 Introduction .....  | 52 |
| V.2 Modélisation statistique de l'écho météorologique .....   | 53 |
| V.3 Génération des données de simulation .....                | 54 |
| V.4 Effets des paramètres d'entrée .....                      | 55 |
| V.4.1 Effet du SNR .....                                      | 56 |
| V.4.2 Effet du nombre d'échantillons .....                    | 57 |
| V.4.3 Effet de la largeur du spectre Doppler .....            | 59 |
| V.4.4 Effet de la puissance de pic .....                      | 60 |
| V.5 Algorithmes de simulation .....                           | 62 |
| V.5.1 Méthode Pulse Paire (méthode temporelle).....           | 62 |
| V.5.2 Méthode de Fourier (méthode fréquentielle) .....        | 63 |
| V.5.3 Méthode autorégressive AR (méthode fréquentielle).....  | 64 |
| V.5.4 Méthode des ondelettes (méthode multi-résolution) ..... | 65 |
| V.6 Résultats de simulation .....                             | 66 |

|  |           |
|--|-----------|
| V.6.1 Résultats de la méthode Pulse Paire .....                        | 67        |
| V.6.2 Résultats de la méthode de Fourier .....                         | 68        |
| V.6.3 Résultats de la méthode autorégressive AR .....                  | 70        |
| V.6.4 Résultats de la méthode des ondelettes .....                     | 72        |
| V.6.5 Comparaison des différentes méthodes utilisées .....             | 73        |
| V.6.6 Simulation par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif ..... | 74        |
| V.7 Conclusion .....   | 77        |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>                                       | <b>78</b> |
| <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>                               | <b>81</b> |
| <b>ANNEXES .....</b>   | <b>85</b> |

## LISTE DES ABRÉVIATIONS:

**Ac:** Altocumulus.  
**As:** Altostratus.  
**AR:** Auto Regressive.  
**arg.:** argument.  
**ARMA:** Auto Regressive Moving Average.  
**az:** azimut.  
**C:** Célérité.  
**C.à.d.:** C'est-à-dire.  
**Cb:** Cumulonimbus.  
**Cc:** Cirrocumulus.  
**Ci:** Cirrus.  
**Cs:** Cirrostratus.  
**Cu:** Cumulus.  
**CWT:** Continuous Wavelet Transform.  
**dB:** décibel.  
**DFT:** Discrete Fourier Transform.  
**DSP:** Densité Spectrale de Puissance.  
**DWT:** Discrete Wavelet Transform.  
**FFT:** Fast Fourier Transform.  
**FI:** Fréquence Intermédiaire.  
**FIR:** Finite Impulse Response.  
**H:** Horizontal.  
**IID:** Indépendante et Identiquement Distribuée.  
**ISA:** International Standard Atmosphere.  
**max:** maximum.  
**min:** minimum.  
**MTI:** Moving Target Indicator.  
**Ns:** Nimbostratus.  
**OACI:** Organisation d'Aviation Civile Internationale.  
**PB:** Passe Bas.  
**PDF:** Probability Density Function.  
**PP:** Pulse Pair.  
**PPI:** Plan Position Indicator.  
**PRF:** Pulse Repetition Frequency.  
**QMF:** Quadratic Mirror Filter.

**Radar:** Radio Detection And Ranging.  
**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.  
**TFSD:** Transformée de Fourier d'un Signal Discret.  
**univ:** universel.  
**UV:** Ultra Violet.  
**V:** Vertical.  
**VA:** Variable Aléatoire.  
**WS:** Wavelet Series.  
**WSR-88D:** Weather Surveillance Radar-1988, Doppler.  
**WT:** Wavelet Transform.

## LISTE DES FIGURES:

|   |    |
|---|----|
| Fig I.1: Proportion des gaz atmosphériques.....   | 5  |
| Fig I.2: Les couches empilées de l'atmosphère terrestre .....                                   | 8  |
| Fig II.1: Principe de détection Radar issu de la navigation de la chauve souris .....           | 16 |
| Fig II.2: Indicateurs Radar .....   | 17 |
| Fig II.3: Cellule de résolution d'un Radar impulsif .....                                       | 18 |
| Fig II.4: Représentation de l'effet Doppler .....   | 19 |
| Fig II.5: Banque de filtres de vitesses .....   | 20 |
| Fig II.6: Principe du Radar Météorologique Doppler .....  | 22 |
| Fig II.7: Schéma bloc d'un Radar Doppler Météorologique .....                                   | 22 |
| Fig III.1: Processus d'échantillonnage .....  | 31 |
| Fig III.2: Densité Spectrale de Puissance .....   | 33 |
| Fig IV.1: Exemples d'ondelettes mères .....   | 42 |
| Fig IV.2: Schéma illustratif de la DWT et sa transformée inverse .....                          | 45 |
| Fig IV.3: Schéma synoptique du débruitage par les ondelettes .....                              | 46 |
| Fig V.1: Modélisation Gaussienne du Spectre Doppler de l'écho reçu .....                        | 53 |
| Fig V.2: Processus de génération des signaux $I$ & $Q$ .....                                    | 54 |
| Fig V.3: Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ (SNR=1dB) ...             | 56 |
| Fig V.4: Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ (SNR=10dB) ..             | 56 |
| Fig V.5: Effet du ndata sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ (ndata=64) ....         | 57 |
| Fig V.6: Effet du ndata sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ (ndata=512) ..          | 58 |
| Fig V.7: Effet de $\sigma$ sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ ( $\sigma=1$ ).....  | 59 |
| Fig V.8: Effet de $\sigma$ sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ ( $\sigma=10$ )..... | 59 |
| Fig V.9: Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ (pp=250kW) .....           | 60 |
| Fig V.10: Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux $I$ & $Q$ (PP=750kW) ....           | 61 |
| Fig V.11: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode Pulse Pair ...                | 67 |
| Fig V.12: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par Pulse Pair .....                     | 67 |

|  |           |
|--|-----------|
| Fig V.13: Estimation de la largeur spectrale par la méthode Pulse Pair .....                                 | <b>68</b> |
| Fig V.14: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode Fourier .....                              | <b>68</b> |
| Fig V.14: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode Fourier .....                              | <b>69</b> |
| Fig V.16: Estimation de la largeur spectrale par la méthode de Fourier .....                                 | <b>70</b> |
| Fig V.17: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode AR .....                                   | <b>70</b> |
| Fig V.18: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par la méthode AR .....                               | <b>71</b> |
| Fig V.19: Estimation de la largeur spectrale par la méthode AR .....   | <b>71</b> |
| Fig V.20: Estimation de la vitesse moyenne par la méthode des ondelettes .....                               | <b>72</b> |
| Fig V.21: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par les ondelettes .....                              | <b>72</b> |
| Fig V.22: Estimation de la largeur spectrale par la méthode des ondelettes .....                             | <b>73</b> |
| Fig V.23 Comparaison des différents estimateurs de la vitesse moyenne Doppler                                | <b>73</b> |
| Fig V.24 Comparaison des différents estimateurs de la largeur spectrale .....                                | <b>74</b> |
| Fig V.25: Estimation de la DSP par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif ....                          | <b>75</b> |
| Fig V.26: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif .....     | <b>75</b> |
| Fig V.27: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif ..... | <b>76</b> |
| Fig V.28: Estimation de la largeur spectrale par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif .....           | <b>76</b> |

## **LISTE DES TABLEAUX:**

|  |           |
|--|-----------|
| Tableau I.1: Conditions atmosphériques au niveau moyen de la mer .....   | <b>6</b>  |
| Tableau I.2: Classification internationale des nuages .....              | <b>10</b> |
| Tableau II.1: Pouvoirs de résolution d'un Radar impulsionnel .....       | <b>17</b> |
| Tableau II.2: Correspondance Réflectivité-Nature de précipitations ..... | <b>24</b> |

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

L'histoire du Radar est une branche de l'histoire de l'électronique qui devient un des fondements de la stratégie militaire du XX<sup>e</sup> siècle. Les premières décennies du XX<sup>ème</sup> siècle voyaient plusieurs découvertes en électronique rendant possible le développement d'un système opérationnel, juste à temps pour la Seconde Guerre mondiale. Le Radar a joué un rôle crucial dans le conflit, et a probablement eu une contribution plus importante pour la victoire des Alliés que la bombe atomique. L'expérience acquise pendant le conflit par un grand nombre de chercheurs a permis d'élargir l'utilisation du Radar à d'autres domaines que le militaire tels que: l'aviation civile, le contrôle maritime, la détection météorologique, les détecteurs de vitesse de nos routes, ...etc [1].

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. C'était le début d'une nouvelle ère des Radars sous une enveloppe météorologique [2][3].

Actuellement, les systèmes Radars Météorologiques sont assez diffusés avec de multiples applications et produits qui sont continuellement perfectionnés tant qu'en terme d'innovations matérielles (hardware) que par des développements algorithmiques (software). Ils ont comme principe de repérer les échos provenant des gouttelettes d'eau en différentes phases et formes (pluie, grêle et neige de diverses dimensions) [3].

L'utilisation de la technologie Doppler a ouvert le chemin pour nombreuses améliorations dans le champ de la météorologie, et a participé significativement au perfectionnement des performances des Radars Météo. Les Radars Météorologiques utilisant l'effet Doppler ont par conséquent la particularité de pouvoir acquérir les données de vitesse et d'étendue en plus aux données de distance, de direction et de réflectivité [4].

Le Radar Météorologique installé et prêt à l'exploitation, l'atmosphère est humide, des échos seront détectés; alors: Comment se fait l'extraction des cibles météorologiques des autres cibles? Que sera la représentation mathématique des échos reçus? Comment sont extraites les informations météorologiques et que sera l'accessoire à proposer pour une prévision optimale? Ces questions et d'autres seront l'objet de ce modeste travail.

Grosso modo, dans le cadre de ce travail, on a traité la problématique d'améliorer et de perfectionner la qualité des prévisions météorologiques dans le but d'accroître la sécurité de la navigation aérienne et/ou maritime. En ayant engagé dans ce thème, on a entamé ce rapport par une vision globale sur l'origine d'un Radar Météorologique, ainsi que son développement après la seconde guerre mondiale. Puis on a attaqué dans le premier chapitre les principales connaissances de l'atmosphère terrestre ainsi que la présentation des différents phénomènes météorologiques pouvant devenir dangereux sur la sécurité de la navigation. L'aspect physique du Radar est traité avec plus de détail dans le second chapitre tout en discutant sur les Radars en général, et le Radar Météo en particulier.

Le troisième chapitre est consacré principalement à l'estimation des paramètres du spectre Doppler des échos Radar Météorologique. Il consiste globalement d'un rappel basique des processus stochastiques, d'une introduction au traitement numérique du signal, ainsi que de la définition des différentes méthodes d'estimations du spectre Doppler ('Pulse Pair', 'Fourier' et 'AR'). Ce présent chapitre ouvre le portail au quatrième chapitre pour perfectionner l'estimation des différents paramètres Doppler, tout en se basant sur la théorie des ondelettes permettant le débruitage des composantes brutes ( $I$  &  $Q$ ) du signal Radar avant tout traitement. C'est à ce chapitre que réfère toute notre étude.

Le cinquième chapitre étant le dernier, sert comme récapitulatif de tout notre travail avec différentes simulations et commentaires des résultats obtenus. Et finalement, c'est la clôture de notre rapport par des conclusions et des perspectives sur l'ensemble du travail effectué.

# CHAPITRE I

## ATMOSPÈRE ET PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES

---

### **I.1 Introduction:**

Chaque jour, les quelques milliards occupants du globe terrestre interagissent largement avec leur espace environnant. L'acte le plus illustratif est celui de la respiration humaine ainsi que son complément biologique: l'opération de la photosynthèse. Ces deux exemples et d'autres peuvent montrer le caractère gazeux des constituants de cet espace, ce qui permet de dire que le globe terrestre est entouré d'une couche gazeuse très importante pour la continuité de la vie sur celui-ci. Cette enveloppe gazeuse est connue sous l'appellation de: «l'Atmosphère» [5][6].

Afin d'assurer l'équilibre du bilan radiatif global, l'atmosphère est en perpétuel mouvement, ce qui assure les transferts d'énergie des régions « sources » vers les régions « puits ». Ces mouvements sont à l'origine de plusieurs phénomènes dits « Météorologiques » [7].

Dans la suite de ce chapitre, on va attaquer une étude un peu générale de l'atmosphère terrestre et des phénomènes météorologiques.

### **I.2 Atmosphère terrestre:**

#### **I.2.1 Présentation générale:**

Le terme «Atmosphère» vient du mot latin «Atmosphaera» d'origine grecque «Atmos» et «Sphaera» qui signifient respectivement "Vapeur" et "Sphère". L'atmosphère date d'environ quatre milliards d'années, durant lesquelles, les éruptions volcaniques qu'avaient eu lieu en parallèles avec l'évolution de la terre étaient à la base de sa formation [5][8].

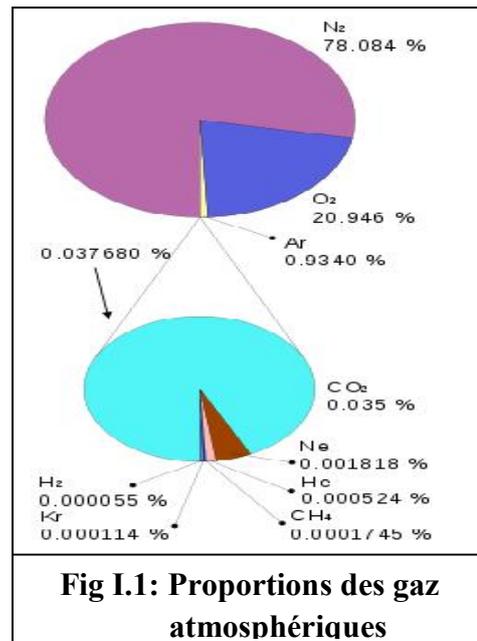
L'atmosphère terrestre est réellement formé de gaz en différentes concentrations, et de particules diverses. Ce mélange est retenu autour de la terre grâce au champ gravitationnel de celle-ci. La nature de ces gaz ainsi que leur importance relative confèrent à celle-ci son rôle de premier plan dans l'apparition et le maintien de la vie sur Terre [9].

#### **I.2.2 Composition chimique:**

Les gaz de l'atmosphère sont continuellement brassés. L'atmosphère n'est pas homogène, tant par sa composition que par ses caractéristiques physiques. La diversité des sources d'émission locales,

et les activités humaines en particulier, a influencé sur la concentration des composants de cette atmosphère.

Au niveau de la mer, l'air est fondé principalement sur la composition illustrée ci-contre. D'autres éléments d'origine naturelle sont présents en plus faible quantités, dont la poussière, le pollen et les spores ainsi que des virus, bactéries, ...etc [10].



**Fig I.1: Proportions des gaz atmosphériques**

### I.2.3 Paramètres atmosphériques:

Avant d'entamer la présentation des couches constituant cette atmosphère, on s'arrête d'abord à la définition des deux paramètres basiques gouvernant cette subdivision; *la température* et *la pression atmosphérique*.

#### I.2.3.1 Température:

Au sein de l'atmosphère, la température oscille entre  $-80^{\circ}$  et  $+55^{\circ}$ . Il est indispensable, pour la compréhension de ses fluctuations, de décrire le lien, sur le plan thermique, entre la terre et l'atmosphère. Le sol continental, mauvais conducteur de la chaleur, possède une faible inertie thermique. Il s'échauffe vite et fort mais se refroidit de même, tant sur une journée que d'une saison à l'autre. Par contre, les océans par leur nature de bon conducteurs de la chaleur ont une inertie thermique considérable. La surface océanique ne subit que de très faibles variations de températures journalières ou annuelles [6].

#### I.2.3.2 Pression atmosphérique:

L'atmosphère terrestre étant maintenue autour de la terre par sa force de gravitation, agit sur celle-ci et tous corps allié, par son poids, définissant ce qu'on appelle *la pression atmosphérique*. Cette dernière peut être définie comme étant la force qu'exerce une masse d'air sur une unité de surface.

Trois concepts fondamentaux sont nécessaires pour une bonne compréhension de la distribution de la pression atmosphérique dans une zone géographique quelconque [11]:

Les lignes isobares: Ce sont des lignes reliant les points géographiques qui ont la même pression atmosphérique.

*Les Anticyclones:* Ce sont des zones de hautes pressions. Dans ces zones le vent est faible et le temps est beau avec un ciel souvent bien dégagé.

*Les Dépressions:* Ce sont des zones de basses pressions. Dans ces zones le vent est plutôt fort et le temps est mauvais avec un ciel souvent fort encombré et des précipitations fréquentes.

**I.2.4 Atmosphère Standard [12][13]:**

Dans le cadre de multitude manœuvres humaines dans l'atmosphère terrestre, la connaissance du profil vertical des paramètres atmosphériques tels que la pression et la température est primordiale. Et comme l'atmosphère réelle n'est plus constante, un modèle virtuel doit être établi comme approximation de celle-ci pour réaliser les tâches attendues. Ce modèle est connu sous le nom de *l'atmosphère standard*.

Les premiers modèles d'atmosphère standard reviennent aux années 1920 dans l'Europe et les États Unies Américaines. Un modèle choisi et accepté par la communauté internationale avait été introduit en 1952 par l'OACI. L'atmosphère standard internationale (ISA) est définie dans le document 7488/2 de l'OACI.

La définition de l'atmosphère standard repose sur les hypothèses suivantes:

- ✓ L'air est assimilé à un gaz parfait.
- ✓ l'atmosphère étant au repos par rapport au sol, sa distribution verticale satisfait à l'équation d'équilibre hydrostatique (équation de Laplace):  $dP = \rho \cdot g \cdot dZ$  Avec  $\rho$ : la masse volumique de l'air.
- ✓ Les conditions atmosphériques au niveau moyen de la mer adoptées par l'ISA sont données dans le tableau suivant:

| Grandeur                | Symbole  | Valeur numérique           |
|-------------------------|----------|----------------------------|
| Pression                | $P_0$    | 1013,25 hPa                |
| Masse volumique         | $\rho_0$ | 1,225 kg/m <sup>3</sup>    |
| Température             | $T_0$    | 288,15 K                   |
| Vitesse du son          | $a_0$    | 340,294 m/sec              |
| Accélération de gravité | $g_0$    | 9,80665 m/sec <sup>2</sup> |

**Tableau I.1: conditions atmosphériques au niveau moyen de la mer.**

- ✓ Les lois de température et de pression sont données par:

$$T = T_b + \lambda \cdot (Z - Z_b) \quad \text{et} \quad P = P_b \cdot \exp\left[-\frac{g}{R \cdot T_b} \cdot (Z - Z_b)\right]$$

L'indice (b) indique la limite inférieure de la couche atmosphérique où se font les calculs.  $\lambda$  est la variation de T° en fonction de l'altitude.

### I.2.5 Couches atmosphériques:

L'atmosphère terrestre s'étend verticalement du niveau moyen de la mer jusqu'à quelques milliers de kilomètres dans l'espace extérieur. Elle ne possède pas de limite supérieure bien définie car sa densité décroît graduellement vers l'espace. Elle est constituée d'un empilement de couches horizontales. La limite de chaque couche est caractérisée par une inversion de régime thermique [5][14]:

- **La troposphère:** Elle s'étend du sol à 12 km d'altitude en moyenne. Elle est le siège de la plupart des phénomènes météorologiques, et est caractérisée par une décroissance linéaire de température de 6°C/km jusqu'à une limite supérieure appelée *tropopause* pour atteindre – 56 °C [10][14].

- **La stratosphère:** C'est une couche calme et très stable située en moyenne entre 10 km et 50 km d'altitude. Elle contient la fameuse *couche d'ozone* servant de bouclier protecteur en empêchant la majorité des rayons ultraviolets (UV) d'atteindre la surface de la Terre et de nous brûler. La température s'augmente de – 56 °C à la base, jusqu'à 0 °C au sommet, appelé *stratopause* [10][15].

- **La mésosphère:** Située en moyenne entre 50 et 85 km d'altitude. La température décroît à nouveau avec l'altitude, atteignant –100 °C dans son sommet, appelé *mésopause* qui présente le lieu le plus froid de la terre. C'est aussi dans la mésosphère que la plupart des météorites brûlent en entrant dans l'atmosphère [10].

- **La thermosphère:** Elle s'étend de la mésopause jusqu'aux environs 640 km d'altitude et correspond à une forte croissance de la température. Elle contient l'essentiel de l'ionosphère. Elle est bornée dans sa partie supérieure par la *thermopause* [10][11][14].

- **L'ionosphère:** C'est une couche atmosphérique fortement ionisée par les radiations solaires. Elle chevauche à la fois la thermosphère et l'exosphère. Elle joue un rôle très important dans l'électricité atmosphérique et forme le bord intérieur de la magnétosphère. À cause de ses particules chargées, elle est d'une très grande importance pratique comme par exemple la propagation des ondes radio sur la Terre [10].

- **L'exosphère:** Cette couche réalise la transition entre l'atmosphère et l'espace libre. Elle commence par la thermopause comme la limite inférieure, vers 500 à 1000 km et s'étire jusqu'à 10 000 km d'altitude. Elle contient des particules circulant librement et qui migrent ou proviennent de la magnétosphère ou du vent solaire [10].

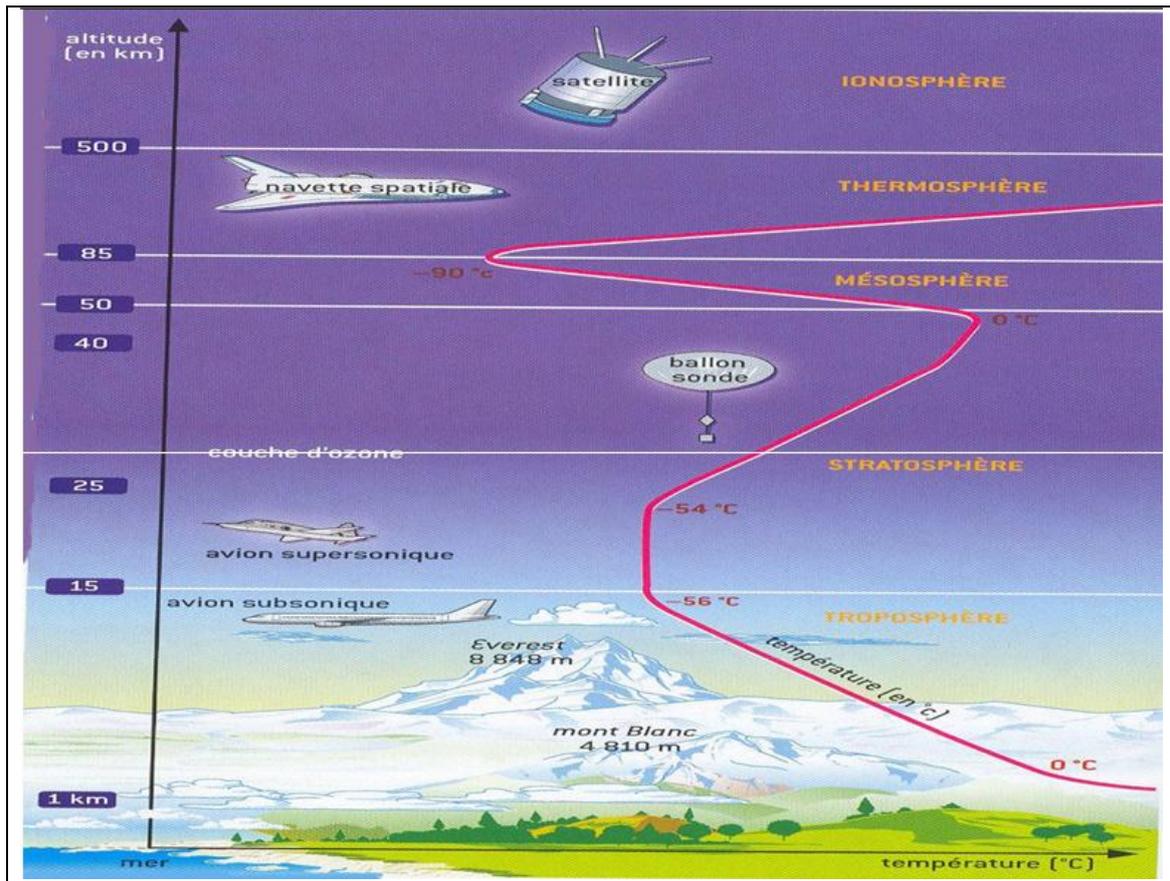


Fig I.2: Les couches empilées de l'atmosphère terrestre.

### I.3 Météorologie et phénomènes météorologiques:

Pour toutes les civilisations agricoles ou pastorales, le temps qu'il a fait, qu'il fait ou qu'il fera a toujours été une préoccupation importante. La connaissance préalable des phénomènes atmosphériques, leur formation et évolution dans le temps, était d'une importance primordiale dès la grecque antique. Cette dernière, est la civilisation qu'avait été à l'origine d'apparition d'une science permettant de résoudre, de traiter et de gérer ce genre de problématiques: « *La Météorologie* ».

Le mot météorologie est une combinaison de deux mots grecques; "meteor" désignant les particules suspendues dans l'atmosphère, et "logos" signifiant discours ou connaissance. La météorologie désigne alors, la science dont l'objet sera la connaissance des météores et les caractères de chacun d'eux, ainsi que celle de leur source, des causes qui les produisent, et des circonstances essentielles à la production de chacune de leurs sortes. Elle réfère plus précisément, aux courtes variations des caractéristiques physiques de la troposphère y incluent la température, la pression, l'humidité, ...etc [8][16][17].

### I.3.1 Humidité:

L'air atmosphérique contient en plus de l'oxygène, l'azote, et d'autres constituants; de la vapeur d'eau. Celle-ci provient de l'évaporation de l'eau au-dessus des mers, des lacs, des sols humides ou elle est produite par l'activité humaine. Elle définit un paramètre météorologique très important connu dans le jargon des météorologistes par: "*l'Humidité*". La richesse en vapeur d'eau décroît en altitude, à mesure qu'on s'éloigne de ces sources, pour disparaître finalement dans la stratosphère [15][17][18]. Grand nombre de concepts liés à l'humidité sont définis, et citons ci-après ceux qui apparaissent les plus importants [11][18]:

- **Air humide:** C'est un mélange d'air sec et de la vapeur d'eau.
- **Air saturée:** C'est un air humide dont il ne peut plus absorber davantage de vapeur d'eau, c.à.d. l'humidité relative a atteint 100%.
- **Point de rosé (dew point):** Correspond à la température pour laquelle la saturation en vapeur d'eau est atteinte durant le refroidissement à pression constante.
- **Point de condensation:** Correspond à la température pour laquelle est atteinte la saturation lorsque le refroidissement est provoqué par une baisse de la pression. Si la température atteint le point de condensation, des gouttelettes d'eau en suspension apparaissent. Il se forme un nuage dont la base se situe au niveau du point de condensation.

### I.3.2 Nuages:

L'air contient de la vapeur d'eau à fur et à mesure qu'il soit chaud, jusqu'à une limite maximale dite de "*saturation*". Lorsqu'il arrive à cet état, la vapeur d'eau est obligée de se condenser en eau ou en glace selon la valeur de la température ambiante. Une fois condensée, l'eau ou la glace renvoie les rayons lumineux du soleil, le nuage apparaît. La présence d'impuretés servant de noyaux de condensation, facilite la formation des nuages (poussières, pollens, sel marin,...). L'aspect des nuages dépend de trois critères essentiels : l'éclairage du soleil, la stabilité de l'atmosphère ainsi que la nature de ses constituants et leur densité [6][11][18].

#### ❖ **Subdivision et classification internationale des nuages:**

Conventionnellement, les nuages sont divisés en dix genres, muni chacun d'une abréviation internationale en deux lettres. Ils sont représentés comme montré ci-dessous [6][11][18][19]:

| Nom                | Apparence et Caractéristiques   | Précipitation  |
|--------------------|---|--|
| Cirrus (Ci)        | Filaments globalement blancs, peu humides et très faible température.                 | Jamais   |
| Cirrostratus (Cs)  | Voile transparent et blanchâtre.  | Pluie dans 48heures                                  |
| Cirrocumulus (Cc)  | Couche mince blanche, sans ambres propres.  | Jamais   |
| Alto cumulus (Ac)  | Nappe blanche ou grise, avec ambres propres.  | N'atteignant pas le sol                              |
| Altostratus (As)   | Couche grisâtre ou bleuâtre, couvre entièrement ou partiellement le ciel.             | Pluie ou neige plus ou moins continues               |
| Stratus (st)       | Couche généralement grise à base assez uniforme.                                      | Bruines, neige ou grains                             |
| Nimbostratus (Ns)  | Couche grise, souvent sombre, épaisseur suffisante de masquer complètement le soleil. | chutes importantes et continues de pluie ou de neige |
| Stratocumulus (Sc) | Couche grise ou blanchâtre.   | Faible et stable                                     |
| Cumulonimbus (Cb)  | Nuage dense, puissant, extension verticale considérable.                              | Fortes précipitations de tous genres                 |
| Cumulus (Cu)       | Sous forme d'un chou-fleur, base plate et sombre, sommet blanc.                       | Sous forme d'averses                                 |

**Tableau I.2: Classification internationale des nuages.**

### **I.3.3 Brouillard et brume:**

Certains phénomènes météorologiques présentent de grands dangers pour l'aéronautique. Citons à titre d'exemple *le brouillard* et *la brume*. Ils sont des phénomènes météorologiques analogues qui diffèrent juste par leur intensité. *Le brouillard* est une suspension de fines gouttelettes d'eau réduisant la visibilité à moins d'1 Km. *La brume*, moins intense, laisse une visibilité réduite mais supérieure à 1 Km, et elle peut se former en pleine journée s'il fait très chaud et très humide. La formation du brouillard est favorisée par la présence de pression élevée, brève baisse de température le soir, une forte humidité et l'absence ou la pénurie du vent [11].

### **I.3.4 Précipitations:**

Lorsque la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est intense, le diamètre des gouttelettes qui forment les nuages s'accroît rapidement. En suite, la vitesse de chute de ces gouttelettes devient appréciable, et on dit qu'il y a *précipitations*. Celles-ci peuvent être définies comme étant un ensemble de particules aqueuses liquides ou solides,

qui tombent d'un nuage ou d'un ensemble nuageux et qui atteint le sol. Leur nature dépend de la nature des nuages qui les génèrent, ainsi que de la répartition verticale de la température. Les précipitations les plus répandues dans notre atmosphère sont en bref [6][18]:

- Pluie: gouttes d'eau de diamètre de 0,5 à 6mm.
- Bruine: gouttes d'eau de diamètre inférieur à 0,5mm.
- Neige: cristaux de glace ramifiés de diamètre de l'ordre de 0,1mm agglomérés en flocons.
- Grésil: granules de glace de diamètre inférieur à 5mm.
- Grêle: globules ou morceaux de glace de 5mm à 5cm de diamètre.

On appelle par ailleurs *chutes*, les précipitations de longue durée, qui durent souvent plus d'une heure, et les *averses* les précipitations de petites durées, qui durent moins d'une heure.

### I.3.5 Orages:

De violentes perturbations de l'atmosphère, accompagnées d'une ou plusieurs décharges brusques d'électricité atmosphérique, se manifestant par une lueur brève (éclair) et par un bruit sec ou un roulement sourd (tonnerre), représentent ce qu'on dénomme par "*Orage*". Les orages sont plus souvent accompagnés de précipitations sous forme d'averses de pluie, de neige, de grésil, ...etc. Ils se forment au sein des cumulonimbus [6][11]. Ils sont très violents et très fréquents à l'équateur. Leur durée va de quelques minutes à quelques dizaines de minutes mais les précipitations qui les accompagnent sont très violentes et très dangereuses pour les aéronefs. Il est donc primordial de ne pas voler dans ou sous les cumulonimbus pour éviter tous les risques liés à l'orage [11].

### I.3.6 Givrage:

Le givre est un dépôt de glace opaque ou transparent qui se forme à la surface du sol ou des objets (aéronefs, ...etc). Les risques de givrage sont évalués en fonction de leur intensité (faible, modéré ou fort). Les conditions de givrage faible se rencontrent dans les nuages stables et les brouillards peu denses, il n'est pas dangereux si on prend les mesures pour éviter qu'il ne s'aggrave. Celles de givrage modéré dans les nuages instables et les brouillards denses, et peuvent être contrôlés par les dispositifs antigivrage. Ainsi, il faut toujours éviter soigneusement les zones de fort givrage, qui n'apparaissent quasiment que dans les nuages très instables et avec les précipitations surfondues [11][18].

---

### I.3.7 Vent et phénomènes associés:

Le vent correspond à la composante horizontale du déplacement d'une masse d'air par rapport au sol. La cause principale de ce mouvement est la différence de pression. Il résulte de l'action de trois types de forces sur l'air en mouvement; la force de gradient de pression (entraînant l'air, des hautes vers basses pressions), la force de Coriolis (due au mouvement rotatif de la terre) et la force de frottements (par d'autres particules qui, ne le dévient pas, mais le freinent) [11][18].

Pour les pilotes d'aéronefs, le vent est un facteur très important. Il peut entraîner de sérieuses menaces au cours du roulage entre la piste et le parking, ou au cours de l'atterrissage et du décollage. Il peut engendrer aussi de pertes de contrôle de l'appareil ou le dépassement de résistance structurelle, et sans négliger la surconsommation dans les branches vent de face [11]. Citons quelques exemples de ces vents turbulents:

- **Grains:** C'est un phénomène atmosphérique caractérisé par une variation très importante de la vitesse du vent, débutant brusquement, d'une durée de l'ordre des minutes et s'amortissant plutôt rapidement, et souvent accompagné d'averses ou d'orages [6].

- **Tornades:** C'est une colonne d'air en violente rotation, suspendue à la base des cumulonimbus et s'étendant jusqu'au sol, en accélérant sa rotation. On ne peut jamais prévoir sa trajectoire [20].

### I.3.8 Cisaillement de vent:

Comme déjà été défini, le vent peut être décrit en chaque point de l'atmosphère par sa propre vitesse et direction. La variation ou le gradient de l'un de ces deux paramètres entre deux points suffisamment proche est connu dans le jargon des météorologistes par «*Cisaillement de vent*». Selon que les deux points sont à des altitudes différentes ou à des coordonnées géographiques différentes, le cisaillement est dit *vertical* ou *horizontal*. L'organisation d'aviation civile internationale OACI l'a défini comme étant "*un changement de vitesse et/ou de direction du vent dans l'espace, courants ascendants et descendants compris*". À son tour, l'organisation mondiale de la météorologie, a donné la définition suivante: "*C'est une variation locale du vecteur vent ou d'une de ses composantes dans une direction déterminée*". Pour l'aéronautique, le cisaillement de vent présente un danger majeur pendant les phases d'atterrissage et décollage, alors que les vitesses et les hauteurs sont proches du niveau critique. En effet,

---

entre 1964-1985, le cisaillement du vent a été directement ou indirectement relié à 26 catastrophes aériennes civiles majeures aux États-Unis, causant 620 morts et 200 blessés. De ces accidents, 15 se sont produits pendant le décollage, 3 pendant le vol et 8 lors de l'atterrissage [6][21][22]. Son apparition est très favorable sous certaines situations météorologiques plus ou moins violentes, et/ou certains effets orographiques; à savoir: les orages et phénomènes associés, les tornades, les micro-rafales les plus appropriés pour ceux-ci (Coup de vent violent très brefs, provoquant de forts courants verticaux), ainsi que la circulation du vent autour des obstacles et du relief. Ceci peut engendrer à son tour, de fortes turbulences présentant des menaces pour la navigation aérienne en particulier [23].

### **I.3.9 Turbulence:**

L'évolution des masses d'air dans l'atmosphère, ne se produit pas exclusivement dans le plan horizontal; connu par "le vent". Il existe donc une composante verticale du déplacement de l'air, nommée "*Turbulence*". Celle-ci est un phénomène souvent observé dans l'atmosphère, et génère des mouvements parfois violents pouvant perturber le vol, présentés sous forme de tourbillons de dimensions variant de l'échelle moléculaire à l'échelle de l'hémisphère. Les axes de rotation de ces tourbillons sont verticaux, horizontaux ou obliques. Même si les accidents avec destruction des aéronefs restent exceptionnels, les accidents corporels (passagers et majoritairement équipage) dus à la turbulence sont nombreux, surtout en aviation commerciale. 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 appropriés [6][24].

### **I.4 Conclusion:**

On a revu brièvement dans ce chapitre quelques notions de base liées à l'étude de l'atmosphère et les phénomènes qui la caractérisent. Celle-ci étant le siège de toutes les perturbations météorologiques, son étude et la connaissance de ses caractéristiques s'avère de très grande importance pour la maîtrise de ces phénomènes météorologiques, et ce afin de pouvoir les mentionner et les prévoir avant qu'ils arrivent, grâce à l'exploration des instruments plus en plus évolués; les Radars Météorologiques Pulse Doppler qui seront l'objet de notre étude dans le prochain chapitre.

# **CHAPITRE II**

## **RADAR MÉTÉOROLOGIQUE PULSE DOPPLER**

---

## II.1 Introduction:

L'idée de détecter et de repérer un objet à distance, la télédétection, avait été posée, suggérée et puis vieillie avant que les premières tentatives de la mettre en cause soient accomplies. Celle-ci, requise principalement par les marins navigants, afin de garantir la sûreté et la sécurité de leur navigation dans de mauvaises conditions de visibilité, a vu ses premiers pas en dix-neuvième siècle lorsque, d'importants développements ont été inscrits dans plusieurs domaines, intéressant notablement cette science. Comme beaucoup des inventions technologiques, le système de repérage et de localisation d'objets dans l'espace; *le Radar*, a connu d'importants développements durant la seconde guerre mondiale, pour des fins purement militaires, avant qu'il s'oriente vers d'autres applications d'autant civiles que militaires, à la fin du conflit. La diversité des types du Radar, se manifeste par la variété des fonctions dont doté chacun d'eux. Le long de ce chapitre, on s'intéresse principalement aux Radars Météorologiques Pulse Doppler.

## II.2 Radar conventionnel à impulsions:

### II.2.1 Principe de base:

Le Radar; l'acronyme de *Radio Detection And Ranging* qui signifie *Détection et Télémétrie Radioélectriques*, est un système opérationnel dont le fonctionnement est très simple, et est similaire au mécanisme qu'utilise la chauve-souris pour deviner le bon chemin lorsqu'elle se met en vol. Elle utilise l'émission de sons ultrasoniques à une certaine fréquence (120kHz) et puis écoute aux échos revenants de ceux-ci. Ces échos la rendent capable de localiser et même d'éviter les objets se trouvant le long de son chemin.

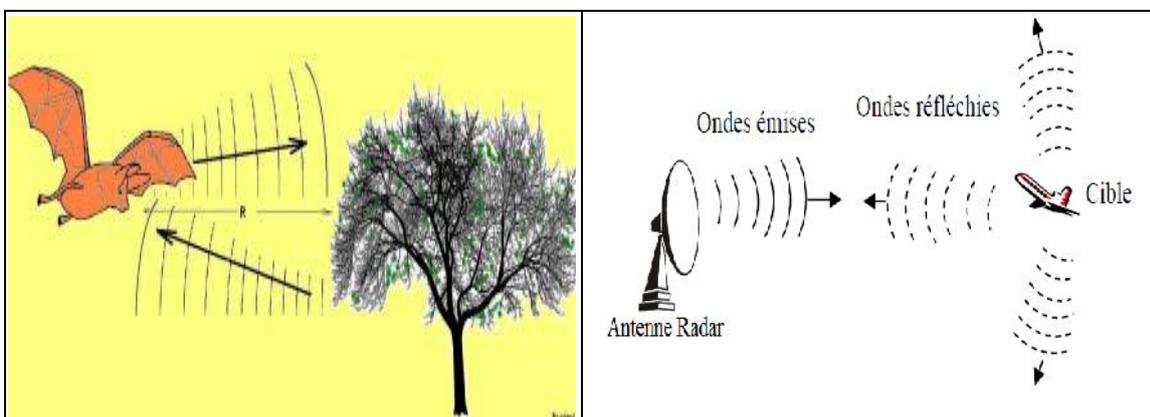
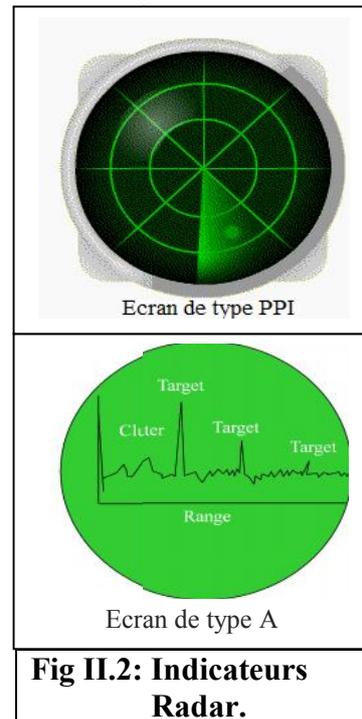


Fig II.1: Principe de détection Radar issu de la navigation de la chauve-souris.

Dans un système Radar, tirant de la propriété des ondes électromagnétiques de se réfléchir sur tout obstacle, une cible incluse dans son volume de couverture peut être détectée en reflétant une totalité ou une partie de l'énergie émise. En effet, le signal émis par le Radar est guidé vers une certaine direction tout à fait comme les ondes lumineuses ou sonores. Et à la présence d'une cible dans cette direction, le signal émis se réfléchit et se propage dans tous les sens dépendamment de la surface réfléchissante. Une faible portion du signal réfléchi, rejoint l'étage récepteur du Radar pour restituer les informations utiles, et les afficher sur des interfaces homme-machine, comme *le PPI*, *les indicateurs de type A*, ...etc [4][25].



**Fig II.2: Indicateurs Radar.**

**II.2.2 Mesures et Résolutions d'un Radar impulsionnel:**

Le signal émis par un Radar conventionnel à impulsions, est formé d'impulsions de durée ( $\tau$ ) très brève, de haute fréquence ( $PRF=1/Tr$ ) et de forte puissance. Après l'émission d'une impulsion, suit un temps d'écoute plus ou moins long ( $Tr - \tau$ ), durant lequel les échos éventuels sont reçus, avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise [25].

La mesure de la distance  $d$  se fait par le calcul du temps d'aller-retour de l'impulsion émise:  $d=C\Delta t/2$ . Par contre, la mesure de la direction se fait par la connaissance de l'orientation du lobe principal de l'antenne au moment de la détection (azimut et site).

On définit ainsi le pouvoir de résolution par *l'écart minimal qui doit y avoir entre les estimations d'un même paramètre pour que les mesures concernant les deux cibles soient distinctes* [26]. Les pouvoirs de résolution en distance, angulaire et en vitesse d'une cible située à une distance  $R$  du Radar, sont illustrés dans le tableau suivant:

| Résolution en distance              | Résolution angulaire   | Résolution en vitesse   |
|-------------------------------------|--|---|
| $\Delta R = C \cdot \frac{\tau}{2}$ | $\Delta_{az} = 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\theta_{-3dB}^{az}}{2}\right)$ $\Delta_{site} = 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\theta_{-3dB}^s}{2}\right)$ | $\Delta f_d = \frac{1}{\tau}$ $\Delta v_r = \lambda \frac{\Delta f_d}{2}$ |

**Tableau II.1: Pouvoirs de résolution d'un Radar impulsionnel.**

Les résolutions en distance et angulaire conduisent à la notion de *cellule de résolution* ou *cellule distance*: il est impossible de distinguer entre deux cibles se trouvant à l'intérieur d'une même cellule. On considère généralement que son volume est fixé par les angles d'ouverture en azimut et en site du lobe d'antenne et par la résolution en distance  $\Delta R$  [25].

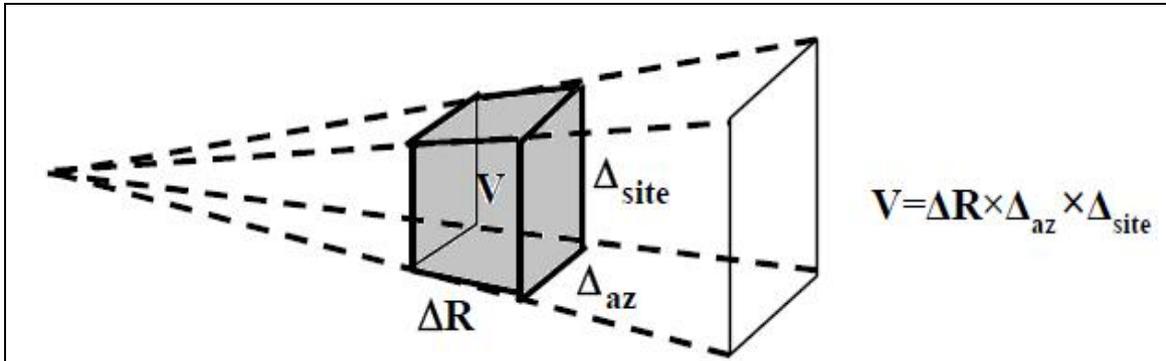


Fig II.3: Cellule de résolution d'un Radar impulsif.

### II.2.3 Équation Radar:

La relation fondamentale reliant les différentes caractéristiques du Radar, la cible et le signal reçu prend l'appellation de *l'équation Radar*, qui peut être considérée comme l'unique et la plus significative description des facteurs influençant les performances du système. Elle est donnée par la formule suivante: **(Voir Annexe A)**

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot K \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot L_s \cdot \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{\min}}} \quad \text{(II.1)}$$

### II.3 Radar impulsif à effet Doppler:

Le *Radar Pulse Doppler* est un système quadridimensionnel capable de détecter une cible, sa localisation en 3D ainsi que sa vitesse radiale. Il tire parti de *la variation de la fréquence Doppler* du signal impulsif émis pour en extraire les diverses informations utiles, tout en s'appuyant sur un signal impulsif au lieu d'un signal à ondes continues [27].

#### II.3.1 Effet Doppler:

La variation apparente de la fréquence d'une onde émise par une source en mouvement par rapport à un observateur, est connue dans l'argot des physiciens par: *l'effet Doppler*. L'effet tient son nom du physicien Autrichien *Christian Johann Doppler*, qui a établi le principe physique

du phénomène sur les ondes sonores en 1842, comme est montré dans la figure ci-dessous. L'effet Doppler est également appelé *l'effet Doppler-Fizeau*, en hommage au physicien *Hippolyte Fizeau* qui a étendu ce phénomène aux ondes lumineuses. Aujourd'hui, l'effet Doppler-Fizeau devient un outil très important dans les systèmes de transmission et les systèmes Radar, grâce à sa généralisation aux ondes électromagnétiques les plus utilisées actuellement [4][28].

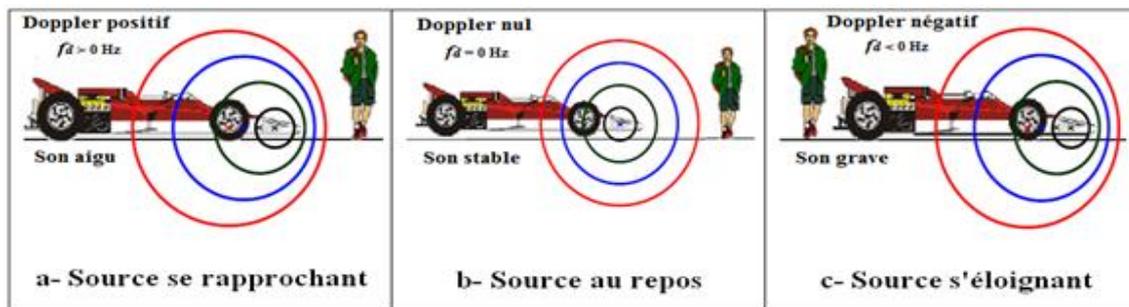


Fig II.4 Représentation de l'effet Doppler

### II.3.2 Mesure de la vitesse:

La mesure de vitesse d'une cible peut être effectuée de deux façons: soit par le calcul, à partir des mesures successives de la distance dans des intervalles de temps bien connus; ou bien directement par l'application de l'effet Doppler qui est généralement le plus exploité dans la physique moderne [26] (Voir Annexe B).

### II.3.3 Radar Pulse Doppler et filtre MTI:

Les systèmes actuels de détection Radar sont généralement dotés de calculateurs utilisant l'effet Doppler pour détecter les cibles mobiles et de rejeter les objets fixes ou lentement mobiles. De tels systèmes peuvent être soit des filtres *MTI* ou bien des *Radars Pulse Doppler*. La distinction entre les deux, est basée principalement sur leurs caractéristiques de base, définies principalement par la période ou la fréquence de répétition des impulsions. En effet, les systèmes MTI réfèrent généralement à des Radars dont la PRF est choisie faible, de telle sorte à éviter l'ambiguïté en distance. Tandis que le Radar Pulse Doppler présente de hautes et de moyennes PRF. Une moyenne PRF présente une ambiguïté simultanée de distance et de vitesse, tandis qu'une haute PRF provoque des mesures ambiguës de distance et quelques valeurs aveugles de la vitesse; dont les cibles sont considérées comme fixes (fouillis). Ces vitesses aveugles ont lieu, lorsque le décalage Doppler du signal du Radar soit un multiple de sa PRF.

Donc, plus grande est la PRF, plus est grande la première vitesse aveugle. Ainsi pour en extraire les cibles mobiles dans le fouillis, le Radar Pulse Doppler utilise une banque de  $N$  filtres pour détecter  $N$  vitesses différentes dans une cellule distance, ce qui le rend plus précis que les MTI malgré la vaste utilisation de ces derniers [4][25][29][30].

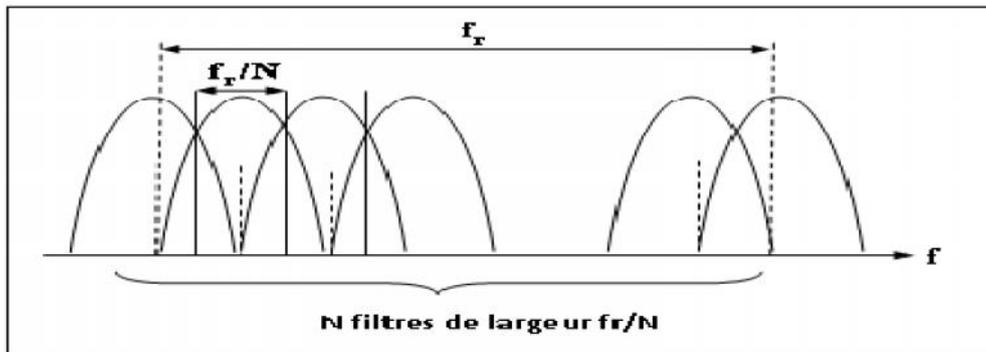


Fig II.5 Banque de filtres de vitesses.

## II.4 Radar Météorologique Pulse Doppler:

Les Radars ont d'abord été développés à partir des années 1930 pour qu'ils soient utilisés dans la détection des avions ennemis durant la seconde guerre mondiale. Évolus et développés durant, et surtout après le conflit, les systèmes Radar deviendront plus puissants et plus directs, avec des récepteurs très sensibles et des transmetteurs cohérents. Ils firent apparaître sur les écrans, des échos d'autres natures que ceux des avions, qui sont considérés en premiers temps comme étant des échos parasites. *Le Radar Météorologique* résulte donc du développement dans lequel l'écho parasite du Radar classique devient l'objet de la mesure. Depuis les tous premiers Radars Météorologiques conçus après la seconde guerre mondiale (1945), de nouvelles générations plus performantes ont vu le jour. Actuellement, l'utilisation des techniques du Radar Doppler Pulsé, a permis de prévenir l'intensité et la vitesse de rapprochement des différentes perturbations météorologiques, et particulièrement celles présentant de sérieuses menaces sur la navigation aérienne comme les orages, les tornades, les cisaillements de vent, ...etc. Les Radars utilisés pour les prévisions météorologiques développés récemment, sont des Radars impulsionsnel à effet Doppler utilisant la particularité des ondes émises de se réfléchir sur des gouttelettes d'eau constituant l'air humide. Ils sont nommés par *Radar Météorologique Pulse Doppler* [31][32].

### II.4.1 Principe de fonctionnement:

Un Radar Météorologique est un Radar impulsif utilisant l'effet Doppler pour repérer les phénomènes et les perturbations météorologiques, prévenir leurs déplacements, déterminer leurs types (pluie, neige, ... etc.) et de prévenir leurs intensités. Le principe général du fonctionnement d'un Radar Météorologique Pulse Doppler est approximativement identique à celui des Radars Pulse Doppler conventionnels, sauf que les cibles cette fois-ci sont des gouttelettes d'eau subsistant dans l'atmosphère, grâce à l'utilisation des signaux hyperfréquences en émission, s'opérant dans les différentes bandes: L, S, C, X ou K selon la mission dont le Radar est affecté (**Voir Annexe C**). Le processus de détection des cibles météorologiques peut être décrit comme suit [2][4][33]:

- L'antenne balaye continûment l'horizon avec une vitesse de rotation constante (quelques tours/min) afin de garantir une meilleure couverture.
- Pendant sa rotation, l'antenne émet des ondes électromagnétiques très aiguës sous forme de très brèves impulsions, se propageant à la vitesse de la lumière, et se dirigeant en destination des précipitations.
- Lorsqu'une impulsion entre dans une zone de précipitations, une petite partie est rétrodiffusée vers le Radar pendant que le reste continue. *Ce retour est le total des retours de toutes les gouttelettes dans le volume sondé.* Le temps qui s'écoule entre l'émission et la réception du signal est une mesure de la distance des précipitations par rapport au Radar, tandis que l'intensité du signal reçu donne une estimation de leur intensité, et la variation de la fréquence Doppler permet d'extraire les données correspondant aux vitesses de leur déplacement.
- Après avoir effectué une rotation complète à un angle d'élévation donné, l'antenne sera haussée à un angle supérieur et effectuera une autre rotation. Ce scénario se répétera sur plusieurs angles de telle façon que le Radar effectuera un balayage en trois dimensions de l'atmosphère durant 5 ou 10 minutes. On aura ainsi une idée des précipitations depuis un niveau près du sol jusqu'à environ 15 à 20 km d'altitude et sur 250 km de distance. Le nombre et les angles d'élévation sont utilisés selon des besoins spécifiques. Pour obtenir le meilleur estimé des quantités de pluie tombée, un nombre limité d'angles à relativement bas niveau est largement suffisant, tandis que dans les régions où les orages sont prédominants, une couverture verticale demeure indispensable et inévitable.

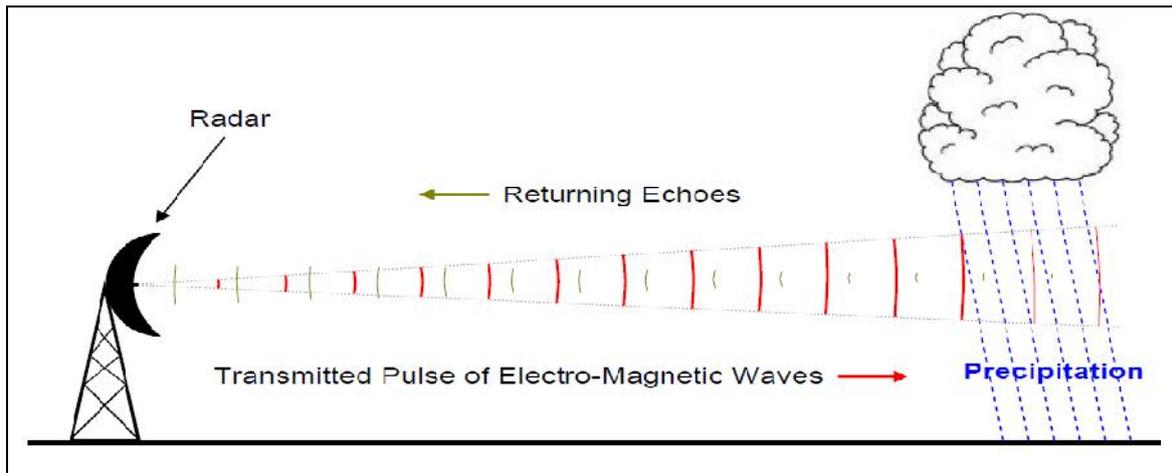


Fig II.6 Principe du Radar Météorologique Doppler.

### II.4.2 Composition de base du Radar Météorologique:

Principalement, le Radar Météorologique Doppler est un assemblage de fonctions tant matérielles que logicielles. Il est constitué d'un *émetteur* ou *transmetteur* générant de signaux hyperfréquences, d'une *antenne* pour diffuser le signal généré sous formes d'ondes électromagnétiques, ainsi que de recevoir le signal réfléchi (écho) par les cibles détectées, d'un *récepteur* servant à détecter et à traiter les signaux reçus à travers des *calculateurs* et des *processeurs*, et d'un *système d'affichage de données* servant comme interface entre le Radar et le Radariste. Ces composants sont exposés avec plus de détails ci-dessous [4][25]:

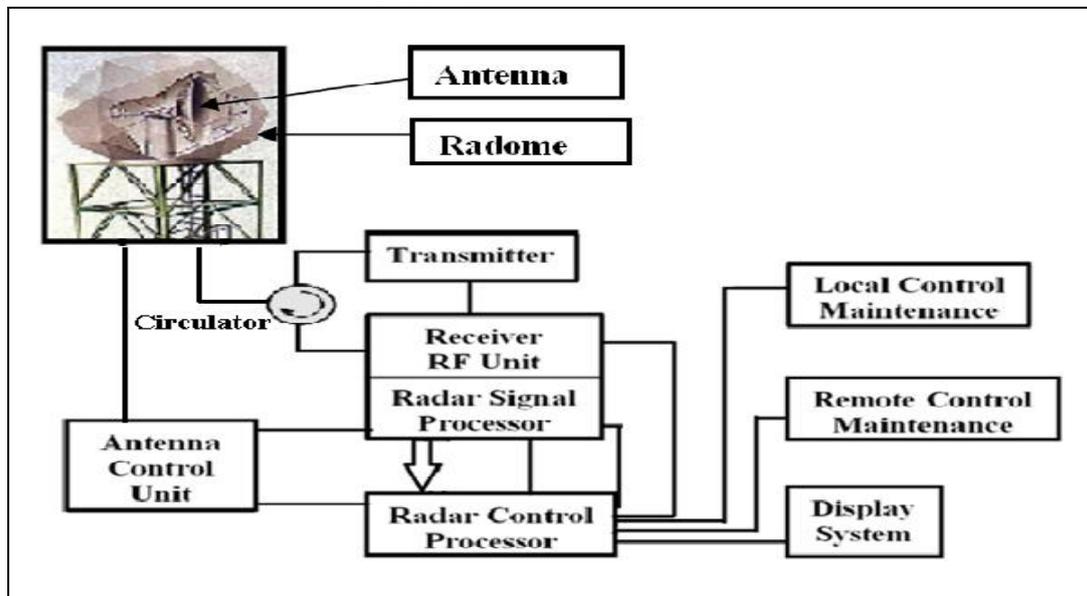


Fig II.7 Schéma bloc d'un Radar Doppler Météorologique.

- **Transmetteur:** il consiste d'un amplificateur de puissance qui est généralement le *klystron*, succédant à un oscillateur local pour produire le signal hyperfréquence d'émission, et est commuté par *un excitateur* pour

générer un train d'impulsions cohérentes; chacune de durée  $\tau$  et de période de répétition  $T_r$ . L'excitateur quand à lui-même, est une collection de deux importants modules: *le synchroniseur* et *le modulateur*. Le premier étant le cœur de tout système Radar, sert à harmoniser tout le traitement Radar de l'émission jusqu'à le traitement des échos reçus. Quand au second, la fonction principale est de délivrer une impulsion de forte puissance pour l'émetteur à chaque coup d'horloge du synchroniseur.

- **Duplexeur:** dispositif reliant physiquement l'émetteur et le récepteur à l'antenne, et commute celle-ci entre ses fonctions d'émission/réception afin de protéger le circuit récepteur contre les fortes impulsions d'émission.

- **Antenne:** peut être assimilée à un transducteur servant de convertir le signal généré dans le transmetteur en ondes électromagnétiques pour être diffusées dans l'espace en destination des précipitations, et de capter l'écho revenant pour le faire traiter dans l'étage récepteur. En général, les Radars Météorologiques possèdent d'antennes très directives (pour maximiser leurs portées) et de moyennes dimensions (grâce aux fortes fréquences utilisées).

- **Radome** (Radar Dôme): couverture conçus généralement sous forme de dôme, visant à protéger l'antenne Radar contre les sévères perturbations météorologiques sans aucune dégradation de son fonctionnement.

- **Unité de control d'antenne:** traite toutes les fonctions concernant le positionnement, le balayage et la vérification de l'état de l'antenne.

- **Récepteur:** généralement, il se compose d'un élément de protection, un oscillateur local, un mélangeur, un amplificateur FI, et un détecteur synchrone d'enveloppe. Etant donné que le récepteur est très sensible aux signaux un peu puissants, le rôle du dispositif de protection est d'éliminer ces signaux pour qu'il n'y est pas de dommages. L'onde de fréquence  $(f_e + f_d)$  réfléchié par les cibles est appliquée au mélangeur, qui reçoit également l'onde de fréquence  $f_0$  de l'oscillateur local. À la sortie du mélangeur, on retrouve un signal à la fréquence intermédiaire  $f_i$ , différence entre  $(f_e + f_d)$  et  $f_0$ , ainsi que la somme de ces deux fréquences sera éliminée par un filtre sélectif de bande passante  $B = 1/\tau$ . Enfin, les signaux sont passés à travers le détecteur qui mesure leurs amplitudes maximales et identifie les fréquences Doppler de chaque impulsion reçue.

- **Processeur du control Radar:** c'est l'unité responsable du contrôle et de la supervision du système Radar. Il se réagit à chaque anomalie du système selon la gravité de la situation.

- **Processeur du signal Radar:** c'est l'unité critique du système Radar effectuant le traitement de ses signaux. Elle accomplit généralement trois tâches principales concernant respectivement le déclenchement du système Radar et particulièrement le transmetteur, la modulation en phase et/ou en fréquence du signal porteuse, ainsi que la numérisation et le prétraitement des signaux reçus.

- Interfaces d'affichages et de maintenances des unités de contrôle.

### II.4.3 Équation du Radar Météorologique:

Comme procédé pour le Radar conventionnel, l'équation du Radar Météorologique est dérivée sur la base des mêmes principes, sauf qu'on tient en compte le fait que les cibles cette fois-ci sont des gouttelettes d'eau de surface équivalente  $\sigma_i$ . Donc l'équation finale du Radar Météorologique sera comme suit:

$$P_r = \underbrace{\frac{\pi^3 C}{1024 \ln 2}}_{\text{Constan tes}} \cdot \underbrace{\frac{P_t \cdot \tau \cdot G^2 \theta_{az} \theta_{site}}{\lambda^2}}_{\text{Radar}} L_s \cdot \underbrace{\frac{|K|^2 \cdot Z_e}{R^2}}_{\text{Cible}} \tag{II.2}$$

### II.4.4 Acquisition des données Radar:

Les échos provenant des cibles météorologiques, par la rétrodiffusion des impulsions émises par le Radar sont reçus par ce dernier via son étage de réception qui les amplifie et les traite pour en extraire les informations utiles telles que la réflectivité et donc la présence ou non de perturbations météorologiques, leur distance et la vitesse de leur déplacement, ...etc.

- **Réflectivité:** La mesure de la quantité de puissance réfléchié par le volume de l'atmosphère sondé par le faisceau Radar est définie tout simplement comme étant sa *réflectivité*. Cette intensité varie en fait comme la 6<sup>ème</sup> puissance du diamètre des cibles par unité de volume  $Z = \sum D_i^6 (mm^6 / m^3)$  La réflectivité équivalente revenant de chaque impulsion pour chacun des volumes de cibles est l'intensité moyenne de sondage pour ce volume. Elle est reliée à la quantité de précipitations  $R$  par la relation suivante:  $Z = a \cdot R^b$  qui est dite "R-Z", avec  $a$  et  $b$  dépendent du type de précipitations) [2][4].

| $Z_{dB}$ | $Z$      | Nature de précipitation |
|----------|----------|-------------------------|
| 75       | 31622777 | Grêle géante            |
| 50       | 100000   | Forte pluie             |
| 25       | 316      | Neige                   |
| -28      | 0.001585 | Gouttelettes de brume   |

Tableau II.2: Correspondance Réflectivité – Nature de précipitations.

- **Position:** pour calculer la distance entre le Radar et l'endroit où se concentrent les précipitations, on procède d'une manière similaire à celle accomplie dans le cas du Radar conventionnel, en tenant compte de l'indice de réfraction de l'air  $n$  qui varie avec la température, la pression et la vapeur d'eau contenue dans ce dernier. Elle est donnée par:  $D = (C \cdot \Delta t) / (2 \cdot n)$ . Il est aussi possible de calculer la hauteur dont laquelle se trouve les cibles, grâce à la connaissance de la distance  $D$  et de l'angle d'élévation du Radar. Il faut ainsi tenir en compte de la courbure de la terre et la variation de la densité des couches de l'atmosphère, qui influencent directement sur la direction et donc sur le temps de propagation des ondes électromagnétiques; et par conséquent sur le calcul de la distance  $D$  et puis de la hauteur  $h$  [2].

- **Vitesse:** la différence de fréquence générée par le déplacement des gouttelettes d'eau, selon l'effet Doppler traditionnel, est trop petite pour être notée par l'instrumentation électronique actuelle. On utilise donc à sa place, la différence de phase entre deux impulsions successives revenant d'un même volume sondé. Entre chaque impulsion, les cibles se déplacent légèrement créant une différence de phase proportionnelle à la variation de la fréquence Doppler et donc à la vitesse des cibles [32][2]. La relation liant ces trois paramètres entre eux est donnée par:  $V_r = \frac{\lambda \cdot f_d}{2} = \frac{\lambda \cdot \Phi'}{4\pi \cdot \Delta t}$ .

#### II.4.5 Étalonnage du système Radar:

Comme tout instrument physique autonome, le système Radar installé en plein air, est sujet aux différentes perturbations que ce soient internes (bruit thermique, ...etc) ou externes (atmosphériques,...etc.) qui influencent en très hauts degrés sur la précision de ses mesures. Et à cet effet, une mesure correcte de la puissance reçue et de la réflectivité qu'on en déduit nécessite de faire appel à *un étalonnage* très précis des systèmes d'émission et de réception du Radar, pour remédier à de telles défaillances. La procédure d'étalonnage consiste en comparaison des mesures réelles faites par le Radar, par rapport aux mesures plus précises accomplies sur des cibles de références dont les informations correspondantes sont connues préalablement avec de très hautes précisions. Le suivi automatique de l'intensité de cet écho permet de mettre en évidence d'éventuelles variations de la sensibilité du Radar. Un entretien régulier de ce dernier permet néanmoins d'assurer une grande stabilité du niveau d'étalonnage, et de garantir ainsi la répétitivité des mesures [4][33].

**II.4.6 Radar Polarimétrique et la double polarisation:**

Le Radar Polarimétrique est un Radar Météorologique Pulse Doppler dont les fonctionnalités de transmission et du traitement sont attachées aux informations de polarisation des ondes électromagnétiques mises en œuvre. La plupart des Radars Météorologiques transmettent et reçoivent les ondes Radio avec une seule polarisation qui est horizontale, en raison de la forme aplatie de la majorité des cibles météorologiques. D'autre part, le Radar Polarimétrique transmet et reçoit avec tous des deux. La combinaison entre ces deux polarisations peut s'effectuer par plusieurs manières, dont la plus simple utilisable est celle suivant le principe d'alternance entre les deux (H-V-H-V-...etc.). Le fait que les Radars Polarimétriques émettent et reçoivent avec les deux types de polarisation, ils sont toutefois appelés "*Radars à Double Polarisation*". Grâce à ce dernier critère, les nouvelles générations des Radars Météorologiques, peuvent obtenir des indications sur la forme des cibles ainsi que sur le mélange de formes contenues dans le volume d'espace sondé. Ce qui permet de bien identifier le type de précipitations (pluie, neige, grêle, ...etc.) [2][4].

**II.5 Conclusion:**

Le Radar Météorologique Pulse Doppler peut être considéré comme étant la révolution du vingtième siècle dans le monde de la météorologie. En effet, l'exploitation de l'effet Doppler dans les Radars Météorologiques, a notablement marqué ses empreintes en termes de la qualité des prévisions météorologiques, la position des différentes perturbations, ainsi que leurs vitesses de rapprochement ou d'éloignement.

On a englobé dans ce chapitre d'une manière générale, les principes de base du Radar Météorologique Pulse Doppler et les différents processus d'extraction de ses données, tout en empruntant un enchaînement conforme à la chronologie de son développement; allant du Radar conventionnel à impulsions jusqu'au Radar Polarimétrique à double polarisation.

Le traitement du signal Radar entamé brièvement dans ce chapitre par l'extraction des paramètres les plus importants tels que la réflectivité et la variation de la fréquence Doppler, ouvre le chemin devant l'estimation des paramètres du spectre Doppler (tels que la vitesse moyenne Doppler et sa variance ainsi que sa largeur spectrale), qui sera l'objet de notre étude dans le troisième chapitre.

## CHAPITRE III

# ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU SPECTRE DOPPLER

---

### III.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), 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 ne sont pas vraiment adéquates pour l'analyse des signaux aléatoires apériodiques. Ceci n'est pas un fait nouveau, c'est pourquoi de multiples méthodes ont été développées, comme le modèle ARMA et la méthode des ondelettes. 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) basé dans le domaine temporel, puis avec le développement 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 fréquentiel. L'intérêt de l'analyse spectrale des signaux Radar Météorologique réside dans le fait qu'on peut détecter et estimer de sévères phénomènes météorologiques, d'éviter à temps les désagréments et les catastrophes engendrés par ceux-ci [34].

### III.2 Généralités sur les processus stochastiques:

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.

#### III.2.1 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.

### III.2.2 Moments statistiques:

Pour des besoins des prochaines sections, on se limite ici dans cette section à la définition des moments spectraux d'ordre un et deux qui sont respectivement la moyenne ou l'espérance mathématique, et la variance. Et on s'intéresse ainsi au domaine discret qui est le plus pratique dans la vie quotidienne avec l'utilisation de machines et calculateurs numériques.

Soit  $X(t)$  un processus aléatoire de densité de probabilité (PDF)  $P_X(x_k, k)$ :

☒ Le moment d'ordre un est donnée par:

$$m_x = E[X(k)] = \sum_k x(k) \cdot P_X(x_k, k) \quad (\text{III.1})$$

☒ Le moment d'ordre deux centré ou la variance est défini par:

$$\text{Var}(X(k)) = E[(X(k) - m_x)^2] = \sum_k (x(k) - m_x)^2 \cdot P_X(x_k, k) \quad (\text{III.2})$$

### III.2.3 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:

$$R_{ZZ}(k+n, k) = R_{ZZ}(n) = E[Z(k+n) \cdot Z(k)^*] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-2} Z(k+n) \cdot Z(k)^* \quad (\text{III.3})$$

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

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Z(k) \cdot Z(k)^* = E[Z(k) \cdot Z(k)^*] = R_{ZZ}(0) \quad (\text{III.4})$$

### III.2.4 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:

$$S_Z(f) = \frac{1}{N} \sum_{n \in \mathbb{Z}} R_{ZZ}(n) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n} \quad \text{(III.5)}$$

### III.2.5 Stationnarité:

La *stationnarité* fixe la propriété d'invariance par rapport au temps  $t$  des lois de probabilité qui caractérisent le processus stochastique. Elle est en pratique très importante et peut être définie de différentes façons:

- Un processus aléatoire  $Z(k)$  est dit *stationnaire au sens large* si sa moyenne est constante, et sa fonction d'autocorrélation ne dépend pas du temps.
- Par contre, le processus aléatoire  $Z(k)$  est dit *strictement stationnaire*, si ses statistiques d'ordre supérieur sont indépendantes du temps.

### III.2.6 Théorème Central Limite:

Le Théorème Central Limite (TCL) est l'un des plus remarquables résultats de la théorie des probabilités. *Il établit que la somme d'un grand nombre de variables aléatoires indépendantes suit une distribution approximativement Normale.* Il fournit non seulement une méthode pour un calcul approximatif de la probabilité liée à des sommes de variables aléatoires, mais il explique également ce fait empirique remarqué, que bien des phénomènes naturels admettent une distribution Gaussienne [35].

Soit  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite de variables aléatoires (V.A), Indépendantes et Identiquement Distribuées (I.I.D) d'espérance  $m_x$  et de variance  $\sigma^2$ , alors la distribution de  $\frac{\overline{X_n} - m_x}{\sigma / \sqrt{n}}$  converge en loi vers la loi Normale réduite pour

une valeur très importante de  $n$ . Ceci peut être réécrit autrement par:

$$P_r \left( \frac{\overline{X_n} - m_x}{\sigma / \sqrt{n}} \leq a \right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^a e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx \quad \text{Avec: } n \rightarrow \infty \quad \text{(III.6)}$$

## III.3 Introduction au Traitement Numérique du Signal:

Le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations, tout en s'appuyant sur les ressources de l'électronique ainsi que sur les outils informatiques. Le traitement est dit numérique, lorsque

celui-ci est effectué sur des valeurs discrètes du signal. L'opération de prise des échantillons à des instants discrets, est connue par *l'échantillonnage*.

### III.3.1 Echantillonnage:

En vertu de la nature continue de tous les signaux physiques se répandant dans la nature tels que le courant électrique, la tension électrique, ...etc, et le fait que le traitement général de ces signaux se fait par des machines et calculateurs numériques, on doit donc les adapter aux traitements numériques via l'opération d'échantillonnage. L'échantillonnage consiste donc à prélever les valeurs instantanées d'un signal, à des instants précis, le plus souvent équidistants; appelés *périodes d'échantillonnage* ( $T_e$ ) L'échantillonnage du signal analogique  $Z(t)$ , est accompli généralement par une multiplication de celui-ci par un peigne de Dirac (échantillonnage idéal) ou par un train d'impulsions très étroites (échantillonnage réel). Le premier étant le plus utilisé théoriquement, est modélisé comme suit:

$$Z_e(t) = Z(k \cdot T_e) = Z(k) = Z(t) \cdot \delta_{T_e}(t) \tag{III.7}$$

$$Z_e(t) = Z(t) \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} \delta_{T_e}(t - n \cdot T_e) = Z(n \cdot T_e) \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} \delta_{T_e}(t - n \cdot T_e)$$

Le choix de la fréquence d'échantillonnage ( $F_e = 1/T_e$ ) permettant une bonne reconstitution du signal est basé sur la condition de Shannon.

Le Théorème de Shannon stipule que la reconstitution correcte d'un signal nécessite que la fréquence d'échantillonnage  $F_e$  soit au minimum deux fois plus grande que la plus grande des fréquences  $F_{max}$  du spectre du signal. (i.e. Reconstitution correcte sans risque de chevauchement  $\Rightarrow F_e > 2 \cdot F_{max}$  ).

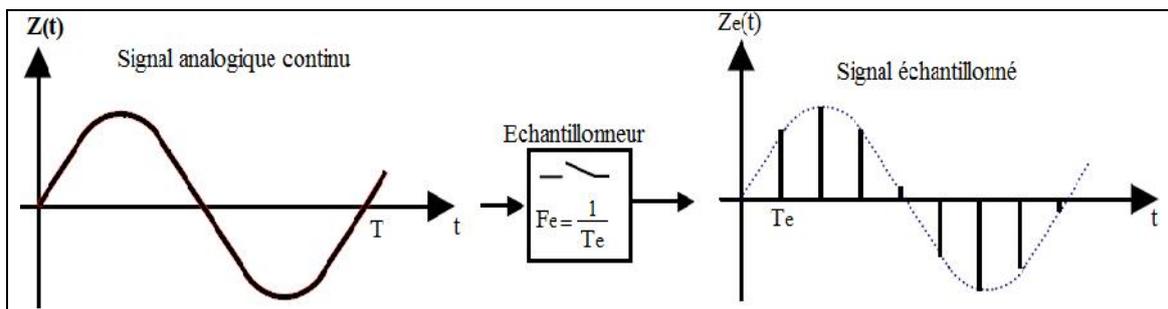


Fig III.1 Processus d'échantillonnage.

### III.3.2 Transformée de Fourier Discrète:

Les signaux physiques issus de la nature sont généralement des combinaisons de plusieurs composantes spectrales. L'étude classique basée sur la représentation temporelle ne permet pas d'extraire les informations

concernant la composition fréquentielle de celui-ci. Des recherches ont été abordées pour remédier à ce problème, tout en essayant de développer des outils principalement mathématiques, pour le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Les premiers pas ont abouti à une représentation fréquentielle "la série de Fourier" basée sur la décomposition d'un signal *périodique*, en somme de plusieurs sinusoïdes contenant ses différentes composantes spectrales. Cette méthode est améliorée ultérieurement par la transformée de Fourier (TF) qui s'applique même sur les signaux apériodiques. Et avec le développement des technologies numériques, de nouvelles versions ont été adoptées telles que la TF d'un signal discret (TFSD) et la TF Discrète (TFD). Celles-ci sont décrites comme suit:

$$TF \rightarrow Z(f) = TF[Z(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (\text{III.8})$$

$$TFSD \rightarrow Z_k(f) = TFSD[Z(k)] = \sum_{-\infty}^{+\infty} Z(k) e^{-j2\pi \cdot f \cdot k \cdot T_e}$$

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la TFSD à cause du nombre infini de calculs demandés. Pour cela, le signal original doit être tronqué pour limiter le calcul à  $N$  points. La TFD est définie donc par:

$$Z_T[n] = TFD[Z_T(k)] = \sum_{k=0}^{N-1} Z_T(k) e^{-j2\pi \frac{n \cdot k}{N}}, \text{ avec } : n = \overline{0, N-1}. \quad (\text{III.9})$$

### III.4 Estimation des moments spectraux:

Malgré d'énormes progrès touchant les infrastructures aéroportuaires, le vent et ses phénomènes associés tels que les cisaillements et les micros rafales, les turbulences, ...etc, subsistent toujours comme menace pour la sécurité du trafic aérien, voire les opérations du décollage et d'atterrissage. L'intégration de l'effet Doppler aux Radars Météorologiques a permis à ces derniers d'accomplir les tâches de détection et d'estimation des divers paramètres prévoyant de tels phénomènes, comme la puissance, la vitesse du vent ainsi que sa variance [36]. Notre objectif principal dans ce travail est l'estimation des trois premiers moments spectraux tout en se basant sur différents estimateurs dans les deux domaines; temporel et fréquentiel (Pulse Pair, Fourier et AR).

Le Radar Météorologique Pulse 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, et en s'inspirant du théorème central limit (TCL) est assimilée à un processus aléatoire de distribution Gaussienne.

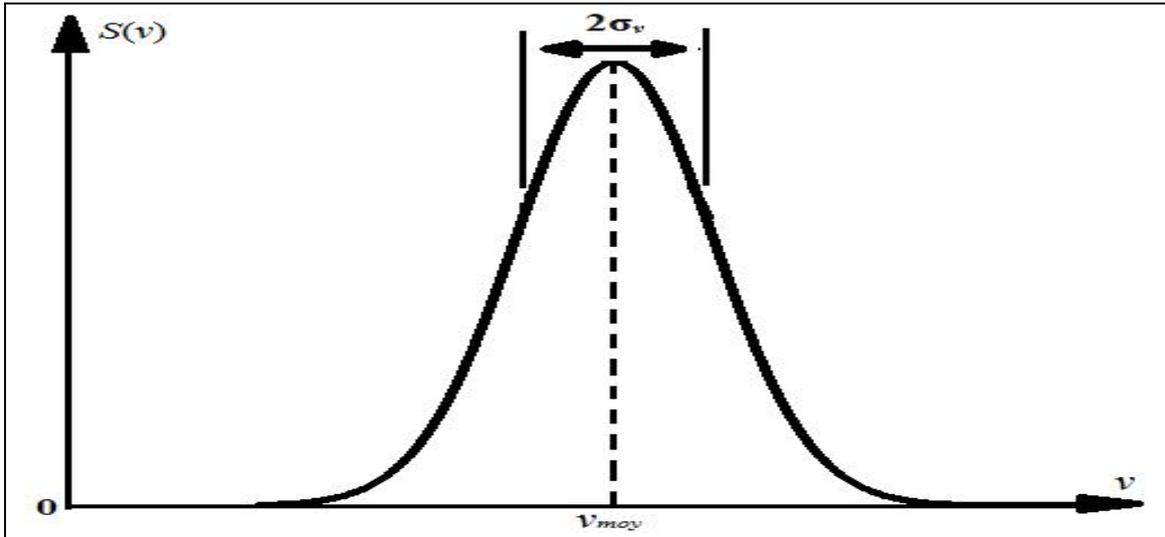


Fig III.2 Densité Spectrale de Puissance

Elle est définie comme étant la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation  $R_{zz}(\tau)$ , et est décrite comme illustrée ci-dessous:

$$S_z(f) = TF[R_{zz}(\tau)] \quad (\text{III.10})$$

Avec  $Z(I, Q) = I + j \cdot Q$  est le signal complexe généré dans le récepteur Radar, par les échos rétrodiffusés depuis les perturbations météorologiques.

L'estimation des trois premiers moments (puissance, vitesse et variance) est décrite en termes de leurs définitions et leurs équations correspondantes comme montrée ci-dessous [31][34][36]:

❖ 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. Elle donne l'estimation de l'intensité de la turbulence ou des caractéristiques des hydrométéores présents dans le volume de résolution (nombre et taille). Elle est formulée par:

$$P = \int S(v) \cdot dv \quad (\text{III.11})$$

❖ La fréquence ou la vitesse moyenne due à l'effet Doppler renseigne sur la valeur et le sens du vent radial ou du mouvement des hydrométéores. Celle-ci définissant le moment d'ordre un, est donnée par:

$$\bar{v} = \frac{1}{P} \int v \cdot S(v) \cdot dv \quad (\text{III.12})$$

❖ L'écart type de chaque écho mesure la dispersion des vitesses par rapport à la vitesse moyenne, et est donnée par la racine carrée du moment central de second ordre normalisé:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{P} \int (v - \bar{v})^2 \cdot S(v) \cdot dv \quad (\text{III.13})$$

❖ 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  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal émis :

$$v = \frac{\lambda}{2} f \quad \text{(III.14)}$$

❖ 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:

$$w = \frac{\lambda}{2} \sigma_f \quad \text{(III.15)}$$

### III.5 Estimation temporelle par Pulse Pair:

Comme on l'a déjà signalé dans la section (II.4.4), voire la difficulté de mesurer la vitesse d'une cible météorologique en utilisant les variations de la fréquence Doppler causée par la faiblesse de celle-ci devant la valeur de la fréquence Radar, 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 ces impulsions. D'où la naissance de la méthode de paire d'impulsions (*pulse pair*) [37].

L'algorithme Pulse Pair est un estimateur de la puissance du spectre Doppler, de la vitesse moyenne du vent et de sa variance. Il est basé sur l'estimation de la fonction d'autocorrélation des signaux Radar; complexes et stationnaires, échantillonnés à la période de répétition des impulsions  $T_s$ .

$$Z(k \cdot T_s) = I(k \cdot T_s) + j \cdot Q(k \cdot T_s) \quad \text{(III.16)}$$

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

$$R_{ZZ}(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-2} Z((k+1) \cdot T_s) \cdot Z^*(k \cdot T_s) \quad \text{(III.17)}$$

Avec:  $M$  est le nombre d'impulsions et  $T_s$  la période d'échantillonnage [34].

#### III.5.1 Estimation de la puissance totale:

En tenant compte de la puissance ( $N$ ) du bruit blanc présent dans les échos Radar  $I$  et  $Q$ , la puissance totale peut être déterminée par [38]:

$$\hat{P} = R_{ZZ}(0) - N \quad \text{(III.18)}$$

Donc, la puissance totale ou le moment d'ordre zéro est estimé par:

$$\hat{P} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |Z(k \cdot T_s)|^2 - N \quad (\text{III.19})$$

### III.5.2 Estimation de la vitesse moyenne:

Comme on a raisonné dans la section (II.2.2) pour la détermination des pouvoirs de résolution en fréquence et en vitesse, on définit de la même façon l'étendue des fréquences (et spécialement celles de Doppler qui nous intéressent dans cette section) et les vitesses associées non ambiguës. Ces deux grandeurs sont illustrées de la manière suivante:

$$\Delta f_{d\_non\_amb} = \frac{1}{T_r} = PRF \Rightarrow -\frac{PRF}{2} \leq f_{d\_non\_amb} \leq \frac{PRF}{2} \quad (\text{III.20})$$

$$\Delta f_{d\_non\_amb} = \frac{2 \cdot \Delta v_{r\_non\_amb}}{\lambda} \Rightarrow -\frac{\lambda}{4 \cdot T_r} \leq v_{r\_non\_amb} \leq \frac{\lambda}{4 \cdot T_r} \quad (\text{III.21})$$

Dans la suite de ce chapitre, on utilise le caractère ( $f$ ) pour désigner la variation de la fréquence Doppler ( $f_d$ ), tout en se mettant sur l'hypothèse que le spectre Doppler du signal de retour soit compris dans la bande non ambiguë montrée dans les équations (III.20) et (III.21) ci-dessus.

La fonction d'autocorrélation est reliée à la densité spectrale de puissance de l'écho météorologique  $S(f)$  par l'équation suivante:

$$R_{ZZ}(T_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot T_s} df \quad (\text{III.22})$$

En synthétisant les équations (III.20) et (III.21), la relation (III.22) peut être réécrite ci-dessous, d'une manière plus pratique:

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

Ensuite, on essaye de faire apparaître le terme de la vitesse moyenne dans l'équation (III.23). Ce qui conduit à l'équation suivante la plus générale:

$$R_{ZZ}(T_s) = \frac{2}{\lambda} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} \bar{v} T_s} \int_{-\frac{\lambda}{4T_s}}^{\frac{\lambda}{4T_s}} S(v_r) \cdot e^{j\frac{4\pi}{\lambda} (v_r - \bar{v}) T_s} dv_r \quad (\text{III.24})$$

Le spectre  $S(v_r)$  étant symétrique par rapport à la vitesse moyenne, l'intégrale de l'équation (III.24) est donc purement réelle. En effet, cette dernière équation peut être réécrite sous la forme suivante:

$$R_{ZZ}(T_s) = |R_{ZZ}(T_s)| \cdot e^{j\frac{4\pi}{\lambda} \bar{v} T_s} \quad (\text{III.25})$$

$$\text{Avec : } |R_{ZZ}(T_S)| = \frac{2}{\lambda} \int_{-\frac{\lambda}{4T_S}}^{\frac{\lambda}{4T_S}} S(v_r) \cdot e^{j \frac{4\pi}{\lambda} (v_r - \bar{v}) T_S} dv_r \quad (\text{III.26})$$

D'où, l'estimation de la vitesse moyenne acquise, et donnée par [37]:

$$\bar{v}_{pp} = \frac{\lambda}{4\pi T_S} \arg(R_{ZZ}(T_S)) \quad (\text{III.27})$$

### III.5.3 Estimation de la variance:

La variance de la vitesse moyenne du vent est donnée ci-dessous par l'estimateur suivant [34][38]:

$$\sigma_v^2 = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 T_S^2} \left[ 1 - \frac{R_{ZZ}(T_S)}{R_{ZZ}(0) - N} \right] = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 T_S^2} \left[ 1 - \frac{R_{ZZ}(T_S)}{\hat{P}} \right] \quad (\text{III.28})$$

La largeur spectrale ( $w_v$ ) de la vitesse moyenne du vent est obtenue directement par la racine carrée de la variance.

### III.6 Estimation fréquentielle via la méthode de Fourier:

Une autre alternative d'estimation de la vitesse moyenne ( $\hat{v}$ ), de la variance ( $\sigma_v^2$ ), et de la largeur du spectre ( $\hat{w}_v$ ) Doppler reçu, est basée sur l'estimation de la densité spectrale de puissance via la TFD [36][37][38]. L'estimation de la puissance totale reçue par l'antenne Radar émanant des cibles météorologiques sondées par son faisceau, le long d'une cellule de distance, et à travers les  $M$  échantillons; est décrite ci-dessous par:

$$\hat{P} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |Z(k)|^2 \quad (\text{III.29})$$

Le spectre du signal rétrodiffusé est calculé par l'expression suivante:

$$\hat{S}(n) = \frac{1}{M} \left| \sum_{k=0}^{M-1} Z(k) \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot k \cdot n}{M}} \right|^2, \text{ avec : } n = \overline{0, (M-1)} \quad (\text{III.30})$$

La vitesse moyenne du mouvement des cibles dans une cellule de distance considérée est donnée par:

$$\hat{v}_{fi} = -\frac{\lambda}{2 \cdot \hat{P} \cdot T_S} \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \hat{S}(n) \cdot \left( \frac{n}{M-1} \right) \quad (\text{III.31})$$

À son tour, la variance de la vitesse moyenne des météores détectés inclus dans une cellule de distance, est définie par:

$$\hat{w}_{ft} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \hat{P} \cdot T_s^2} \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \hat{S}(n) \cdot \left( \frac{n}{M-1} + 2\hat{v}_{ft} \frac{T_s}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{III.32})$$

Par conséquent, comme cité dans la méthode Pulse Pair, la largeur spectrale est la racine carrée de la variance ainsi calculée.

Ces valeurs estimées sont indexées par ( $ft$ ) pour en référer à la méthode de Fourier. Cette estimation spectrale est normalisée par la puissance totale moyenne ( $\hat{P}$ ) qui est traitée comme probabilité sur toute la largeur de bande de travail.

### III.7 Estimation fréquentielle autorégressive:

Une autre alternative pour l'estimation spectrale, est *l'estimation Autorégressive (AR)*. Cette méthode paramétrique, consiste à modéliser le spectre de puissance à partir de la série temporelle ( $I$  et  $Q$ ) représentant le signal reçu par le Radar Doppler Météorologique dans le présent, et puis générer par la suite le spectre en calculant les coefficients du modèle. Dans cette analyse spectrale, on évalue le spectre de puissance du processus en se proposant un modèle autorégressif (AR), qui est un filtre tout pôle dont la fonction de transfert ne dispose que de pôles, représentée par l'expression suivante [37][39]:

$$H(f) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^P a_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot k \cdot T_s}} \quad (\text{III.33})$$

Avec:  $a_k$  et  $P$  sont les coefficients et l'ordre du modèle (AR) respectivement.

Une fois que les coefficients sont déterminés, la densité spectrale de puissance peut être déterminée comme suit:

$$P_{AR}(f) = \frac{T_s \cdot \sigma_p^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^P a_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot k \cdot T_s} \right|^2} \quad (\text{III.34})$$

Ainsi  $a_k$  et  $\sigma_p$  (puissance du bruit blanc) sont des paramètres à estimer.

Pour le calcul de la densité spectrale de puissance  $P_{AR}(f)$ , la FFT est souvent utilisée pour l'évaluation de l'exponentielle complexe du dénominateur de l'équation (III.34) [39].

Les estimateurs de la vitesse radiale moyenne autorégressive, ainsi que de la largeur du spectre Doppler sont identiques à ceux de Fourier.

### III.8 Conclusion:

Malgré d'importants et d'énormes progrès technologiques inscrits dans ces dernières décennies, la mesure directe des paramètres Doppler par un Radar Météorologique reste toujours difficile voire impossible, ce qui impose d'avoir recours à la théorie des estimations pour remédier à ces carences. L'objet de l'estimation de la densité spectrale de puissance était à la base d'extraction de tous les paramètres Doppler tels que la puissance, la vitesse et la largeur spectrale.

Les estimateurs qu'on a utilisé le long de ce chapitre sont inspirés de deux domaines distincts; le premier étant temporel (Pulse Pair) et basé sur la fonction d'autocorrélation complexe des séries temporels ( $I$  et  $Q$ ), et le second fréquentiel (Fourier et AR) basé sur le calcul de la TFD des séries ( $I$  et  $Q$ ) et les coefficients ( $AR$ ) du modèle autorégressif.

Le domaine d'implémentation temporel pour l'estimation Pulse Pair a l'avantage de devenir beaucoup plus significatif que les méthodes qui requièrent l'utilisation de la transformée de Fourier discrète du point de vue nombre d'opérations, ainsi que le temps du traitement [34]. Pour pallier à cette déficience, la transformée de Fourier rapide (FFT) fut introduite pour servir les transformations (temps-fréquence), grâce à sa rapidité en termes du temps du traitement, ainsi que la réduction du nombre d'opérations, et donc un gain en temps et en espaces mémoires.

Malgré leurs immenses succès pour analyser les signaux linéaires et stationnaires, les différentes approches fréquentielles utilisées jusque là (TFD, FFT, ...etc.) ont plusieurs limitations en pratique, en particulier leur manque évident de localisation temporelle. Par conséquent, d'autres alternatives ont été introduites pour bien localiser les composantes spectrales dans le temps. On cite à titre d'exemple la transformée de Fourier fenêtrée (STFT), ainsi que la transformée en ondelettes qui sera l'objet de notre étude dans le prochain chapitre.

# CHAPITRE VI

## ANALYSE PAR LA MÉTHODE DES ONDELETTES

---

### IV.1 Introduction:

Le traitement du signal consiste à dégager des informations contenues dans un signal. Lorsqu'on observe son évolution au cours du temps, on repère bien son début, sa fin, ses changements de rythmes, ... etc. En revanche, cette représentation renseigne peu sur ses périodicités, et donc sur ses fréquences. Par conséquent, de nombreux mathématiciens ont étudiés la représentation en fréquences des signaux. La technique des séries de Fourier constitue sans doute le point du départ de cette approche. Cette dernière n'étant valable que pour des signaux périodiques, on a recours à de nouvelles techniques pour les signaux apériodiques; d'où l'apparition de la transformée de Fourier. L'analyse fréquentielle basée sur celle-ci n'est pas à l'abri de certaines limitations en termes de localisation temporelle ainsi que l'usage restreint aux signaux stationnaires. Pour remédier à ces insuffisances, un procédé plus efficace consiste à décomposer le signal en fragments étroits grâce à des fenêtres glissantes de longueurs bien définies, ce qui permet une représentation simultanée en temps et en fréquence, signalant la naissance de la transformée de Fourier fenêtrée (STFT). Mais cette dernière étant limitée en résolution, *par le principe d'incertitude de Heisenberg selon lequel:  $(\Delta t \cdot \Delta f \geq (1/4\pi))$* , une autre théorie s'est développée, c'est la transformée en ondelettes (WT) (Voir Annexe D) [40][41].

La théorie des ondelettes est fondée sur la représentation simultanée temps-fréquence du signal, avec de variables résolutions. Ainsi, elle donne une meilleure résolution en temps pour les hautes fréquences, et une meilleure résolution en fréquence pour les basses fréquences. Ce qui l'a rendu mieux adaptée que la STFT [41][42].

### IV.2 Connaissances de base sur les ondelettes:

L'analyse d'ondelettes a été développée comme une approche alternative à la STFT pour surmonter le problème de résolution. Elle est faite d'une manière semblable à l'analyse de STFT, en un sens que le signal est multiplié par une fonction, *ondelette (wavelet)*, semblable à la fonction de fenêtre dans la STFT, et la transformation est calculée séparément pour différents segments du signal dans le domaine temporel. Les notions de base liées à cette analyse sont définies ci-après [38][41][42].

### IV.2.1 Notion d'ondelette:

Le terme *ondelette* signifie une petite onde (selon ses inventeurs le géophysicien Français Morlet et son collaborateur Croate Grossman au début des années 1980). L'*onde* se rapporte à la condition que cette fonction est oscillante. La petite dimension se rapporte à la condition que cette fonction (de fenêtre) est de longueur finie (*compactly supported*). La fonction d'ondelette  $\Psi(t)$  doit remplir principalement les trois conditions suivantes:

❖ Soit à énergie finie:  $E = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) \cdot \Psi^*(t) \cdot dt < +\infty$  (IV.1)

❖ Si  $\hat{\Psi}(f)$  est la transformée de Fourier de  $\Psi(t)$ , alors: la condition suivante doit être remplie:

$$0 < C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(f)|^2}{f} df < +\infty \quad \text{avec: } \hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) \cdot dt = 0$$
 (IV.2)

Cette expression est connue par *la condition d'admissibilité*. Elle implique que l'ondelette doit être oscillante.

❖ La transformée de Fourier d'une onde complexe doit être réelle et disparaître pour les fréquences négatives.

### IV.2.2 Ondelette Mère et Ondelettes Filles:

Le terme *d'ondelette mère* implique que les fonctions de différentes régions de support qui sont employées dans le processus de transformation, sont dérivées d'une fonction principale, ou *l'ondelette mère*. En d'autres termes, *l'ondelette mère* est un prototype pour produire d'autres fonctions de fenêtre (les ondelettes filles). Elle est désignée par la fonction  $\Psi(t)$ .

Par contre, les ondelettes filles sont des versions plus au moins modifiées de l'ondelette mère, soit par des translations sur l'échelle du temps, ou par de changements du paramètre d'échelle (par compression ou dilatation). Elle est dérivée de l'ondelette mère par la formule suivante:

$$\Psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$$
 (IV.3)

Voici ci-après une représentation formelle de deux ondelettes mère qui sont l'ondelette de Morlet, et la fonction du chapeau Mexicain.

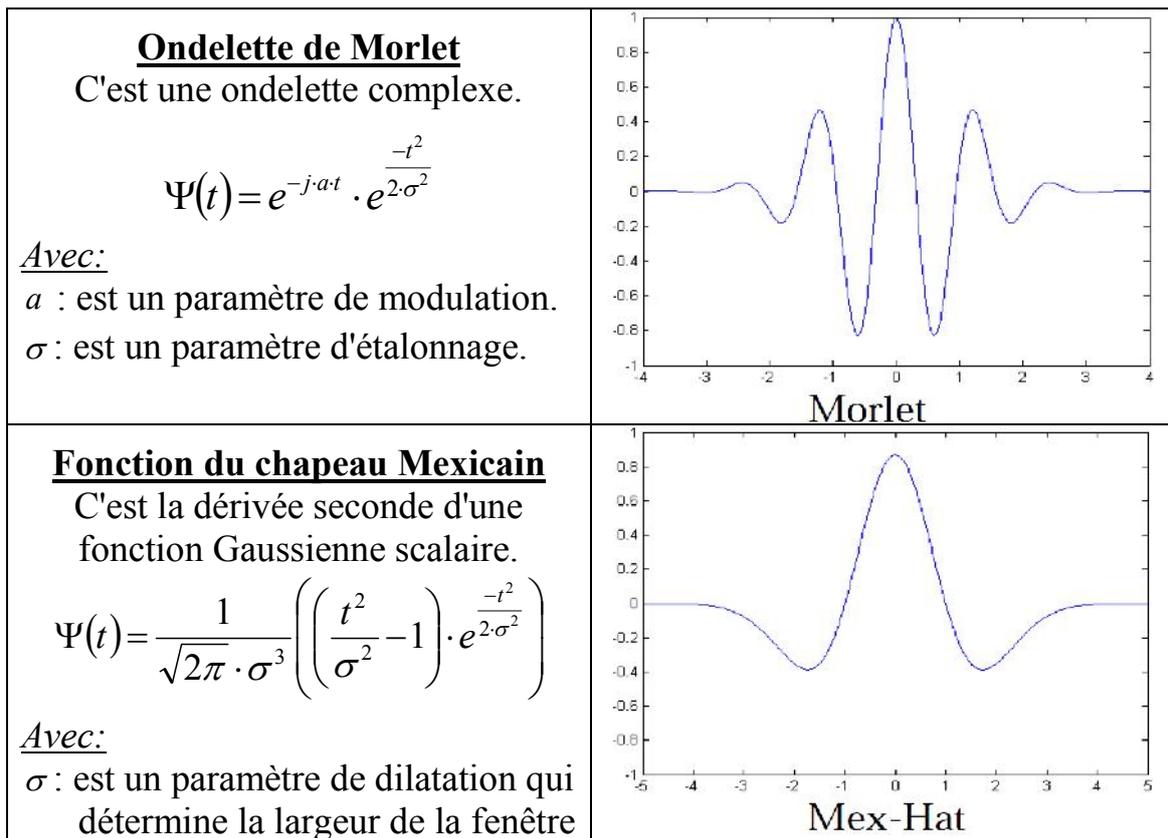


Fig IV.1: Exemples d'ondelettes mères.

### IV.2.3 Paramètres de translation et d'échelle:

Le terme *translation*( $\tau$ ) s'emploie dans le même sens que dans la STFT; il est lié à l'endroit où la fenêtre est centrée sur l'axe du temps. Ce terme, correspond évidemment à l'information temporelle dans le domaine de transformation.

Cependant, nous n'avons pas un paramètre de fréquence, comme nous l'avons pour la STFT. Au lieu de cela, nous avons le paramètre d'échelle (*scale*) ( $s$ ) qui est défini comme ( $1/\text{fréquence}$ ). Le terme fréquence est réservé à la STFT.

### IV.3 Transformée en ondelettes continue (CWT):

Le signal transformé est une fonction de deux variables ( $\tau$ ) et ( $s$ ); les paramètres de translation et d'échelle, respectivement. L'ondelette fille  $\Psi_{\tau,s}(t)$  est celle qui joue le rôle de la fonction de transformation. On définit la transformée en ondelettes continue (CWT) de la fonction  $x(t)$  par la formule suivante [41][42]:

$$CWT_x^\Psi(\tau, s) = \Psi_x^\Psi(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi_{\tau, s}^*(t) \cdot dt \quad \text{(IV.4)}$$

Ainsi, sa transformée inverse est donnée par:

$$x(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_x^\Psi(\tau, s) \cdot \frac{1}{|s|^2} \cdot \Psi_{\tau, s}^*(t) \cdot d\tau \cdot ds \quad \text{(IV.5)}$$

#### IV.4 Discrétisation de la CWT; Séries d'ondelettes (WS):

Dans le monde d'aujourd'hui, les ordinateurs sont utilisés pour faire la plupart des calculs. Il est évident que la CWT ne peut pas être calculée en utilisant des équations analytiques, et donc nécessité de sa discrétisation. Comme cité précédemment, le signal décomposé par la CWT peut être reconstruit par la transformée inverse; mais cette fois-ci, pouvons-nous néanmoins reconstruire le signal si nous discrétisons les paramètres du temps et de l'échelle ? La réponse est « oui », mais sous certaines conditions (Théorème de Shannon) [41].

Une forme d'échantillonnage dite *dyadique* est la plus adoptée pour de telles situations. Elle consiste à générer les ondelettes filles en dilatant l'ondelette mère par  $(s_0^l)$  et la translater par  $(k \cdot s_0^l)$ . Cette forme est optimale parce que l'échantillonnage de la variable de translation vérifie la condition de Shannon pour toutes les fréquences données. La valeur la plus commode de  $(s_0)$  est "2" en raison de sa convenance en termes de programmation et de réalisation pratique [38][40][41].

Exprimant le procédé ci-dessus de discrétisation en terme mathématique, la discrétisation de l'échelle est  $(s = s_0^l)$ , et la discrétisation de translation est  $(\tau = k \cdot s_0^l \cdot \tau_0)$  où les paramètres entiers  $(s_0 > 1)$  et  $(\tau_0 > 0)$ . Noter, comment la discrétisation de la translation dépend de la discrétisation de l'échelle avec  $(s_0)$ . Dans ce cas, les ondelettes filles utilisées dans le cas des ondelettes continues, deviennent [41]:

$$\Psi_{l, k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) = s_0^{-l/2} \cdot \Psi(s_0^{-l} \cdot t - k \cdot \tau_0), \text{ où } l, k \in \mathbb{Z}. \quad \text{(IV.6)}$$

Si  $\{\Psi_{l, k}\}$  constitue une base orthonormée (Voir Annexe E), la série transformée en ondelettes (coefficients des ondelettes) devient [39][40]:

$$\Psi_x^{\Psi_{l, k}}(l, k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi_{l, k}^*(t) \cdot dt \quad \text{(IV.7)}$$

Sa transformée inverse est donnée par:

$$x(t) = C_{\Psi} \sum_l \sum_k \Psi_x^{\Psi_{l,k}}(l, k) \cdot \Psi_{l,k}^*(t) \quad (\text{IV.8})$$

Comme on l'avait déjà signalé dans le paragraphe précédent, la valeur la plus commode pour l'échantillonnage dyadique s'avère '2' pour  $(s_0)$  et '1' pour  $(\tau_0)$ . Dans ce cas,  $(\tau = k \cdot 2^l)$  (dilatation dyadique ou dilatation binaire), et  $(s = 2^l)$  (échelle dyadique ou binaire), alors l'équation (IV.6) devient [41]:

$$\Psi_{l,k}(t) = 2^{-l/2} \cdot \Psi(2^{-l} \cdot t - k) \quad (\text{IV.9})$$

Quoique la transformée en ondelettes discrétisée puisse être calculée sur un ordinateur, ce calcul peut prendre de quelques secondes à quelques heures selon la taille du signal et la résolution voulue. Un algorithme étonnamment rapide est réellement disponible pour calculer la transformée en ondelettes d'un signal; c'est la transformée en ondelettes discrète (DWT).

#### IV.5 Transformée en ondelettes discrète (DWT):

Les bases de la DWT ont été développées dès 1976 où Croiser, Estéban, et Galland ont conçu une technique pour décomposer les signaux discrets dans le temps. Dans la même année, Crochiere, Weber, et Flanagan ont effectué un travail semblable sur le codage des signaux de sons, qu'ils ont appelé par *codage de sous-bande*. En 1983, Burt a défini une technique très semblable au codage de sous-bande et l'a appelée le codage pyramidal qui est également connu comme *analyse multi-résolution* [41][43].

La DWT analyse le signal à différentes bandes de fréquence avec différentes résolutions en lui décomposant en une approximation grossière (basses fréquences) et une information détaillée (hautes fréquences). La DWT utilise deux ensembles de fonctions, appelés fonctions d'échantillonnage et fonctions d'ondelette, qui sont associées aux filtres passe bas et passe haut, respectivement. La décomposition du signal en différentes bandes de fréquence est simplement obtenue par des filtrages successifs passe haut grâce à des filtres demi-bande  $g(n)$ , et passe bas par des filtres  $h(n)$ . Le signal résultant est soumis ainsi à un sous-échantillonnage par 2. Ceci peut être exprimé comme suit [41][44]:

$$\begin{aligned} y_{haut}(k) &= \sum_n x(n) \cdot g(2 \cdot k - n) \\ y_{bas}(k) &= \sum_n x(n) \cdot h(2 \cdot k - n) \end{aligned} \quad (\text{IV.10})$$

Le processus de décomposition continue jusqu'à ce que deux échantillons soient laissés. La DWT du signal original est alors obtenu en concaténant tous les coefficients à partir du dernier niveau de la décomposition [44].

Une propriété importante de la DWT est le rapport entre les réponses impulsionnelles des filtres passe haut et passe bas. Ces filtres ne sont pas indépendants l'un de l'autre, et ils sont liés par [41]:

$$g(L - 1 - n) = (-1)^n \cdot h(n) \tag{IV.11}$$

Où:  $L$  est la longueur du filtre (en nombre de points). La conversion passe bas au passe haut est fournie par le terme  $(-1)^n$ . Des filtres satisfaisant cette condition sont généralement utilisés dans le traitement des signaux, et ils sont connus comme *filtre miroir en quadrature* (QMF). Les opérations de filtrage et de sous-échantillonnage peuvent être exprimées comme:

$$y_{haut}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot g(-n + 2 \cdot k) \tag{IV.12}$$

$$y_{bas}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot h(-n + 2 \cdot k)$$

La reconstruction dans ce cas est très facile puisque les filtres de demi-bande forment des bases orthonormales. La procédure précédente est suivie dans un ordre renversé pour la reconstruction. Par conséquent, la formule de reconstruction devient (pour chaque niveau) [41]:

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [y_{haut}(k) \cdot g(-n + 2 \cdot k)] + [y_{bas}(k) \cdot h(-n + 2 \cdot k)] \tag{IV.13}$$

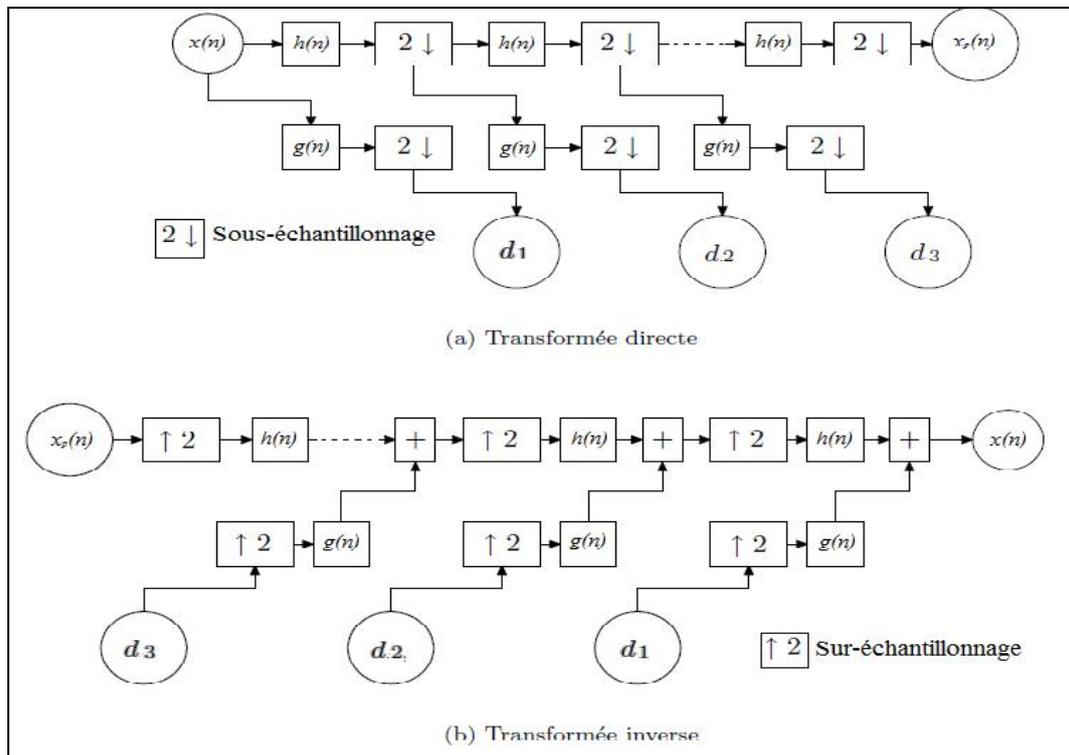


Fig IV.2: Schéma illustratif de la DWT et sa transformée inverse.

Toute la procédure de la DWT ainsi que sa transformée inverse sont bien illustrées par la figure (IV.2) [44], sachant que les  $d_i$  sont les coefficients de la DWT du  $i^{\text{ème}}$  niveau.

#### IV.6 Débruitage par seuillage des coefficients d'ondelettes:

Dans le cadre de ce travail, tous les traitements sont effectués sur des signaux issus d'un Radar Météorologique Pulse Doppler. L'écho réfléchi est considéré comme étant une superposition d'un signal utile contenant l'ensemble d'informations essentielles, et d'un bruit provenant de différentes sources et principalement thermiques. En vertu du TCL, le signal utile et le bruit sont considérés comme étant de distribution Gaussienne.

Pour bien filtrer le signal pur des différents bruits, on a recours à la théorie des ondelettes. Cette dernière est basée principalement sur le mécanisme du seuillage de ses coefficients.

Le seuillage des coefficients d'ondelettes est donc un bon moyen d'ignorer les détails les plus faibles que l'on peut assimiler à du bruit et ne conserver que les coefficients les plus importants. On reconstruit alors le signal à partir de ces seuls coefficients, les autres étant mis à zéro. L'opération du débruitage est donc accomplie comme le montre la figure ci-dessous [38][45]:

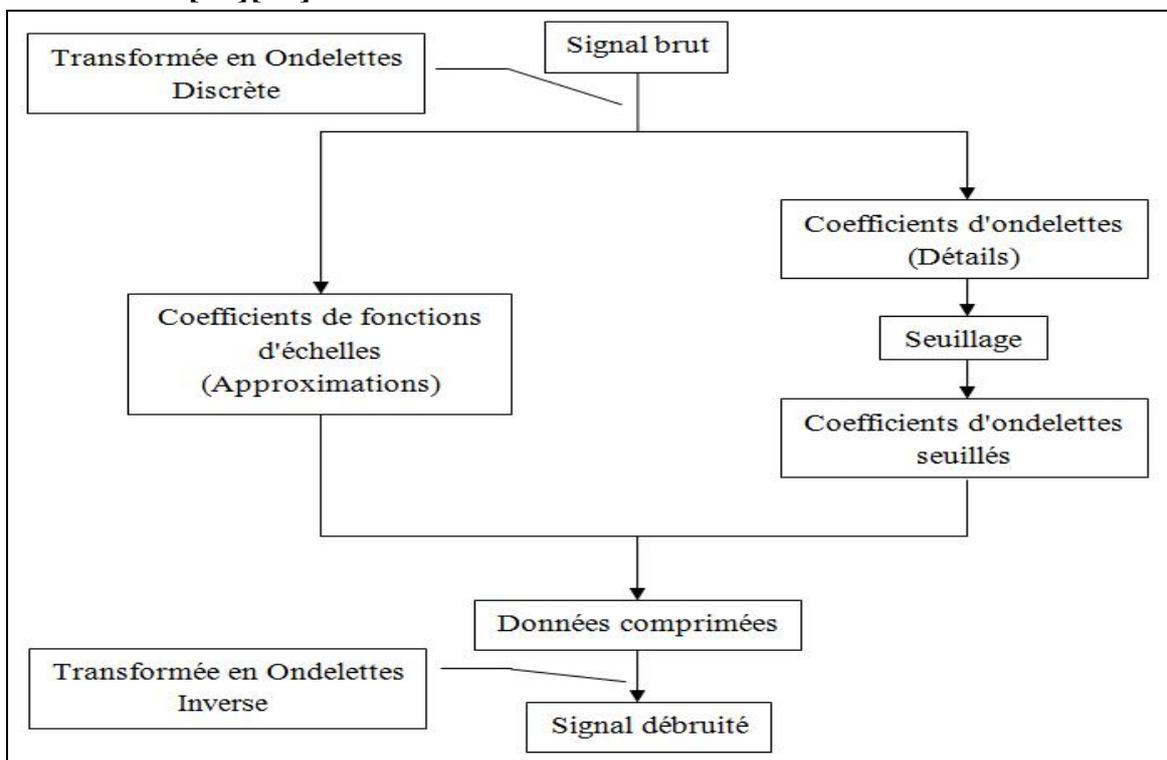


Fig IV.3: Schéma synoptique du débruitage par les ondelettes.

Le seuillage standard des coefficients d'ondelettes peut être *dur* (*hard*) ou *doux* (*soft*). Dans le premier cas, on met toujours à zéro les coefficients inférieurs à un seuil  $T$  et on ne conserve que les coefficients d'ondelettes supérieurs à  $T$ . Par contre, le seuillage doux met toujours à zéro les coefficients inférieurs au seuil  $T$ , et atténue l'amplitude des coefficients supérieurs à  $T$  par la valeur de ceci afin de s'assurer d'avoir enlevé l'effet du bruit même pour les forts coefficients. Ils sont formulés par [46]:

$$d_{hard} = \begin{cases} 0 & \text{si } |d| < \text{seuil} \\ d & \text{si } |d| \geq \text{seuil} \end{cases} \quad \text{et} \quad d_{soft} = \begin{cases} 0 & \text{si } |d| < \text{seuil} \\ d - [\text{sign}(d) \cdot \text{seuil}] & \text{si } |d| \geq \text{seuil} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

### IV.7 Seuillage:

La discrimination d'un signal Radar Météorologique noyé dans un fond de bruit considéré blanc en utilisant la méthode des ondelettes, est fondée principalement sur *le seuillage des coefficients* dans la DWT. Dans cette technique, deux genres de seuils sont utilisés: fixes et adaptatifs. Le *seuillage fixe* consiste à seuiller tous les coefficients par la même valeur, tandis que *l'adaptatif*, permet d'adapter le seuil pour chaque niveau de résolution [47].

Tandis que l'idée du seuillage est simple et efficace, l'acte de trouver un bon seuillage est la tâche la plus difficile dans de tels processus. Tout seuil nécessite la connaissance du niveau( $\sigma$ )du bruit. En effet, et en 1994, DONOHO et JOHNSTONE ont affirmé qu'il est plus important d'estimer le niveau( $\sigma$ )du bruit à partir des données à analyser que de supposer ce même niveau de bruit connu. Et comme on l'a signalé auparavant, le niveau de résolution le plus fin tend à ne consister que du bruit, ce qui a fait de DONOHO et JOHNSTONE à proposer une estimation( $\hat{\sigma}$ )du niveau du bruit basée sur l'écart moyen absolu des coefficients d'ondelettes de ce niveau de résolution, qui est formulée par l'expression suivante [38][48]:

$$\hat{\sigma} = \frac{\text{median} \left( \left\{ \hat{d}_{L-1,k} : k = \overline{0, 2^{L-1} - 1} \right\} \right)}{0.6745} \quad (\text{IV.15})$$

Dans la pratique, grand nombre de recherches ont été entamées dans ce domaine, et plusieurs types de seuillage ont été proposés par les pôles de cette science; et notamment DONOHO et JOHNSTONE. Mais on se limite dans cette étude juste aux trois seuils les plus usagés: minimax, universel et le seuil SURE.

### IV.7.1 Seuil minimax:

Proposé par DONOHO et JOHNSTONE comme résultat de leurs travaux de recherches en 1994, le seuil minimax dépend principalement de la taille du signal  $N$ , et est défini par [38][48][49]:

$$\lambda^M = \hat{\sigma} \cdot \lambda_N^* \quad (\text{IV.16})$$

Où  $\lambda_N^*$  définit la valeur maximale de  $\lambda$ , et est déterminée par l'expression suivante:

$$\Lambda_N^* = \inf_{\lambda} \sup_d \left\{ \frac{\rho(\lambda, d)}{N^{-1} + \min(d^2, 1)} \right\} \quad (\text{IV.17})$$

Où  $\rho(\lambda, d) = E \left[ (\hat{d}_\lambda - d)^2 \right]$  désigne le risque sur l'estimation  $\hat{d}$  d'un coefficient d'ondelettes  $d$ .

Et en 2000, S.Sardy a étendu l'usage de ce seuillage aux signaux complexes qui est le cas dans notre projet, tout en développant le seuillage minimax élaboré par DONOHO et JOHNSTONE. Il l'a formulé comme suit [38]:

$$\Lambda_N^* = \inf_{\lambda} \sup_{d \geq 0} \left\{ \frac{\rho(\lambda, d)}{0,5 \cdot N^{-1} + \min(d^2, 2)} \right\} \quad (\text{IV.18})$$

Où  $\rho(\lambda, d) = E \left[ (\hat{d}_{1\lambda} - d_1)^2 + (\hat{d}_{2\lambda} - d_2)^2 \right]$ , ainsi que  $d_1$  et  $d_2$  sont les composantes réelle et imaginaire du coefficient d'ondelettes complexe  $d$ .

### IV.7.2 Seuil universel:

Comme alternative à l'utilisation des seuils minimax, DONOHO et JOHNSTONE ont proposé en 1994, un seuillage des coefficients d'ondelettes par le seuil universel, défini par [49]:

$$\lambda_{univ} = \hat{\sigma} \sqrt{2 \log N} \quad (\text{IV.19})$$

Il est prouvé que le max des  $N$  valeurs Indépendantes et Identiquement Distribuée (IID) de loi  $N(0, \sigma^2)$  doit être au dessous du seuil universel avec une probabilité s'approchant de un lors de la croissance de  $N$ . En comparant au seuil minimax, la valeur du seuil universel est tellement large, il atténue un grand nombre de coefficients du signal le long du bruit. Il est ainsi asymptotiquement optimal et simple à implémenter [49].

Par ailleurs, S.Sardy a montré que le seuil universel pour les signaux complexes est donné par [38]:

$$\lambda_{univ} = \sqrt{2 \ln(N \ln(N))} \quad (\text{IV.20})$$

### IV.7.3 Seuil SURE:

Comme les deux précédents, le seuil SURE (Stein's Unbiased Risk Estimate) a été proposé par le duo DONOHO et JOHNSTONE en 1995. Il est basé sur la minimisation du risque de l'estimation non biaisée de Stein lorsque le seuillage mou est opté. Le niveau du seuil est choisi pour chaque niveau de résolution de la DWT. Pour les signaux réels, si  $\hat{\mu} = \hat{\mu}(x)$  est un estimateur particulier de  $\mu = \mu_i$  avec  $(i=1, \dots, n)$  et si  $x_i \sim N(\mu_i, 1)$ , alors d'après Stein (1981), on peut écrire  $\hat{\mu} = x + g(x)$  où  $g(x)$  est une fonction de  $\mathfrak{R}^n$  dans  $\mathfrak{R}^n$  peu différentiable [38][49].

$$E_{\mu} \left\{ \|\hat{\mu}(x) - \mu\|^2 \right\} = n + E_{\mu} \left\{ \|g(x)\|^2 + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i} \right\} \quad (\text{IV.21})$$

Cette expression représente le risque sur l'estimation de  $\mu(x)$  de manière non biaisée.

Pour un signal complexe  $x = \alpha + j \cdot \beta$ ,  $g(x)$  peut être exprimée par:

$g(x) = g_{\text{réel}}(\alpha, \beta) + j \cdot g_{\text{imag}}(\alpha, \beta)$ , où  $g_{\text{réel}}$  et  $g_{\text{imag}}$  sont des fonctions réelles.

Si l'on applique le seuillage mou;  $\hat{\mu}_i^{\lambda} = \eta_{\lambda}^{\text{soft}}(x_i)$  pour l'expression (IV.20), on obtient:

$$SURE(\lambda, x) = n - 2 \otimes \{i : |x_i| \leq \lambda\} + \sum_{i=1}^n \min(|x_i|, \lambda)^2 \quad (\text{IV.22})$$

Où  $\otimes \{\cdot\}$  désigne la cardinalité de l'ensemble  $\{\cdot\}$ . Alors le choix du seuil à partir de cet estimateur est donné par:

$$\lambda^{SURE} = \underset{\lambda \geq 0}{\operatorname{argmin}} (SURE(\lambda, x)) \quad (\text{IV.23})$$

Si le signal est assez long, le risque SURE sera plus proche du risque vrai et par conséquent  $\lambda^{SURE}$  serait presque le seuil optimal dans un tel cas.

## IV.8 Choix d'ondelettes:

Historiquement, les premières ondelettes qui ont été mises au point sont les ondelettes orthogonales (Meyer, Mallat), si bien que les familles d'ondelettes non orthogonales ont reçu l'appellation d'ondelettes biorthogonales. Il existe ainsi un certain nombre de familles d'ondelettes orthogonales couramment utilisées, et il n'y a pas une ondelette qui soit meilleure qu'une autre. Tout dépend de l'application utilisée. Dans certains cas, l'ondelette la plus simple (Haar) sera optimale, tandis que pour d'autres

applications, ce sera le pire des choix possibles. *En pratique, il semblerait que l'élément le plus important soit le nombre de moments nuls.* Pour la plupart des applications, il est désirable d'avoir le plus de coefficients d'ondelettes quasiment nuls, et donc plus de moments nuls implique une meilleure transformation. Cependant, les ondelettes ayant un plus grand nombre de moments ont aussi un support plus grand. Ces deux critères contradictoires nous rappellent dans une certaine mesure l'inégalité de Heisenberg. La meilleure solution est sans doute l'emploi de la famille des ondelettes de Daubechies qui admettent simultanément un maximum de moments nuls pour un minimum de support [44][50].

### **IV.9 Conclusion:**

Dans le cadre de ce travail consistant sur l'estimation des paramètres du spectre Doppler d'un Radar Météorologique, on s'est consacré dans cette partie à renforcer les méthodes classiques étudiées durant le chapitre précédent par une étude plus modérée, reposant sur l'annulation ou la minimisation de l'effet du bruit sur ces estimateurs, tout en faisant appel à la théorie des ondelettes. Cette dernière a été bien traitée d'une manière simple et explicite, tout en récapitulant l'ensemble des procédés suivis le long des opérations du débruitage des échos rétrodiffusés; de la décomposition en ondelettes discrète du signal reçu jusqu'à sa reconstruction à partir des coefficients seuillés. Le signal débruité sera l'objet d'une ré-estimation des paramètres du spectre Doppler pour en garantir de meilleures prévisions météorologiques. L'importance et l'efficacité de cette méthode sera vérifiée dans le prochain et dernier chapitre (Simulations et commentaires) par voie de comparaison de ses résultats de simulation par rapport à ceux obtenus par les méthodes classiques vues précédemment (Pulse Pair, Fourier et AR).

# CHAPITRE V

## SIMULATIONS ET COMMENTAIRES

---

### V.1 Introduction:

Après un parcours plus ou moins dur, qu'on en est engagé le long de quatre chapitres; dans lesquels on a traité grosso modo les principes de base de la détection et les prévisions des phénomènes météorologiques pouvant s'avérer dangereux sur la sécurité de la navigation aérienne, des simulations des différents algorithmes acquis précédemment et des comparaisons de leurs résultats seront notre objet fondamental le long de ce chapitre.

L'introduction à ce chapitre se manifeste par la modélisation statistique des échos météorologiques rétrodiffusés, pour passer juste après au mécanisme de génération des signaux  $I$  (In phase) et  $Q$  (Quadrature phase) de ces échos. Voire l'impossibilité de mesurer directement les différents paramètres météorologiques, on a recours à la théorie des estimations. Et étant donnée la dépendance des divers phénomènes météorologiques de l'effet Doppler, ces différents estimateurs sont exercés sur le spectre Doppler du signal de retour. On se base principalement comme source du signal à traiter sur des données de simulation générées par un algorithme mis en œuvre par D.Zrnič.

Des techniques seront mises en application lors de l'estimation des différents paramètres du spectre Doppler à savoir la réflectivité et la vitesse des cibles météorologiques ainsi que la variance de cette vitesse. Les unes de ces techniques se déploient dans le domaine temporel (Pulse Pair) et basées sur la fonction d'autocorrélation, d'autres dans le domaine fréquentiel utilisant les transformées de Fourier discrètes (Fourier et AR), tandis que celles qui constituent l'objet de notre étude, combinent entre les deux domaines simultanément (temps et fréquence); c'est l'analyse multi résolution ou le traitement en ondelettes. Des commentaires spécifiques pour chacune d'elles seront cités, ainsi que des comparaisons globales entre leurs différents résultats seront discutées, tout en clôturant notre sujet par une interface graphique illustrant bien toutes les tâches qu'on a accompli le long de ce modeste travail, pour tirer finalement des conclusions générales sur l'importance de l'effet Doppler dans les traitements météorologiques, l'efficacité et la rentabilité des différentes techniques d'estimation utilisées, ainsi que de l'influence du Radar sur ces différents résultats.

## V.2 Modélisation statistique de l'écho météorologique:

La simulation sur ordinateur est en grande partie employée pour la génération et l'analyse des signaux Radar Météorologique, pour deux raisons simples: la première est celle du coût faible offert par la simulation et la seconde est liée à la maîtrise et le contrôle presque parfait de tous les paramètres de fonctionnement du Radar et même ceux de son environnement extérieur. Des approches sont souvent utilisées pour simuler les signaux Radar ( $I$  &  $Q$ ) représentant les différentes perturbations météorologiques. Ces approches de simulation sont généralement basées sur un modèle statistique bien déterminé, c.à.d. des processus aléatoires avec des spectres de puissances assignés (distribution statistique). Nous optons dans notre étude pour le modèle Gaussien le plus utilisé pour la modélisation de ces différents échos météorologiques.

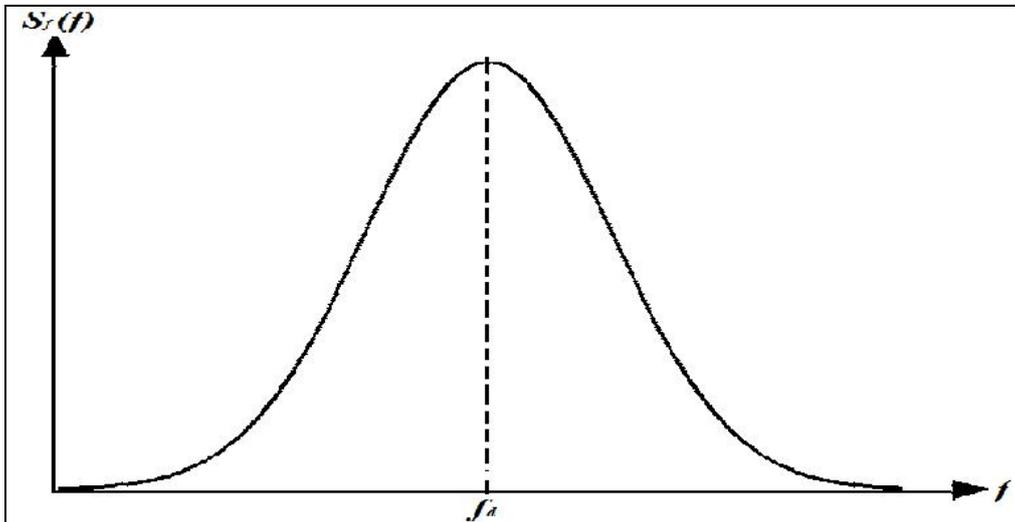


Fig V.1: Modélisation Gaussienne du Spectre Doppler de l'écho reçu.

Les signaux Radar Météorologique reçus sont une contribution des échos d'un très grand nombre de différentes particules d'air (hydrométéores), ou d'irrégularités de l'indice de réfraction de l'air. De ce fait et en vertu du Théorème Central Limite (TCL), ces échos sont supposés être modélisés comme étant un *processus aléatoire* dont la densité spectrale de puissance obéira à la distribution statistique Normale (Loi Gaussienne). Sa densité de probabilité est donnée par [37][38][50]:

$$S_f(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2\cdot\sigma_f^2}\right) \quad (\text{V.I})$$

Où:  $S_f(f)$  est la densité spectrale de puissance de l'écho réfléchi, en fonction de la fréquence du Radar  $f(\text{Hz})$ .

$f_d(\text{Hz})$  est la fréquence Doppler caractérisant les différentes perturbations météorologiques.

$\sigma_f(m/s)$  est la largeur du spectre de puissance de l'écho Radar.

### V.3 Génération des données de simulation:

Lors de leurs rétrodiffusions, les échos météorologiques produisent au niveau du récepteur Radar une tension complexe ( $Z = I + j \cdot Q$ ) caractérisée par une puissance qu'on appelle spectre Doppler (puissance des échos Radar en fonction des vitesses moyennes). Un programme de simulation de ces échos fournira deux canaux, un pour les composantes en phase  $I$ , et un autre pour les composantes en quadrature de phase  $Q$  [50].

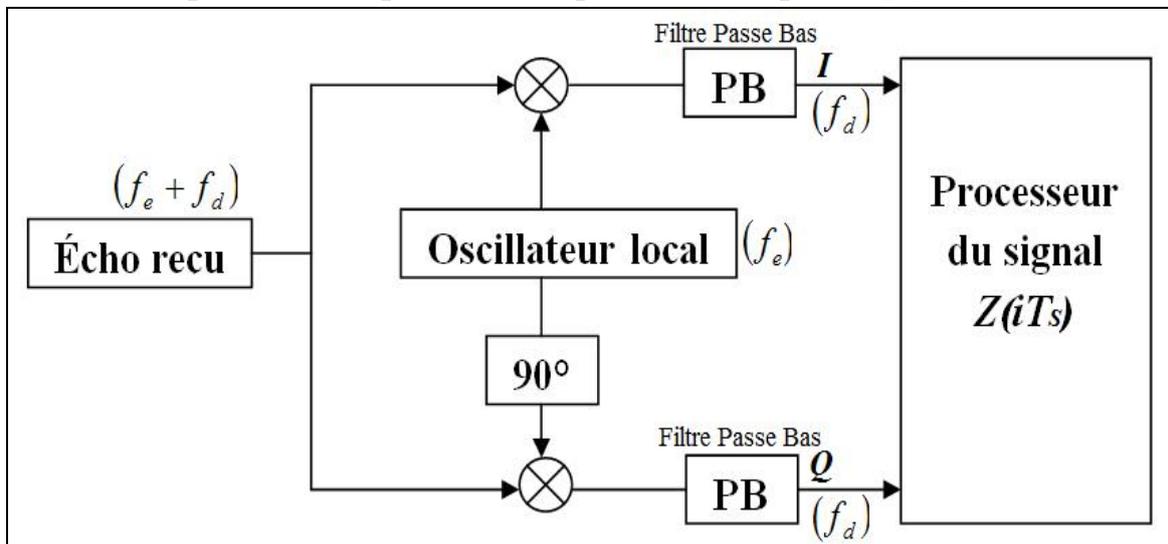


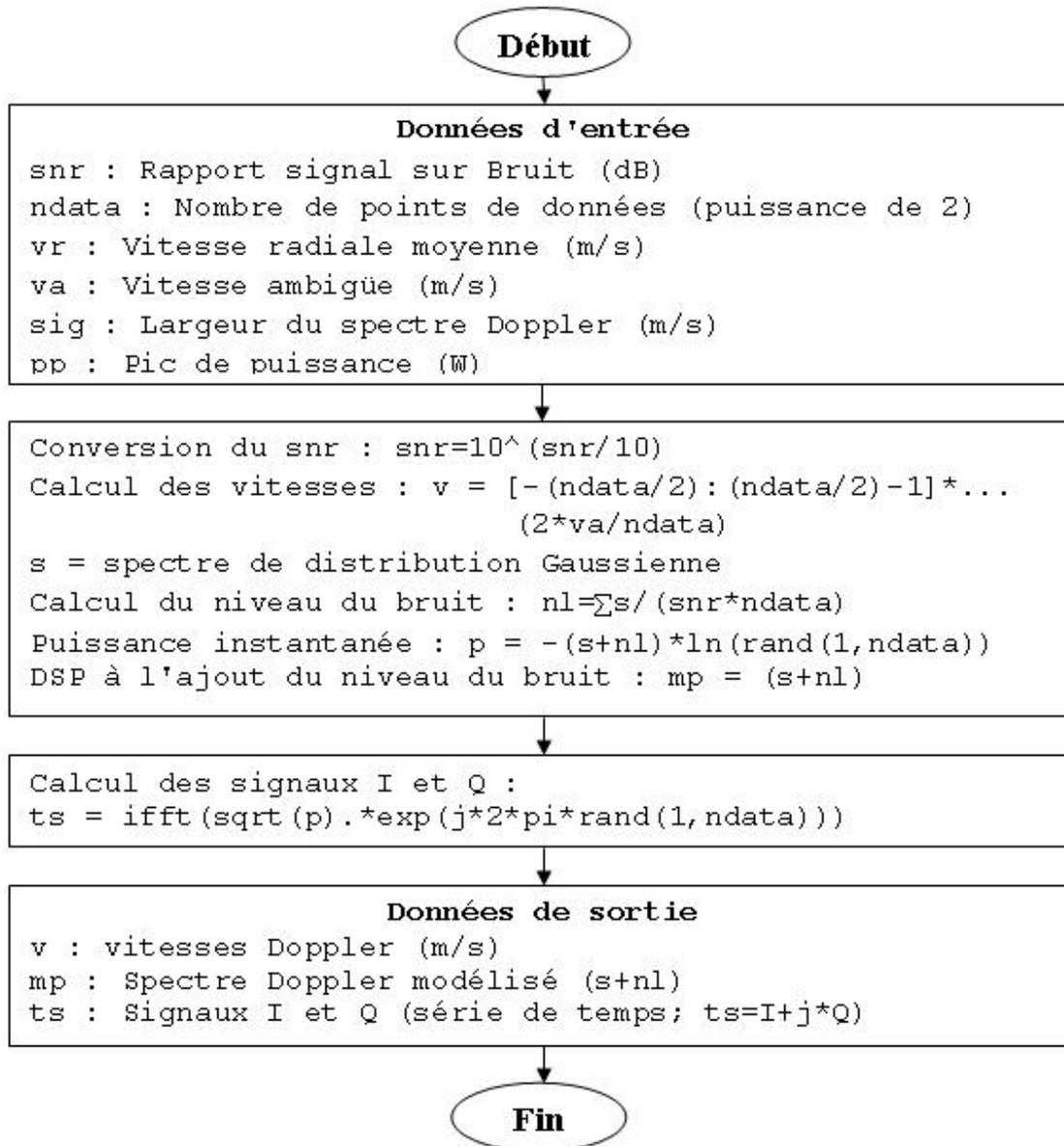
Fig V.2: Processus de génération des signaux  $I$  &  $Q$ .

Un mécanisme de génération de ces signaux de simulation, a été mis en application par D.Zrnič en 1975. Il a fondé son algorithme sur les hypothèses suivantes [37][38]:

- ☒ Contrairement au spectre du bruit du récepteur Radar qui est à bande large, celui de l'écho météorologique est à bande étroite.
- ☒ La puissance du signal météorologique est plus élevée que celle du bruit du récepteur.
- ☒ Les propriétés statistiques de l'écho météorologique et celles du bruit du récepteur sont presque similaires.

Cet algorithme permet réellement de produire les données de vitesses Doppler, le spectre Doppler et les signaux  $I$  et  $Q$  (séries temporelles), relatives à une certaine cellule de distance.

L'enchaînement des étapes suivies dans cet algorithme est montré par l'organigramme suivant [38][50]:



#### V.4 Effets des paramètres d'entrée:

Dans cette section, on va essayer d'étudier l'effet des différents paramètres d'entrée de la routine de génération des données de simulation, sur les séries temporelles  $I$  et  $Q$ , ainsi que sur le spectre Doppler de l'écho météorologique. La procédure consiste à assigner à chaque paramètre, indépendamment des autres (c.à.d. un par un), deux valeurs suffisamment écartées l'une de l'autre d'une manière à garantir une bonne localisation des effets de chacun d'eux. Des commentaires et des conclusions seront tirés finalement, sur les effets et le poids de chacun de ces paramètres.

V.4.1 Effet du SNR:

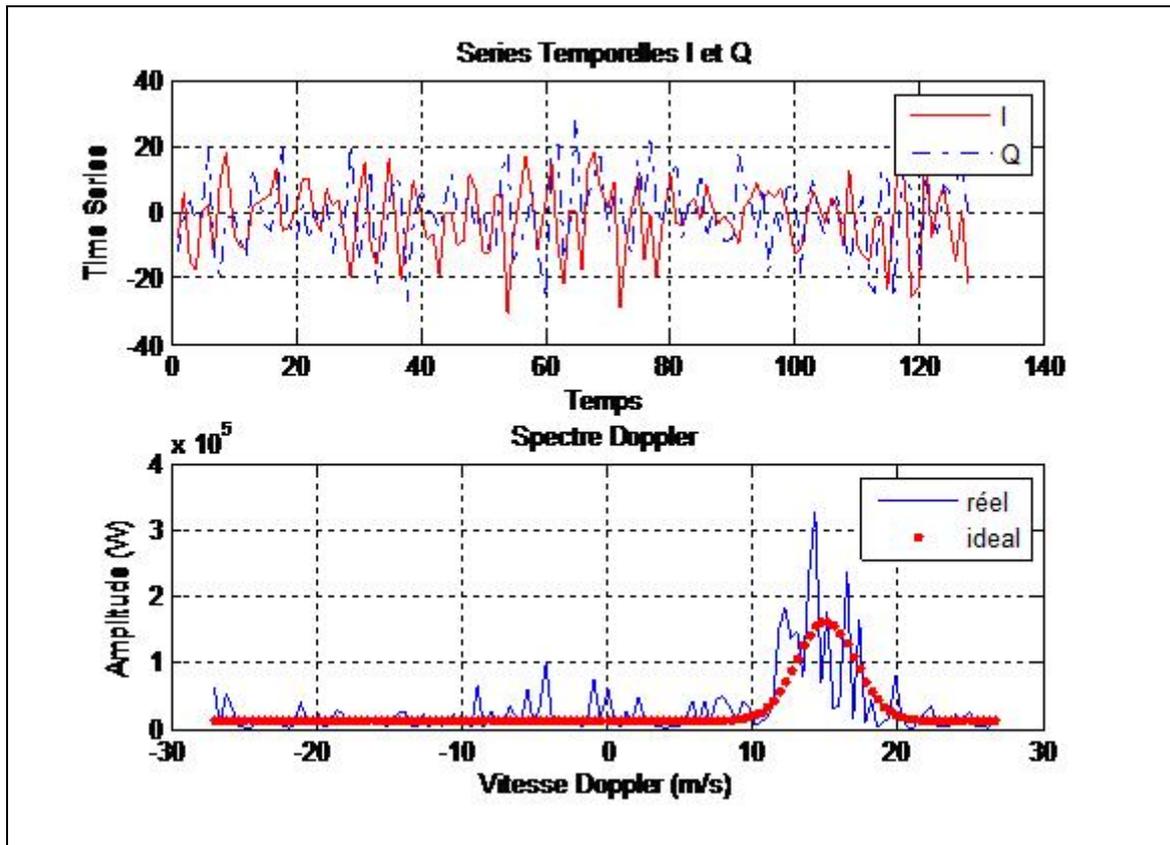


Fig V.3: Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (SNR=1dB)

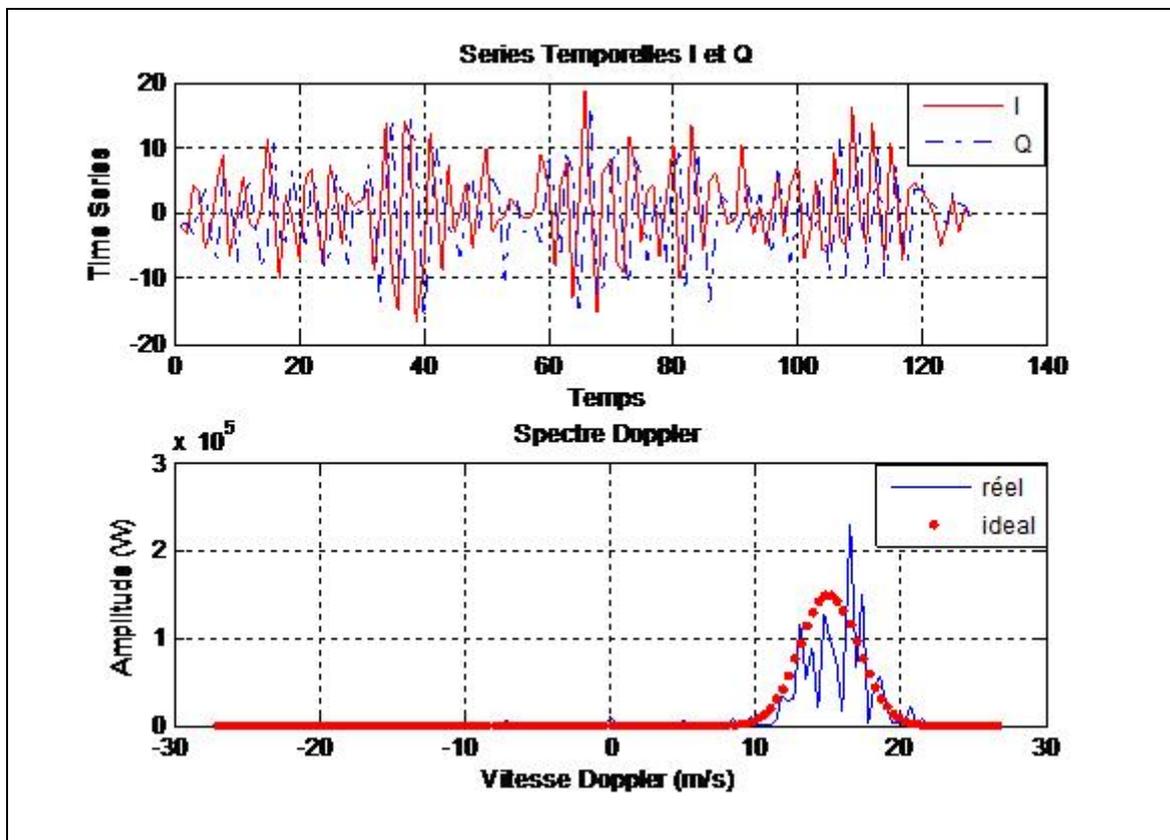


Fig V.4: Effet du SNR sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (SNR=10dB)

Étant donné que le rapport signal sur bruit renseigne sur la quantité du bruit additionné au signal utile, son effet apparaît bien clair sur les données de simulation générées (les séries temporelles ( $I$  &  $Q$ ) et le spectre Doppler). En effet, l'utilisation d'un SNR faible de l'ordre de (1dB) a provoqué un fort chevauchement des séries temporelles ( $I$  et  $Q$ ) ainsi que leur développement très aléatoire, et une perte d'informations et de relations de phase entre ces deux composantes. Le spectre Doppler quand à lui aussi, n'est pas à l'abri de cette influence. En effet, et avec cette faible valeur du SNR, traduisant une forte présence du bruit dans le signal, il subit une forte dégradation présentée par l'apparition d'importants pics secondaires qui n'ont plus lieu dans le spectre idéal.

Par contre une amélioration du signal est enregistrée lors de l'augmentation des valeurs du SNR (SNR = 10dB dans cette simulation), induisant à une faible contribution du bruit dans le signal utile. Les signaux ( $I$  &  $Q$ ) dans ce cas là, seront mieux illustrés et plus homogènes, tandis que le spectre Doppler cette fois ci, sera plus lisse et plus représentatif, ce qui permet une meilleure extraction des différents paramètres utiles qui y sont liés.

#### V.4.2 Effet du nombre d'échantillons:

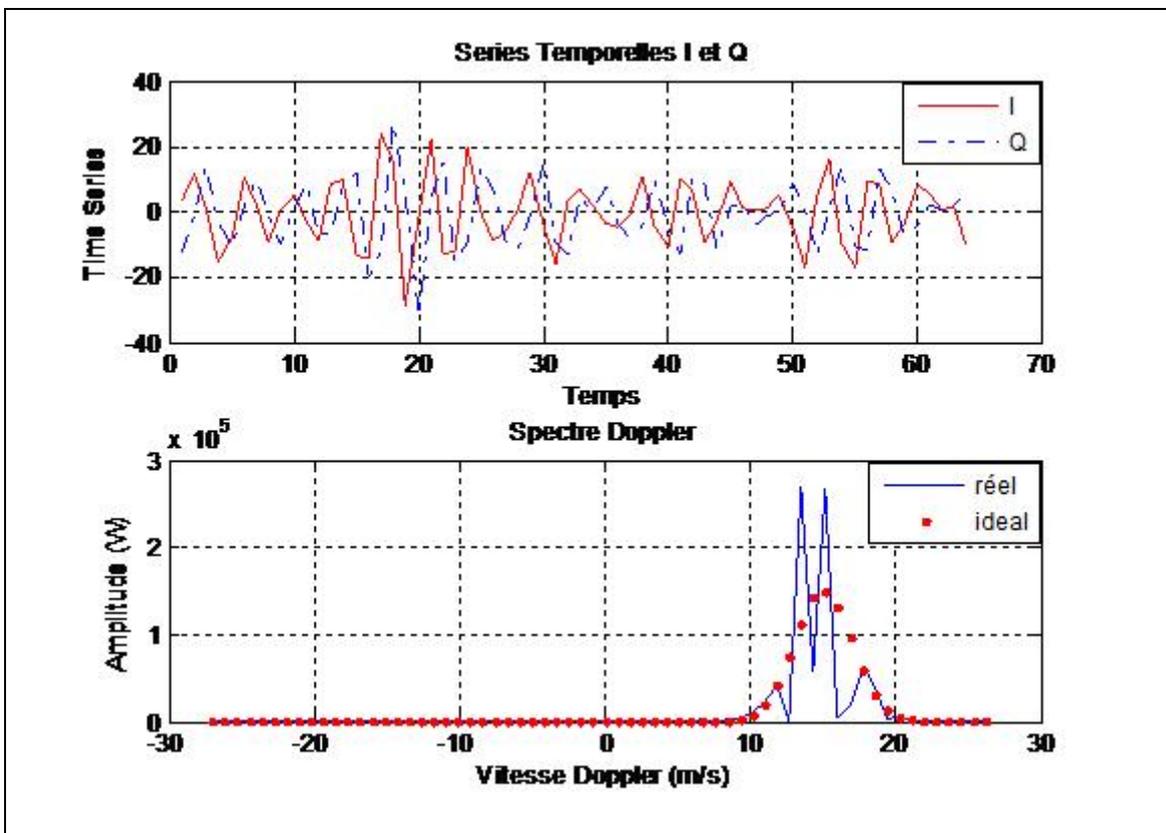


Fig V.5: Effet de ndata sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (ndata=64)

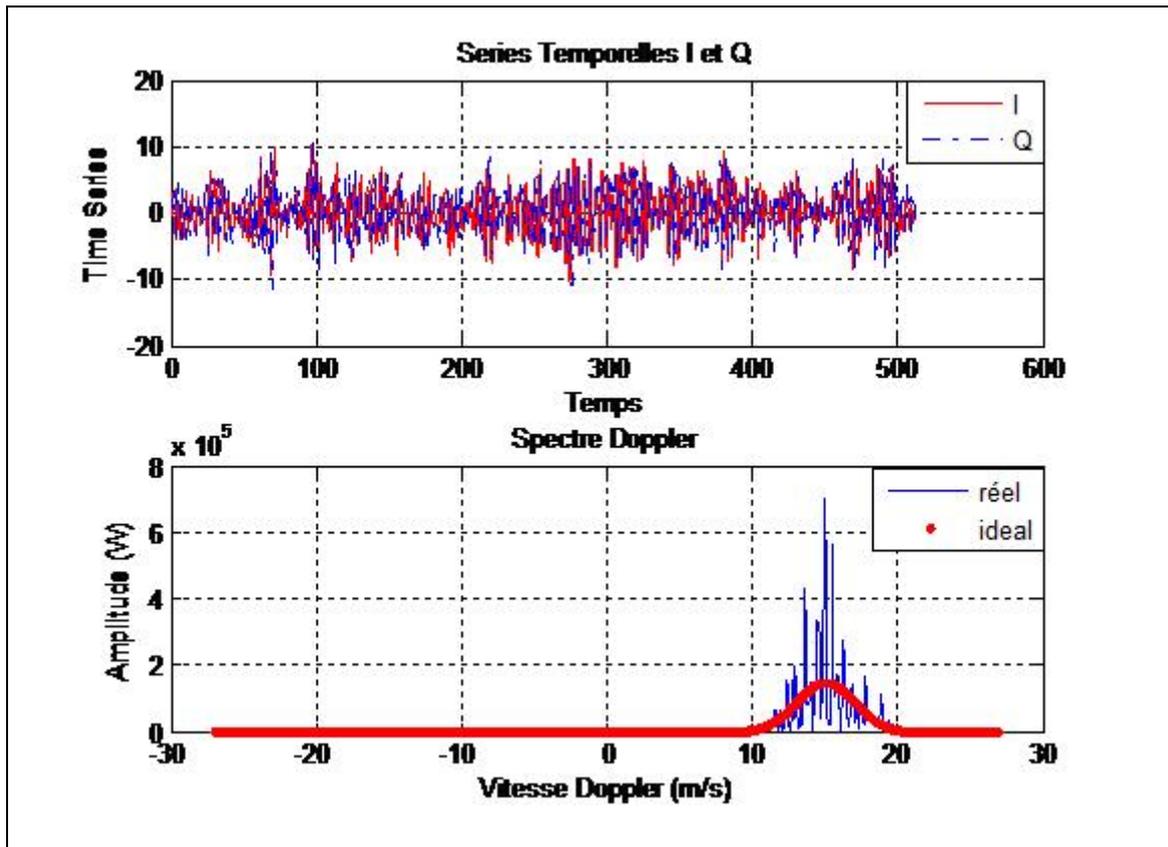


Fig V.6: Effet de ndata sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (ndata=512)

Cette routine a utilisé lors de sa génération de ces signaux Radar, un nombre bien défini d'échantillons pour chaque cellule de résolution. L'utilisation d'un nombre limité d'échantillons a une influence directe sur la qualité des signaux générés, soit en termes de leurs résolutions fréquentielles qui lui y sont en relation proportionnelle, ou en termes de richesse spectrale de leurs spectres respectifs. En effet, l'utilisation limitée du nombre d'échantillons est malgré son caractère garantissant la stabilité des signaux générés et le maintien des relations de phase entre les signaux ( $I$  &  $Q$ ), a un effet majeur sur la restriction de la qualité des informations extraites. Par contre, et en augmentant le nombre d'échantillons utilisés (par la réduction de la période d'échantillonnage), les signaux générés seront plus compacts, plus descriptifs et très riches en composantes spectrales, permettant ainsi une meilleure restitution des informations transportées. Mais dans un autre sens, l'accroissement du nombre d'échantillons, a pour conséquence, l'augmentation du temps de calcul et donc la nécessité de calculateurs plus puissants et donc plus coûteux.

En revanche, Le nombre optimal d'échantillons à utiliser, doit être choisi d'une manière à avoir une résolution spectrale appréciable.

V.4.3 Effet de la largeur du spectre Doppler ( $\sigma$ ) :

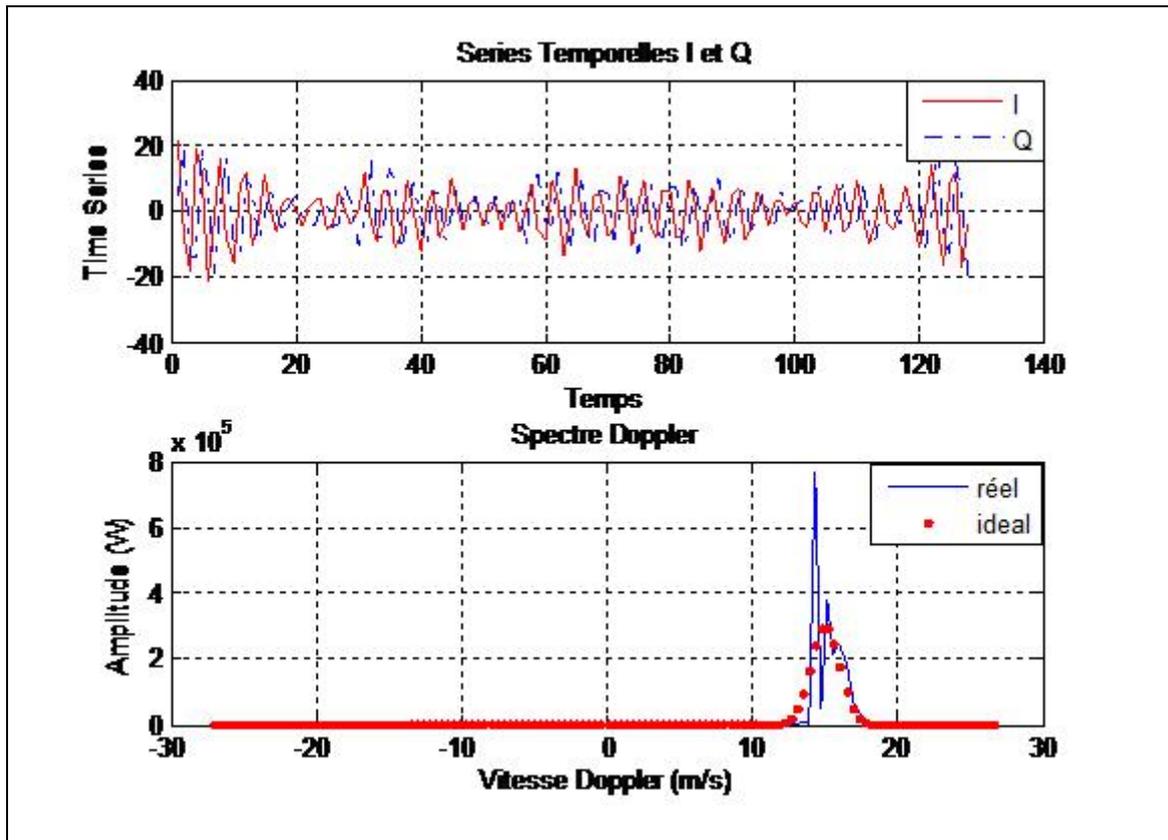


Fig V.7: Effet de  $\sigma$  sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ( $\sigma=1$ )

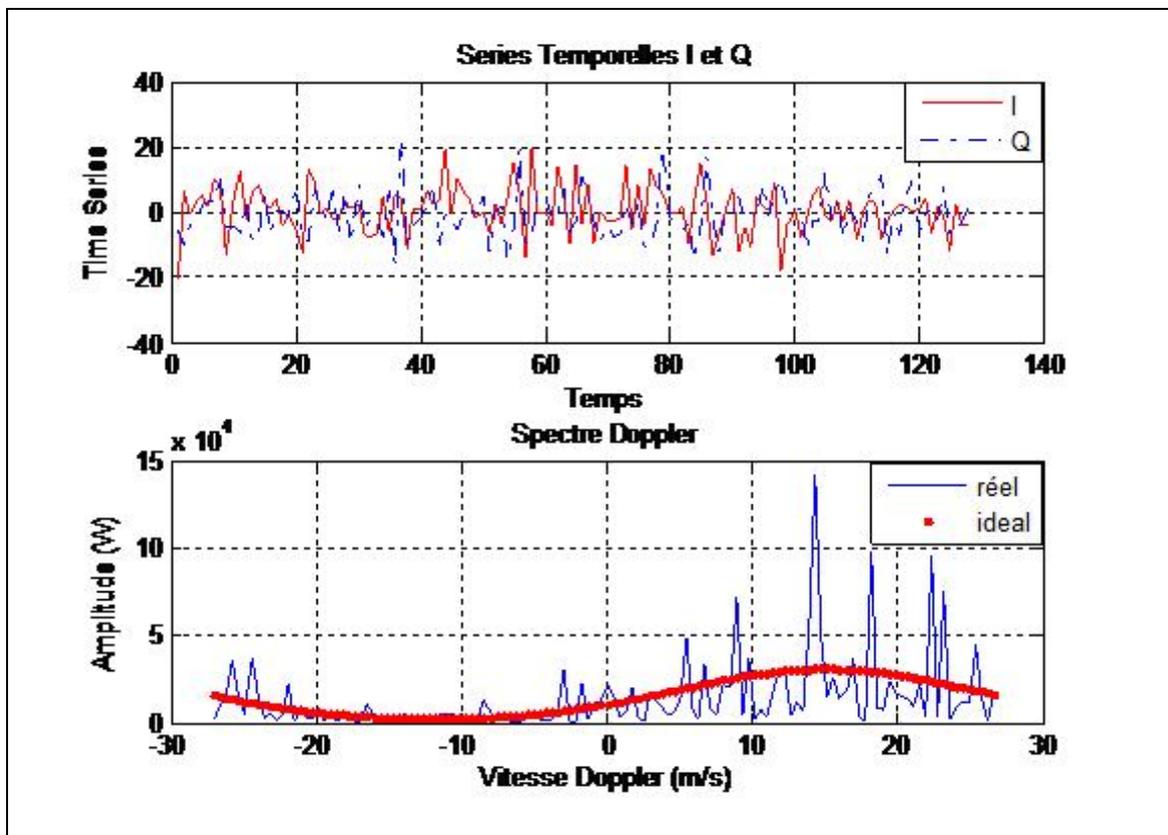


Fig V.8: Effet de  $\sigma$  sur le spectre Doppler et les signaux I et Q ( $\sigma=10$ )

Comme tout processus aléatoire muni d'une distribution Gaussienne, la connaissance de ses paramètres tels que sa moyenne et sa variance révèle d'une très grande importance dans l'ensemble de son étude statistique. L'étude entamée dans ce rapport sur le spectre Doppler du Radar Météorologique est basée fortement sur les valeurs assignées à la largeur spectrale ( $\sigma$ ). Les simulations effectuées montrent bien l'influence très notable des valeurs de ( $\sigma$ ) sur les signaux générés, et particulièrement sur la largeur de son spectre. Grandes valeurs pour ( $\sigma$ ) induisent à un spectre très large, tandis que de petites valeurs donnent des spectres à bandes étroites. Cela est montré par les figures (V.7) et (V.8):

( $\sigma = 1$  m/s)  $\Rightarrow$  largeur du spectre s'étend d'environ (12 à 18 m/s).

( $\sigma = 10$  m/s)  $\Rightarrow$  largeur du spectre s'étend d'environ (-10 à 35 m/s).

L'utilisation de larges spectres sert principalement pour la détection de cibles météorologiques de diverses natures, tandis que les étroits sont restreints à la localisation de certains phénomènes visés. C'est le deuxième cas qui est généralement le plus adopté en Aéronautique, permettant ainsi une prévision seulement des phénomènes qui peuvent être dangereux.

#### V.4.4 Effet de la puissance de pic (pp) :

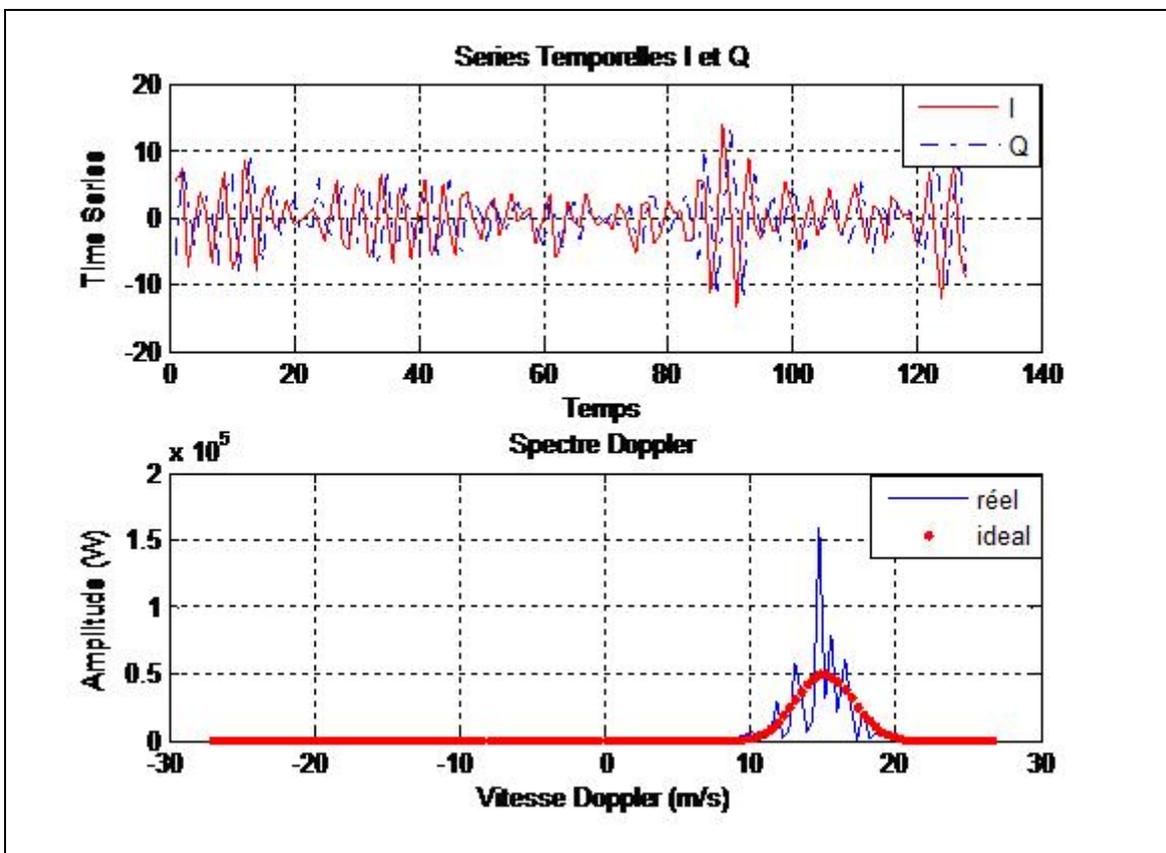


Fig V.9: Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (pp=250 kW)

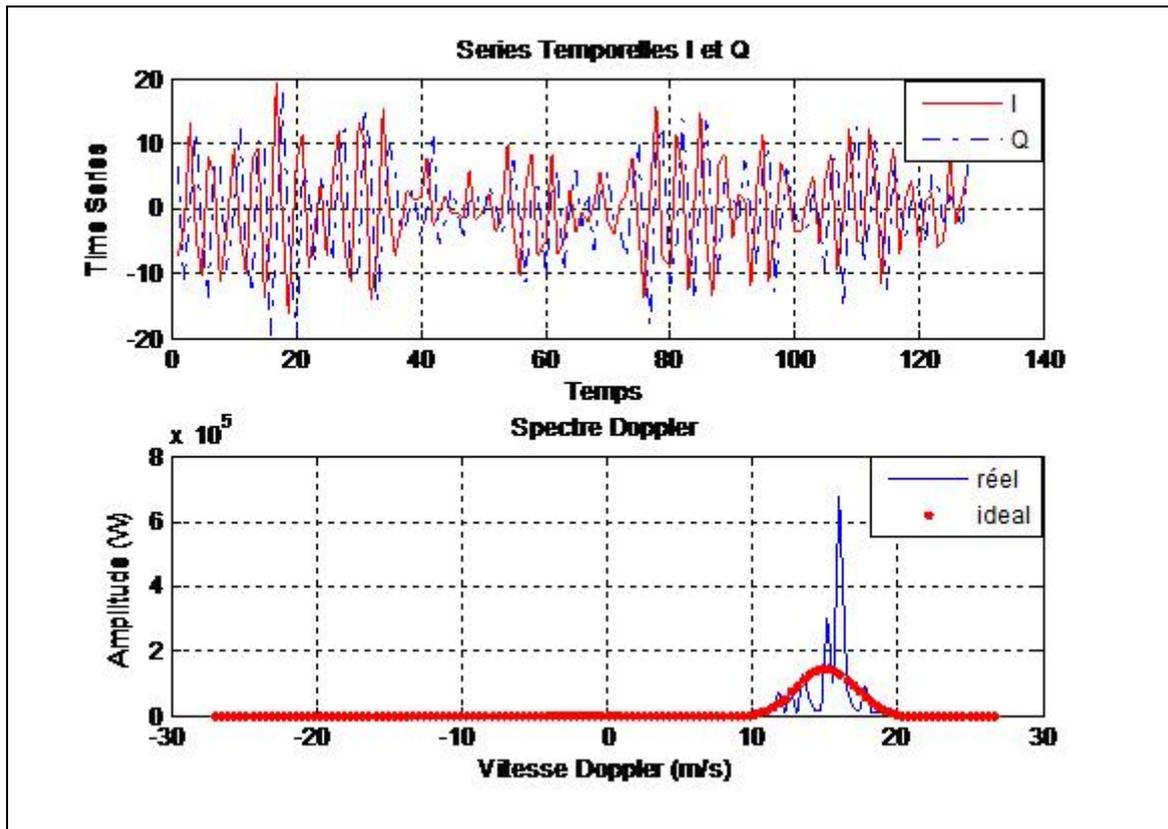


Fig V.10: Effet de pp sur le spectre Doppler et les signaux I et Q (pp=750 kW)

La puissance du signal Radar Météorologique mise en œuvre, joue un rôle crucial dans les traitements Radar, tant en émission qu'en réception. 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 réfléchi intéressante. Les figures (V.9) et (V.10) illustrent bien ces influences. En effet, l'augmentation de la puissance de pic a notablement agi sur les signaux simulés, que ce soient les signaux ( $I$  &  $Q$ ) par étalement de leurs amplitudes respectives, ou le spectre Doppler par l'apparition de pics de puissances très importants. Par contre, en émissions de faibles puissances, le signal rétrodiffusé sera très bruité et risque même de ne pas rejoindre le Radar à cause des différentes atténuations.

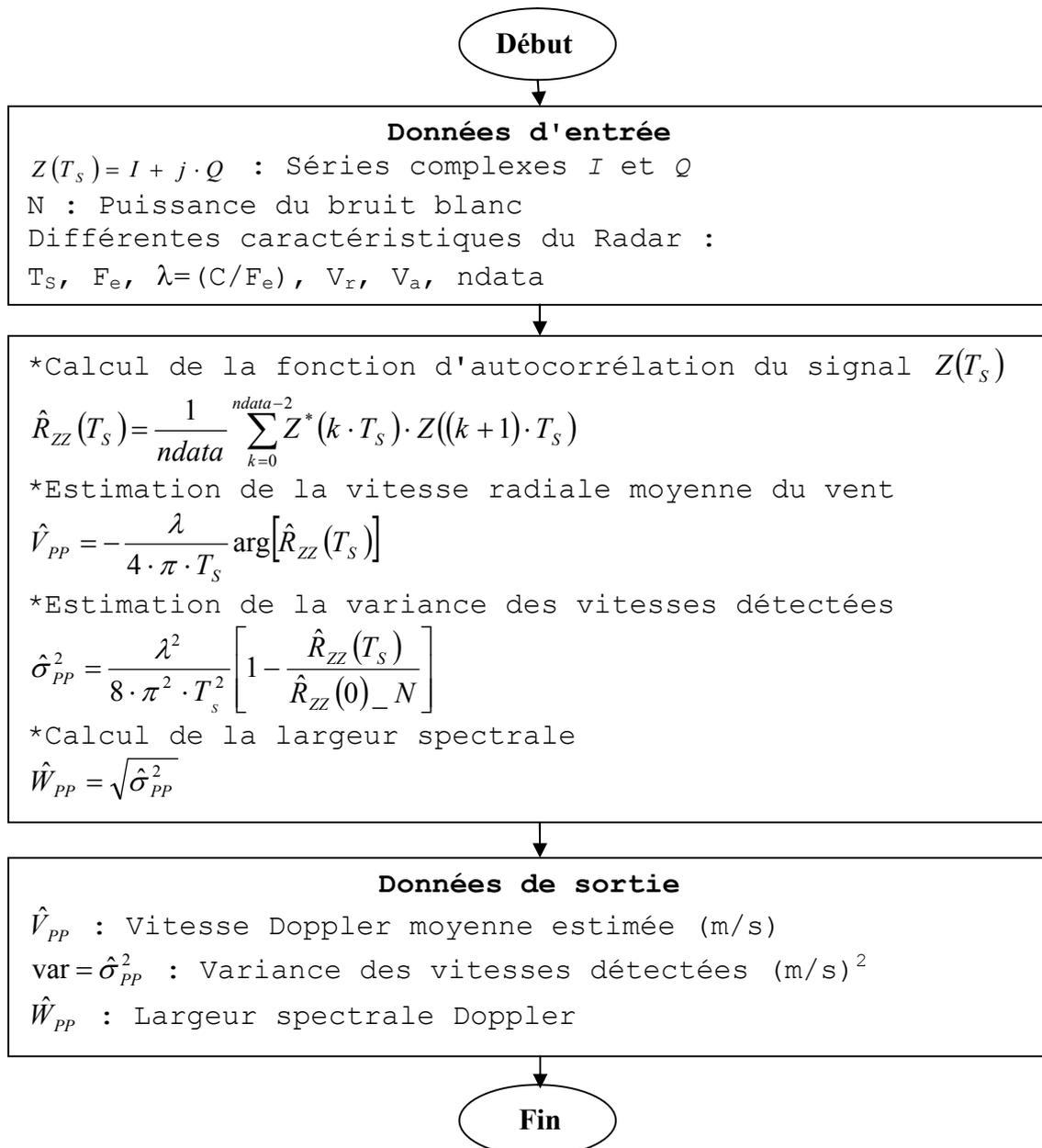
Le dilemme de la grandeur de la puissance à mettre en œuvre, reste une question d'actualité. En effet, une forte puissance nécessite de matériels complexes et donc couteux, et les faibles puissances induisent aux limitations citées dans le paragraphe précédent. Une solution à ce problème est de mettre en cause de nouvelles techniques de traitement du signal Radar de l'émission jusqu'à la réception, permettant de palier à ce dilemme.

**V.5 Algorithmes de simulation:**

Nous présentons dans cette section l'ensemble des organigrammes explicitant la stratégie suivie dans le développement et la simulation de chaque méthode de celles proposées pour l'estimation des paramètres du spectre Doppler (vitesse radiale moyenne et la largeur spectrale des vitesses détectées).

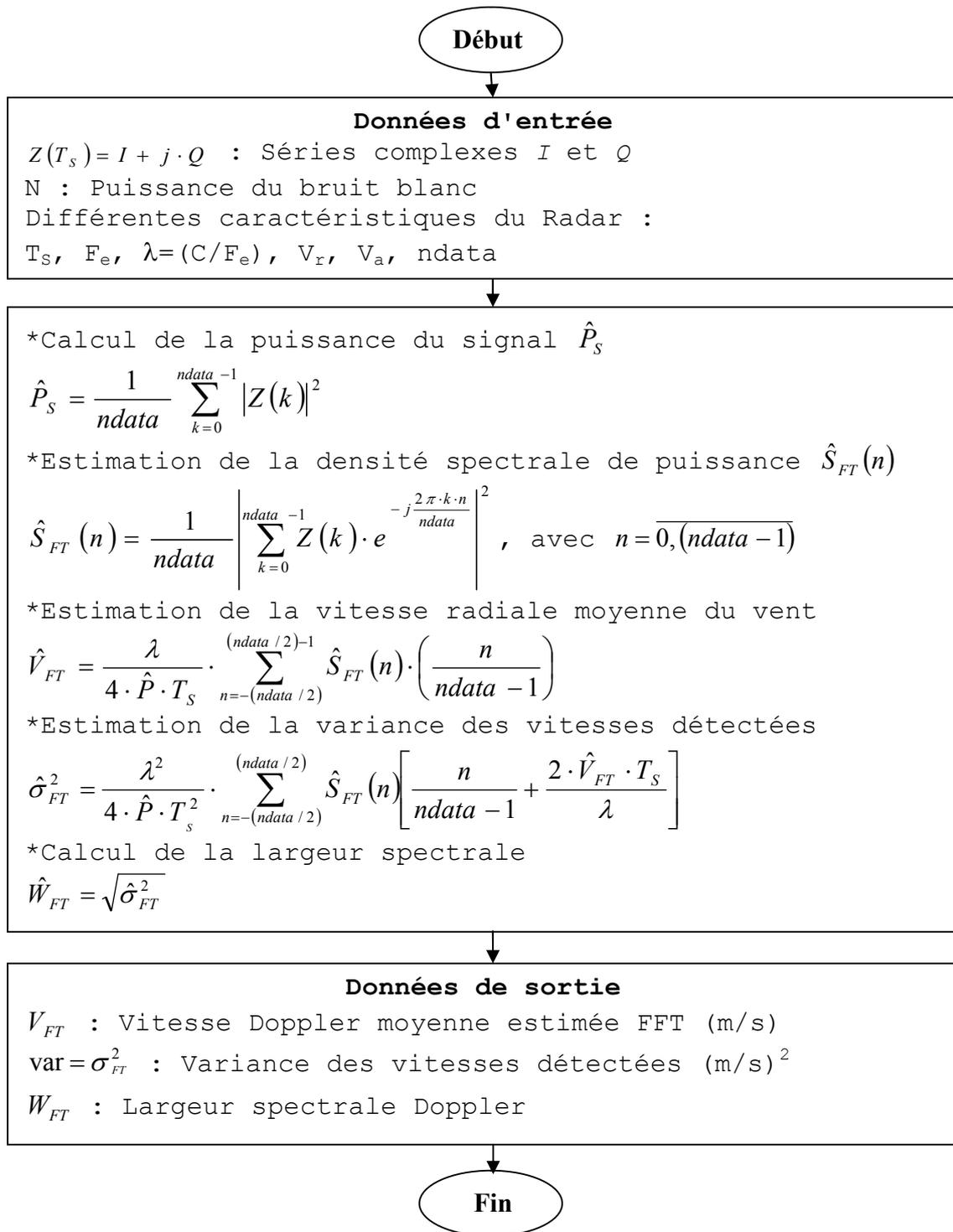
**V.5.1 Méthode Pulse Pair (méthode temporelle):**

La méthode Pulse Pair est une méthode temporelle, basée sur la fonction d'autocorrélation complexe des séries temporelles  $Z(I + j \cdot Q)$ . Son organigramme est donné par:



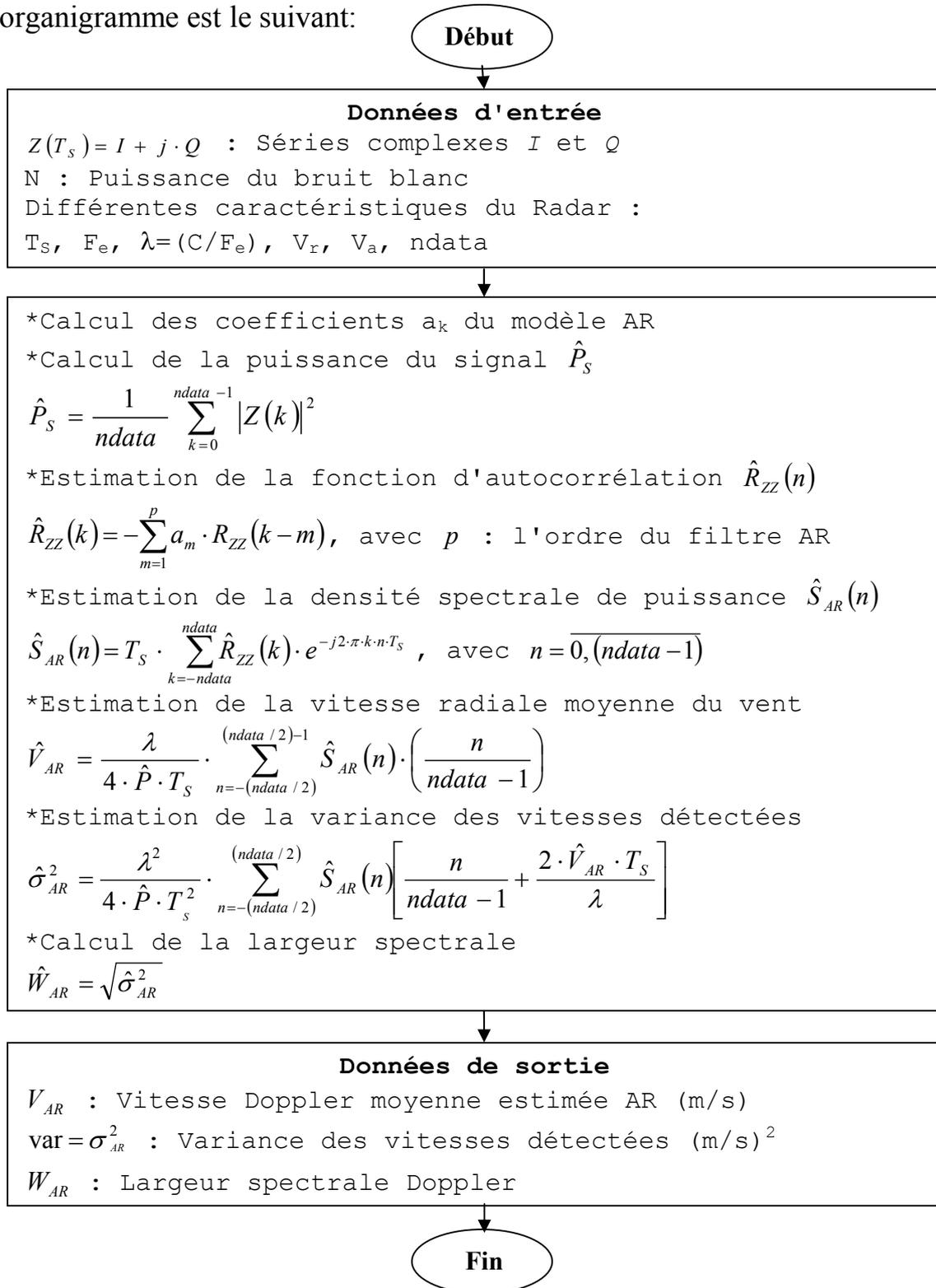
**V.5.2 Méthode de Fourier (méthode fréquentielle):**

Comme alternance à la méthode Pulse Pair utilisée dans le domaine temporel, la méthode de Fourier sert à effectuer les mêmes tâches, sauf que cette fois ci, est dans le domaine fréquentiel, et est basée sur la transformée de Fourier discrète des séries temporelles  $Z(I + j \cdot Q)$ . Son organigramme est donné comme suit:



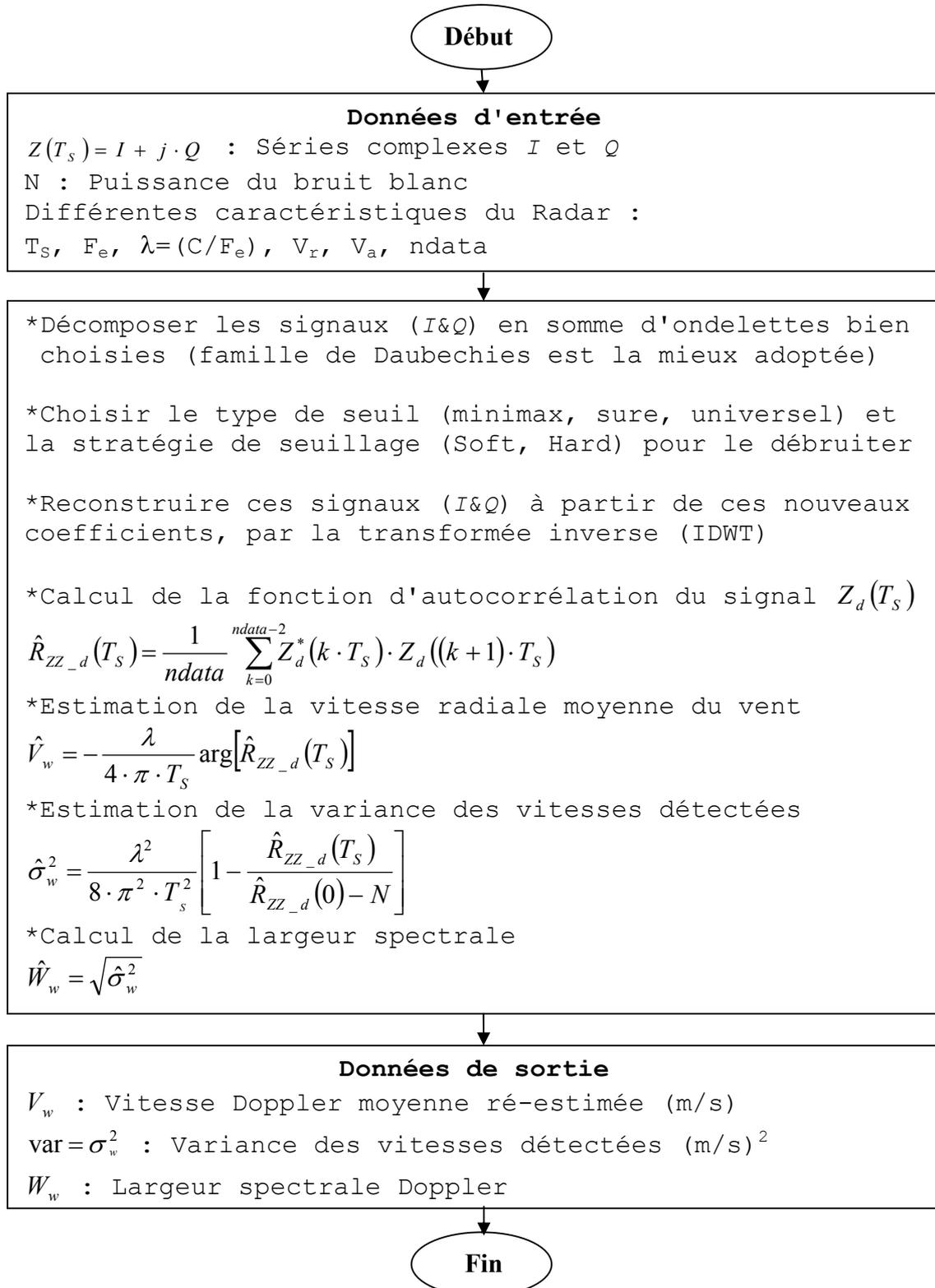
**V.5.3 Méthode autorégressive AR (méthode fréquentielle):**

Toujours dans le domaine fréquentiel, et différemment de la méthode de Fourier qui utilise directement la TFD dans les différentes estimations, la méthode autorégressive sert quand à elle d'approximer le spectre Doppler par un modèle AR, au lieu d'un calcul direct (méthode paramétrique). Son organigramme est le suivant:



**V.5.4 Méthode des ondelettes (méthode multi-résolution):**

Dans cette section, le travail consiste à débruiter les séries temporelles ( $I$  &  $Q$ ) par la méthode des ondelettes, puis ré-estimer les paramètres du spectre Doppler avec les nouveaux signaux débruités en utilisant l'algorithme Pulse Pair. Son organigramme est défini comme suit:



### V.6 Résultats de simulation:

Dans cette partie, on se consacre principalement à la représentation des résultats de simulation obtenus pour les différentes méthodes discutées auparavant. Dans un premier lieu, une lecture générale et des commentaires seront pris en compte, puis des comparaisons et des conclusions seront tirées dans un second lieu.

Les données de simulation consistent de [37]:

- ❖ Considérer dix cellules de distance, dont les vitesses radiales Doppler sont:  $v_r = [12.5 \ 15.3 \ 12.4 \ 10.9 \ 9.2 \ 15 \ 17.2 \ 10.2 \ 18.2 \ 12.2]$ .
- ❖ Considérer un Radar Météorologique Doppler, de type (WSR-88D), et de paramètres suivants:
  - ☒ Fréquence du signal émis:  $f = 2.85\text{Ghz}$
  - ☒ Longueur d'onde:  $\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \approx 10.5\text{cm}$
  - ☒ Période de répétition des impulsions:  $PRF = 1\text{kHz}$
  - ☒ Période d'échantillonnage:  $T_s = \frac{1}{PRF} = 10^{-3} \text{ sec}$
  - ☒ Vitesse maximale non ambiguë:  $v_a = \frac{\lambda}{4 \cdot T_s} \approx 26.3\text{m / sec}$
  - ☒ Puissance du signal émis:  $P_p = 750\text{kW}$
  - ☒ Rapport signal sur bruit:  $SNR = 12\text{dB}$
  - ☒ Largeur du spectre Doppler:  $\sigma = 2\text{m / sec}$
  - ☒ Nombre d'échantillons par cellule de distance:  $n_{data} = 128$

L'estimation des vitesses radiales Doppler par les différentes méthodes sera renforcée par un autre graphe illustrant l'erreur relative commise sur ces estimations par rapport aux vitesses radiales introduites.

La stratégie suivie dans cette section est de présenter d'abord le graphe des vitesses radiales suivi par des commentaires qui sont justifiés par un graphe d'erreur relative de cette estimation, et puis on passe à la représentation du graphe de l'estimation de la largeur spectrale avec ses commentaires appropriés.

V.6.1 Résultats de la méthode Pulse Pair:

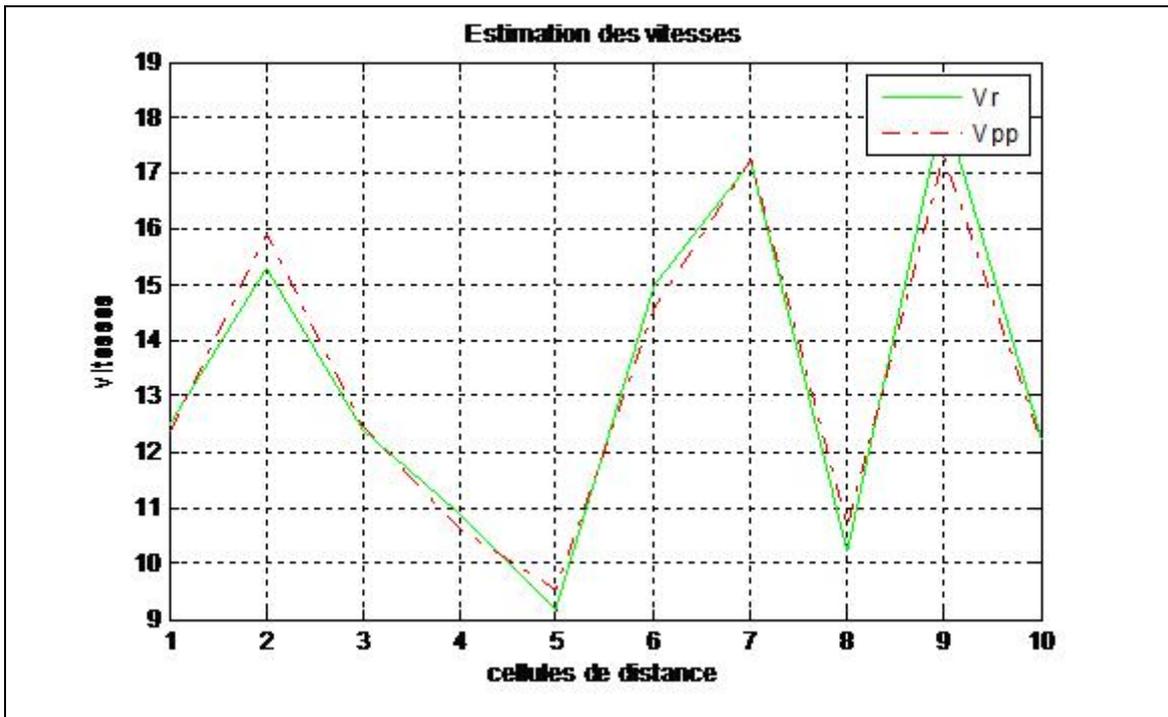


Fig V.11: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode Pulse Pair

La simulation de l'algorithme Pulse Pair a montrée que ce dernier est un bon estimateur pour estimer la vitesse radiale. C'est ce qui est montré par la figure ci-dessous illustrant bien sa faible erreur relative (moins de 5%). Donc, cette méthode peut être utilisée dans la météorologie aéronautique sans aucun doute.

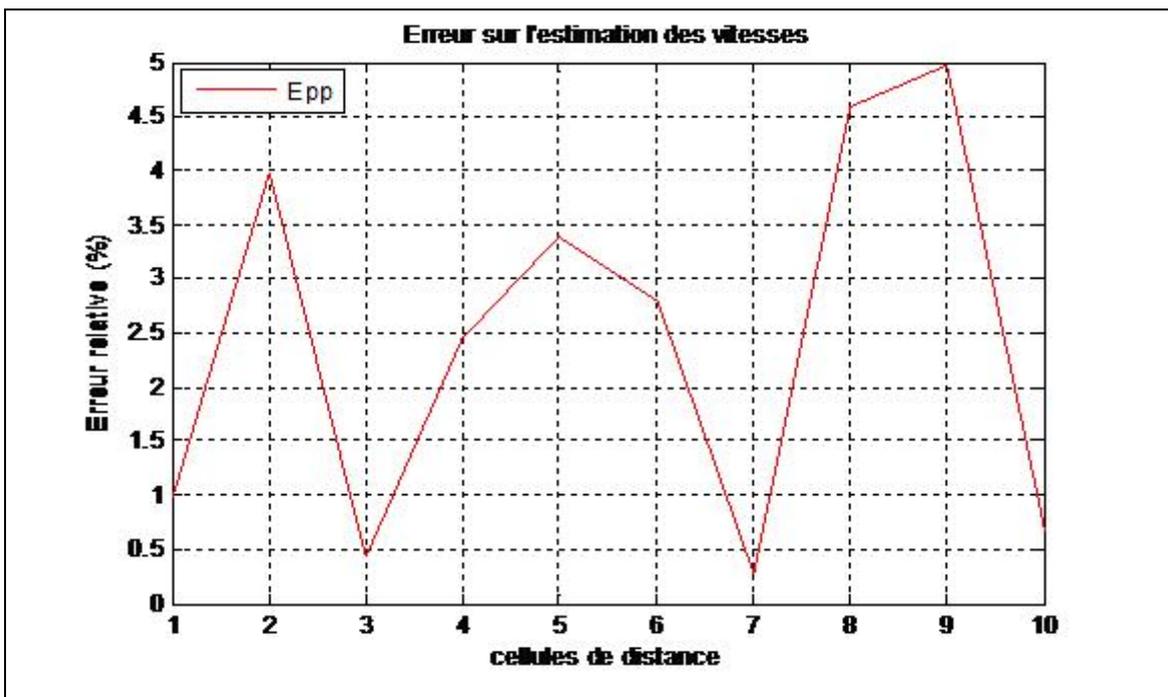


Fig V.12: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par Pulse Pair

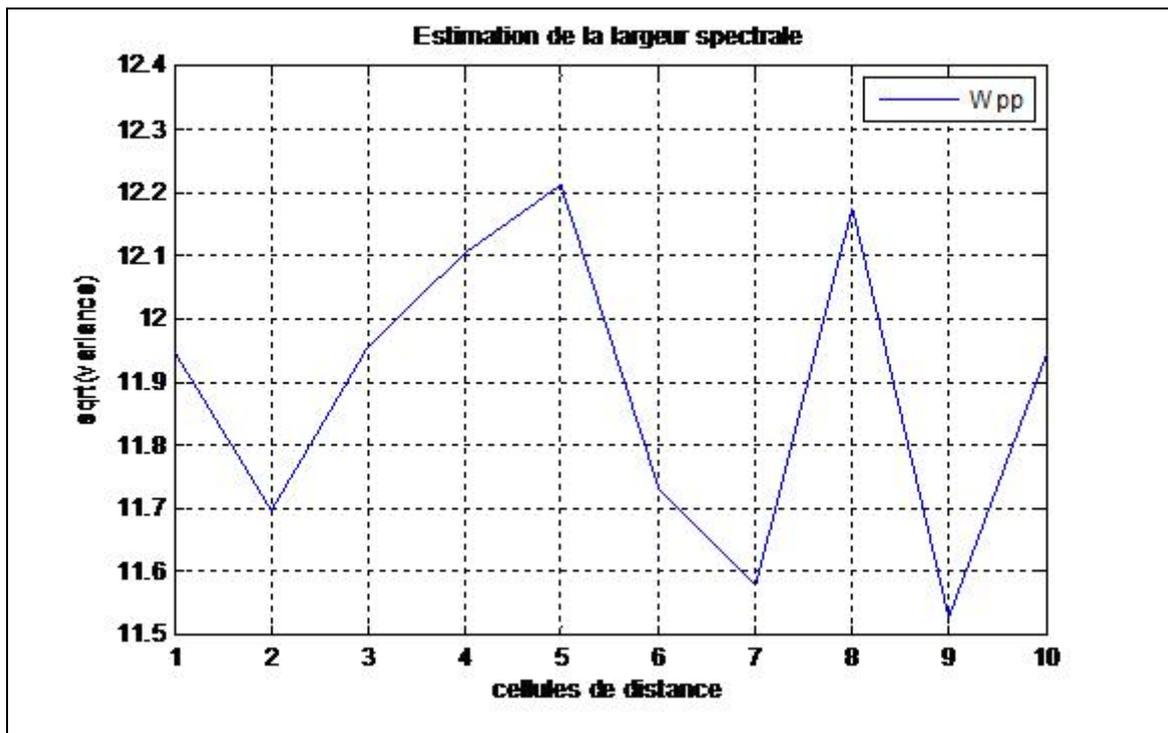


Fig V.13: Estimation de la largeur spectrale par la méthode Pulse Pair

Ce qui concerne la variance et la largeur spectrale des vitesses détectées, on constate que celles-ci varient faiblement d'une cellule de distance à une autre comme le montre le graphe en haut (la largeur spectrale des vitesses détectées oscille entre 10.5 à 13.5 m/s).

### V.6.2 Résultats de la méthode de Fourier:

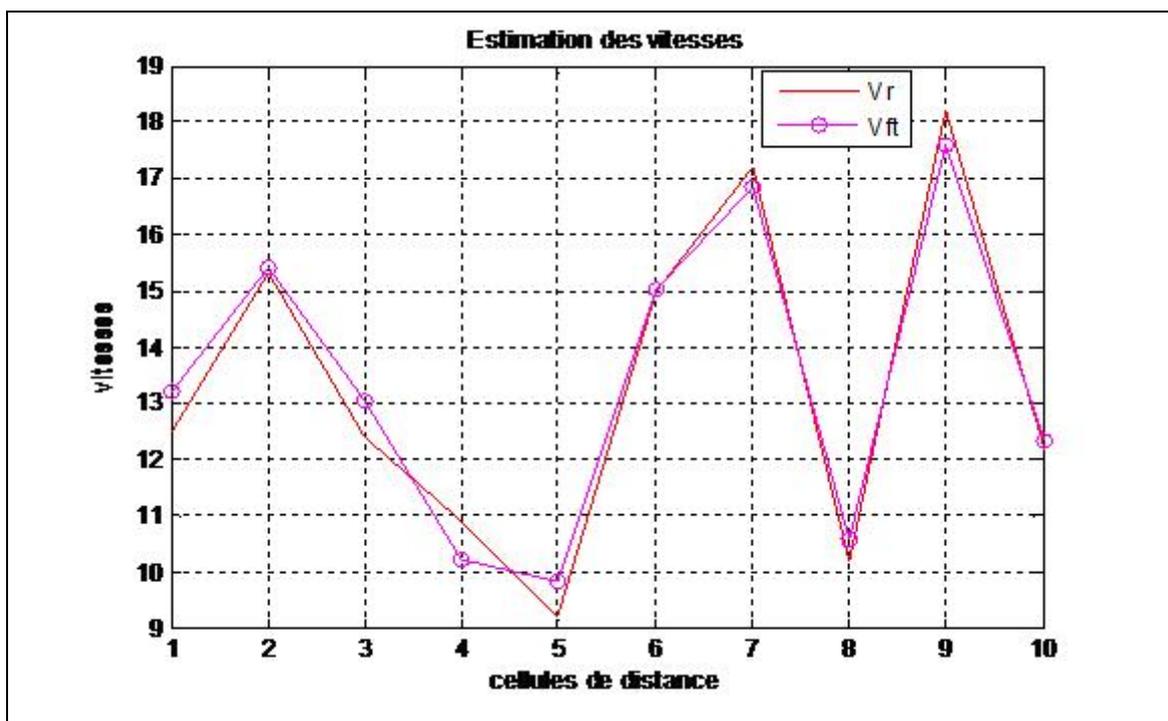


Fig V.14: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode de Fourier

L'estimation spectrale de la vitesse radiale Doppler par la méthode de Fourier a donné des résultats peu acceptables dans un premier temps, mais et en introduisant l'effet du calibrage, on a aboutit à des résultats plus améliorés comme montrés par la figure (V.14). La précision des résultats est un peu dégradée en comparant à celle de la méthode Pulse Pair (l'erreur relative a atteint presque les 7%) mais reste toujours acceptable pour les prévisions non critiques des phénomènes météorologiques. Dans cette méthode, il faut toujours prendre en compte le signe de la vitesse radiale (c.à.d. le sens du déplacement des cibles) avant de la mise en œuvre d'un certain calibrage. En effet, l'estimateur proposé est très sensible au sens du vecteur vitesse radiale Doppler, ce qui nous a poussé d'introduire une petite correction à ce problème, qui a consisté principalement à l'adapter pour tout changement du sens de déplacement des cibles.

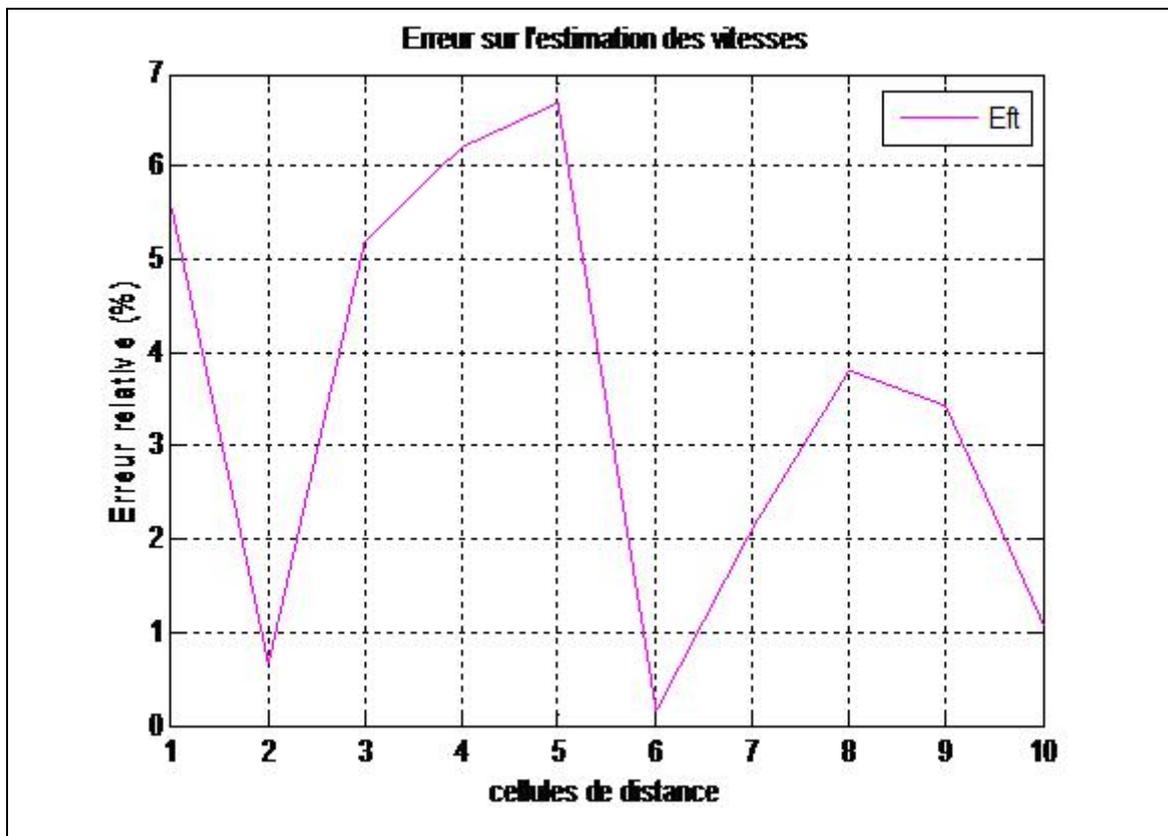


Fig V.15: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par la méthode de Fourier

Pour les fluctuations des vitesses Doppler détectées, la variance et la largeur spectrale suffisent pour les décrire. Dans cette méthode, on constate une vaste étendue du moment d'ordre 2 (variance et largeur spectrale) qui s'étend à environ (34m/s). Cette mesure est très importante en la comparant à celle délivrée dans le domaine temporelle par la méthode Pulse Pair.

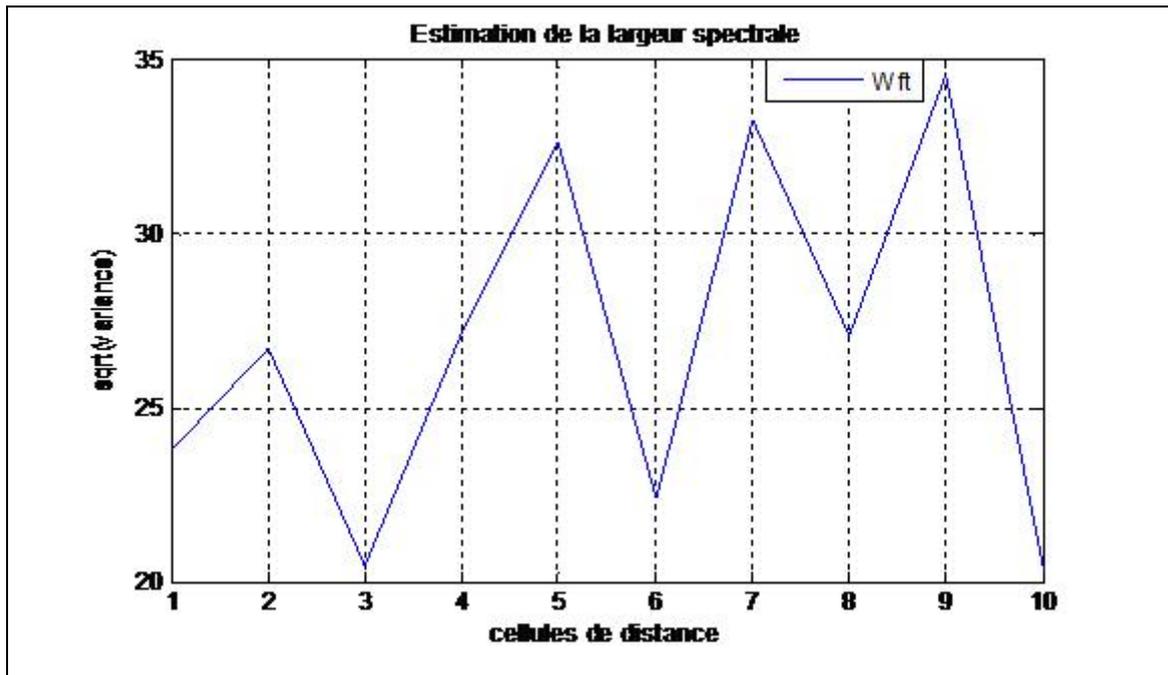


Fig V.16: Estimation de la largeur spectrale par la méthode de Fourier

### V.6.3 Résultats de la méthode autorégressive AR:

Comme on l'a déjà cité dans la section précédente, l'estimation autorégressive AR n'est pas une méthode de calcul directe comme on l'a constaté pour les méthodes précédentes. Par contre, elle sert à trouver un modèle AR approché pour entamer ces différentes estimations. Et à cet effet, on constate une restriction notable de ses estimations. C'est ce qui est montré clairement par la figure (V.18) signalant une erreur relative atteignant les (12%) qui n'est pas vraiment tolérable.

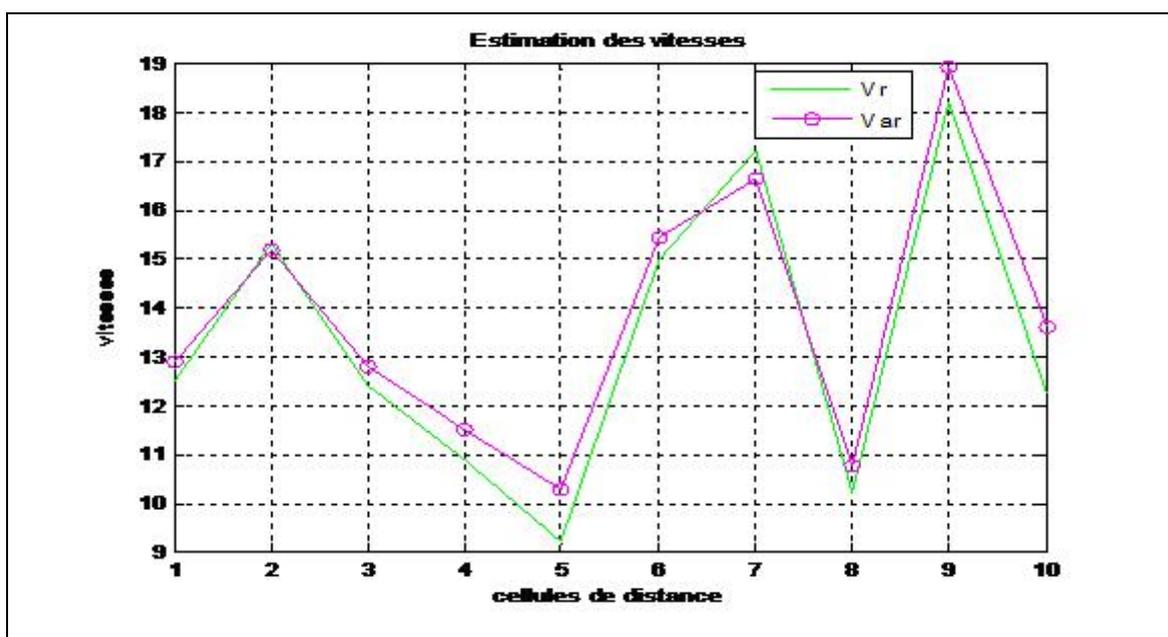


Fig V.17: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode autorégressive

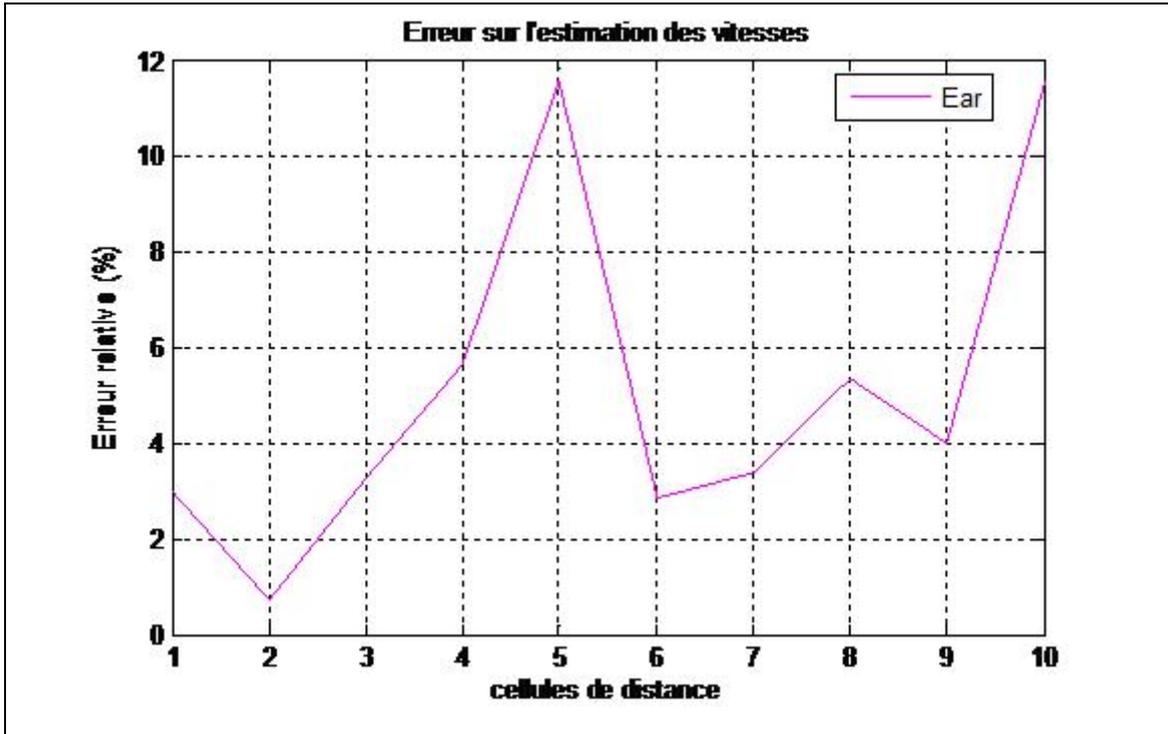


Fig V.18: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par la méthode AR

Par contre, l'estimation AR est attachée de fortes fluctuations des valeurs de la variance et de la largeur spectrale entre deux cellules successives. Par exemple, la largeur spectrale s'étend jusqu'à environ de (36m/s). Ses performances seront bénéfiques si et seulement si la détection de plusieurs phénomènes météorologiques distinctes est désirée. Dans le cas contraire, cette méthode est déconseillée.

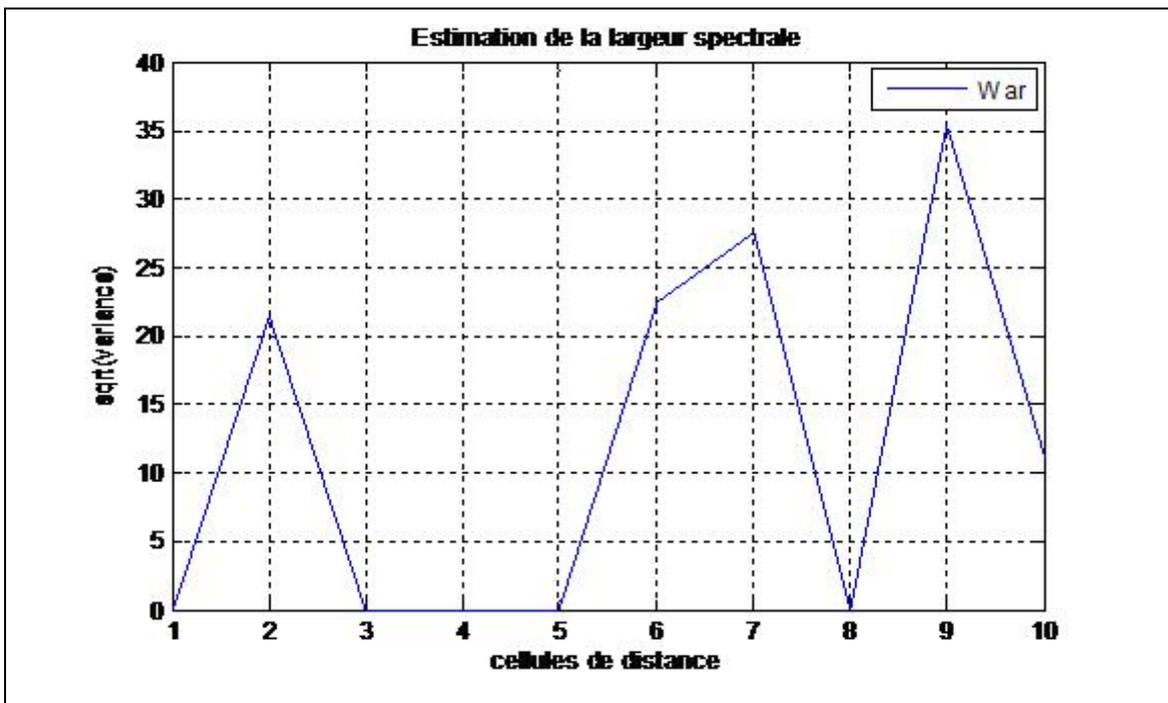


Fig V.19: Estimation de la largeur spectrale par la méthode AR

## V.6.4 Résultats de la méthode des ondelettes:

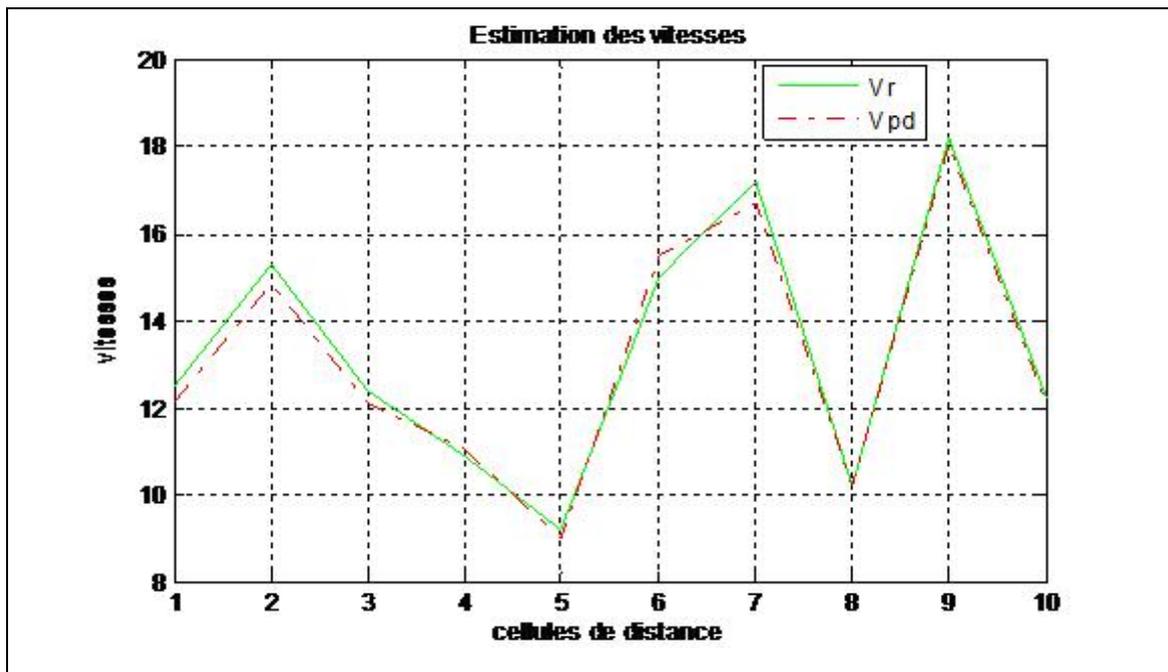


Fig V.20: Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode des ondelettes

Dans cette méthode dont la localisation est assurée dans les deux domaines (temporel et fréquentiel), un débruitage des séries complexes ( $I&Q$ ) est assuré via la théorie des ondelettes, puis une ré-estimation par la méthode Pulse Pair est accomplie. Les résultats obtenus montrent que cette méthode est la plus performante de celles utilisées, et même à la Pulse Pair qui est déjà de haute performance. La figure ci-dessous est un meilleur témoignage de tous ce qu'on a dit.

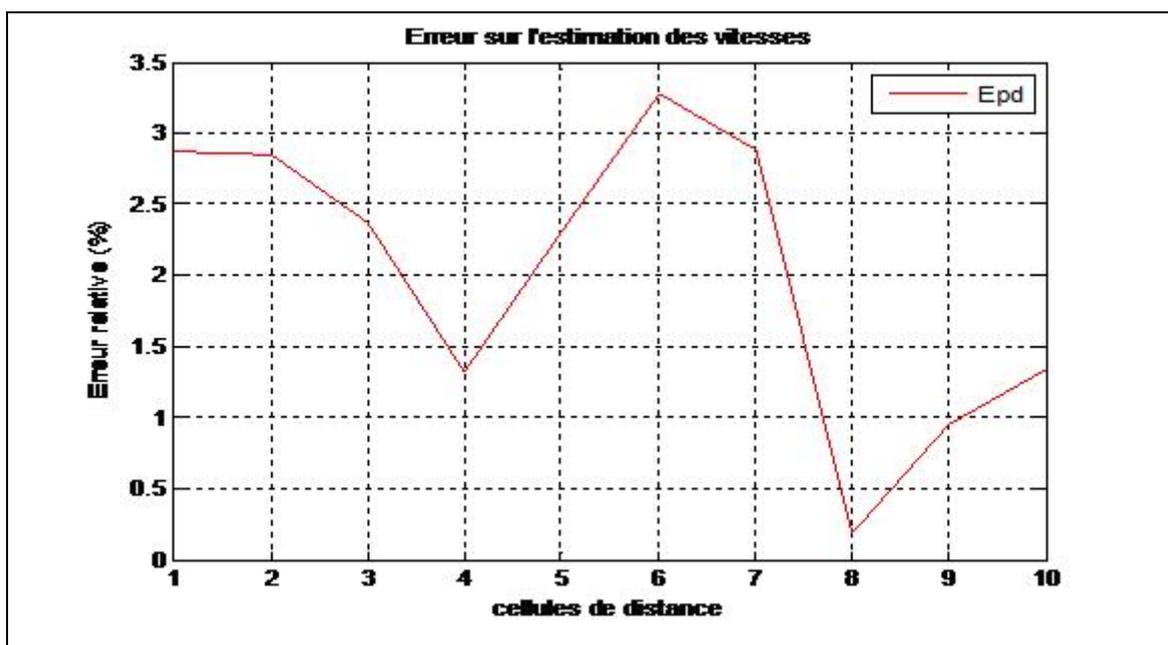


Fig V.21: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par les ondelettes

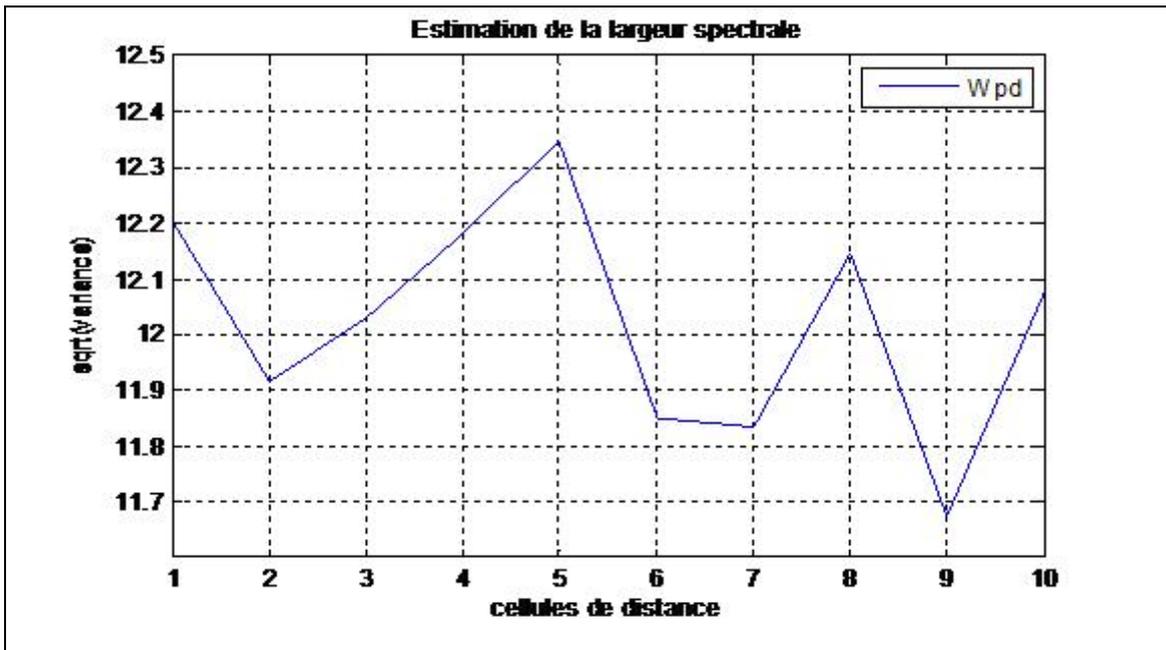


Fig V.22: Estimation de la largeur spectrale par la méthode des ondelettes

La variance et la largeur spectrale auront de meilleurs estimés via cette méthode. En effet, et comme montré dans la figure ci-dessus, la largeur spectrale varie seulement entre (11.68 m/s) et (12.35 m/s), soit une variation d'environ (0.67 m/s). Les performances accrues de cette méthode, la rendent très utile et très importante pour la détection de certains phénomènes météorologiques biens précis et de caractéristiques bien restreintes.

**V.6.5 Comparaison de différentes méthodes utilisées:**

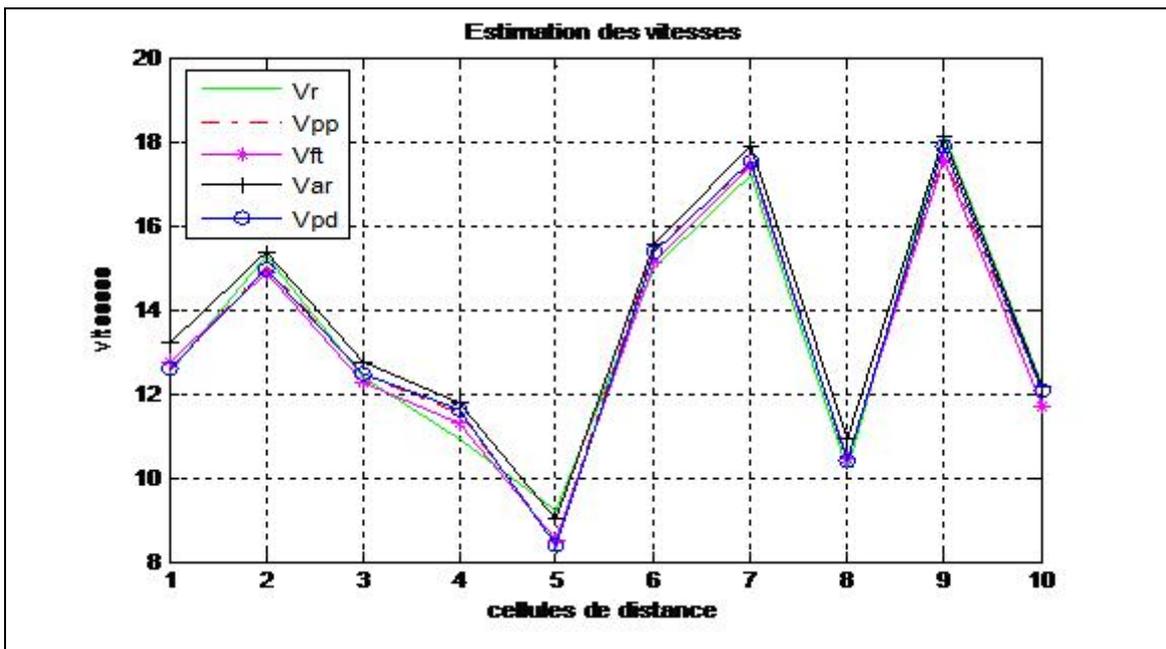


Fig V.23: Comparaison des différents estimateurs de la vitesse moyenne Doppler

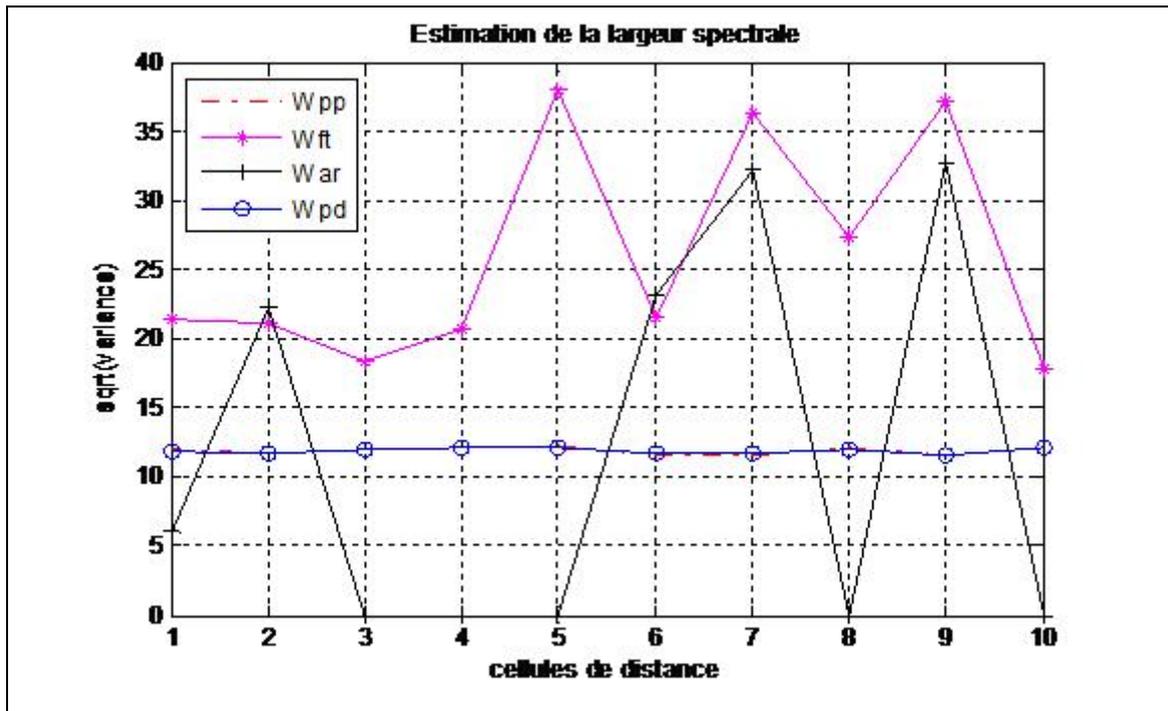


Fig V.24: Comparaison des différents estimateurs de la largeur spectrale

Comme on a discuté sur les performances de chaque estimateur indépendamment des autres, on a constaté que chacun d'eux peut avoir une utilisation spécifique convenable à ses caractéristiques. Et comme nous sommes intéressés par la météorologie aéronautique qui se base sur la prévision et la détection de certains phénomènes bien précis, on se conseille toujours d'opter pour les méthodes qui donnent des résultats fins tels que la méthode Pulse Pair et celle des ondelettes qui sont plus appropriées par rapport à celles de Fourier et la pire autorégressive AR; attachées d'erreurs intolérables le long de leurs estimations. De nouvelles techniques sont apparues pour ré-améliorer ces estimateurs qui sont déjà performants. Parmi les plus importantes, on cite *la méthode des ondelettes à seuils adaptatifs*, qui sera l'objet de simulation de cette prochaine section.

#### V.6.6 Simulation par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif:

Pour tout mécanisme de détection dans le traitement de signal, le choix d'un seuillage révèle d'une très grande importance. Généralement, les seuils jadis utilisés sont à valeurs fixes, ce qui induit temps en temps à la dégradation des performances de ces systèmes, à cause des fluctuations des niveaux du signal et ceux du bruit pour le même support. Et à cet effet, qu'a apparu de nouveaux seuils qui s'adaptent aux fluctuations et aux changements du niveau du signal; c'est *le seuillage adaptatif*.

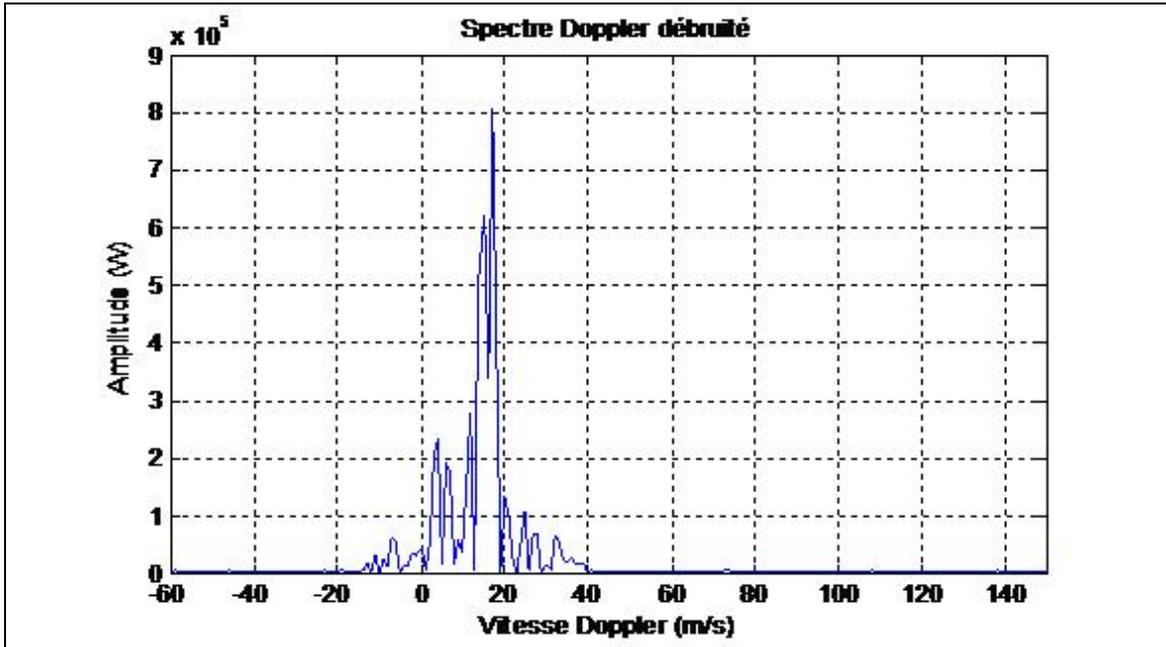


Fig V.25: Estimation de la densité spectrale de puissance par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif.

La densité spectrale de puissance du signal Radar rétrodiffusé après son débruitage via la méthode des ondelettes à seuil adaptatif, montre bien son allure Gaussienne déjà supposée dans son programme de génération. Un résultat qui montre une importante amélioration par rapport au signal original pour les mêmes paramètres d'entrée. Ainsi, l'estimation de la vitesse radiale moyenne obéit à une très forte précision en terme de l'erreur relative comme le montre la figure (Fig V.27).

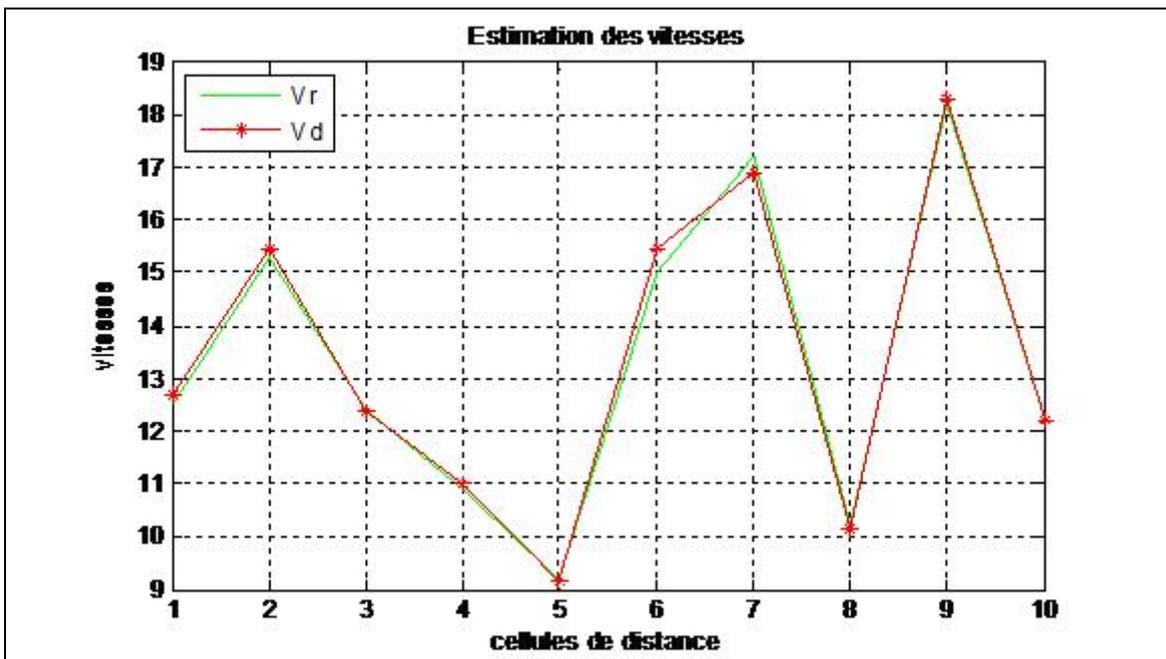


Fig V.26 Estimation de la vitesse Doppler moyenne par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif.

En effet, l'erreur commise sur l'estimation de la vitesse Doppler moyenne est globalement inférieure à (2%), affirmant ainsi l'excellence performance de cette technique.

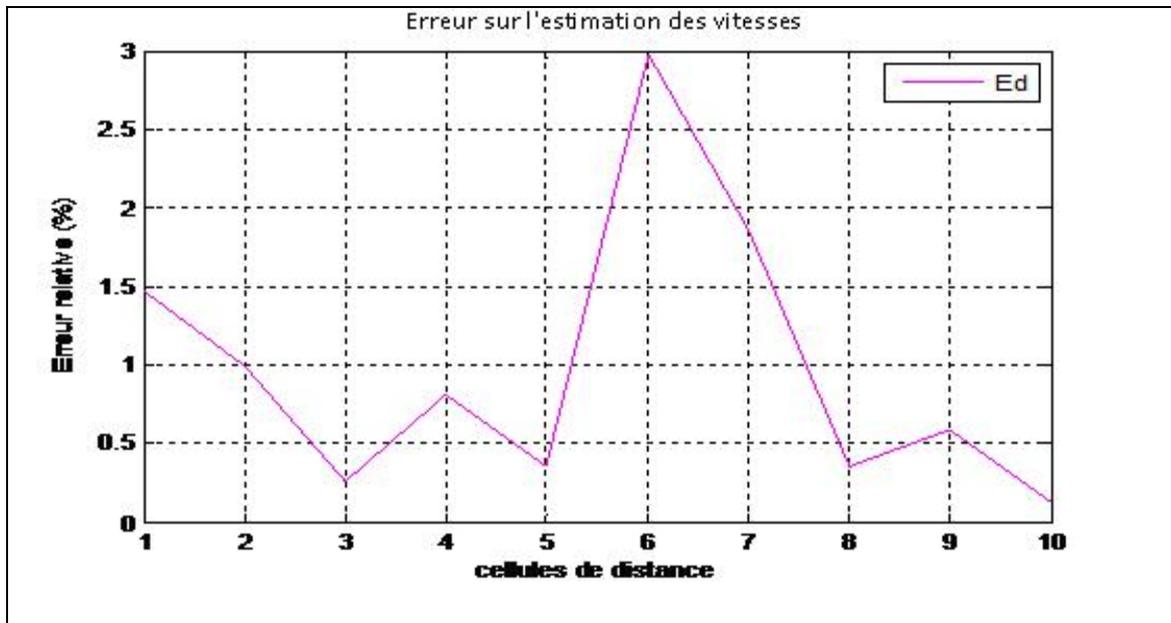


Fig V.27: Erreur commise sur l'estimation des vitesses par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif.

L'estimation de la largeur spectrale via cette méthode a connu une distribution un peu dispersée par rapport à celle des ondelettes à seuils fixes, ce qui permet de mettre en œuvre la possibilité de détecter plus d'un phénomène critique et avec une très haute précision.

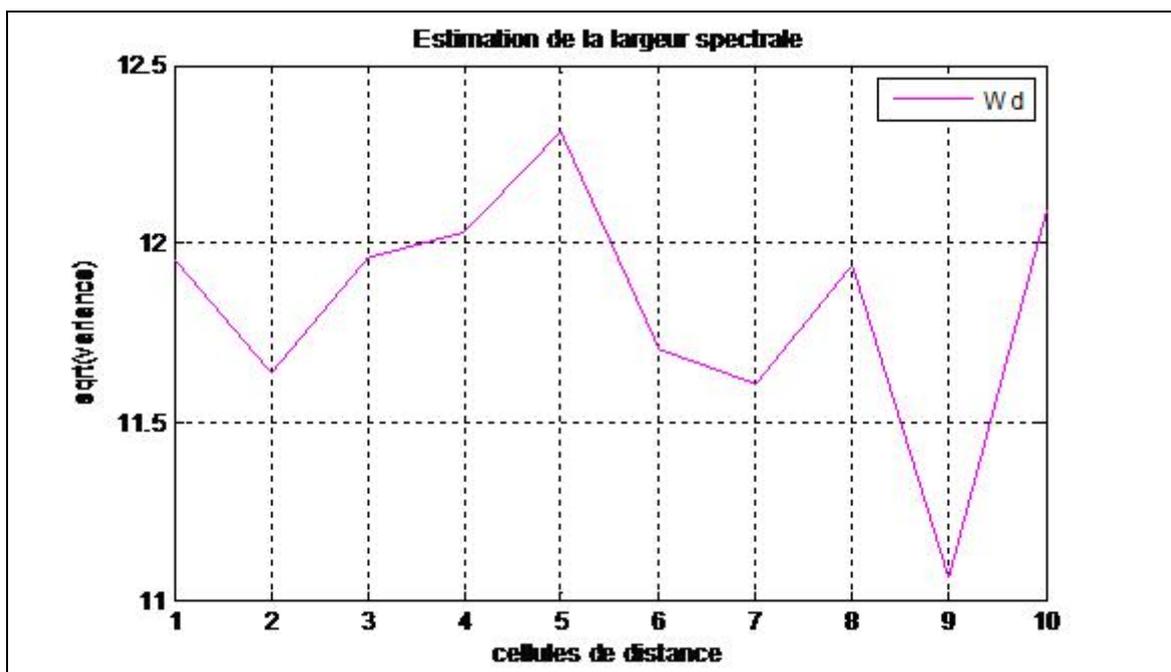


Fig V.28 Estimation de la largeur spectrale par la méthode des ondelettes à seuil adaptatif.

### V.7 Conclusion:

Dans le présent chapitre, on a pu englober d'une manière générale les différents résultats de simulation. Dans un premier temps, et vue la difficulté d'avoir des données Radar réelles, on a recours à leur génération tout en utilisant l'algorithme posé par D.Zrnič (1975) et qui permet de générer les signaux de base ( $I$  &  $Q$ ). Dans un second lieu, des simulations des différentes méthodes d'estimation de la vitesse moyenne Doppler, sa variance ainsi que sa largeur spectrale, ont été mises en application grâce aux différents algorithmes que ce soient basés dans le domaine temporel (Pulse Pair), fréquentiel (Fourier et AR) ou les deux en même temps (analyse multi-résolution ou méthode des ondelettes). On a constaté d'après les résultats obtenus, la convergence de toutes ces méthodes mais avec des taux d'erreurs légèrement différents. La méthode temporelle de Pulse Pair ainsi que celle des ondelettes offrent les résultats les plus performants en termes du tau d'erreur sur l'estimation de la vitesse moyenne, et de faibles variations de la largeur spectrale, ce qui implique le caractère peu sensible de ces deux méthodes aux bruits contrairement aux estimateurs fréquentiels qui sont plus sensibles aux différents types de bruit (internes ou externes). Finalement, et comme amélioration à la méthode des ondelettes déjà considérée comme le meilleur estimateur, la notion du seuillage adaptatif fût introduite, et conduisant à de plus performantes estimations prévues. Et comme conclusion, on a constaté que chacun de ces estimateurs a sa propre utilisation dans le domaine de détection Radar, selon que l'application dont le Radar est destiné, l'exige (détection large de plusieurs perturbations météorologiques, détection restreinte de phénomènes météorologiques concernant une détection bien visée de certains phénomènes, ...etc.).

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Au cours de notre prétraitement de la météorologie aéronautique le long de ce petit travail, on a fait recours aux dernières technologies Radar en vue d'améliorer la sécurité aérienne par des prévisions météorologiques aussi exactes que possible. Notre outil par excellence fut le Radar terrestre Pulse Doppler (WSR-88D).

Après une brève description de notre atmosphère et les phénomènes météorologiques associés, une étude globale est établie sur les systèmes Radar en général et les Radars Météorologiques en particulier, ainsi que sur le développement et le fonctionnement de ces derniers; allant du Radar classique à impulsions jusqu'à ceux fondés sur de nouvelles technologies; notamment celles Doppler.

L'objectif primaire de notre présent travail était, d'étudier les voies et moyens menant à l'estimation de la vitesse radiale moyenne  $\hat{v}$  ainsi que la largeur  $\hat{\sigma}_v$  du spectre des vitesses de déplacement d'une perturbation météorologique détectée, dans le but d'avertir les aéronefs d'une éventuelle perturbation pouvant engendrer des catastrophes aériennes.

À cet effet, plusieurs algorithmes ont été proposés. Certains d'eux sont déjà opérationnels tels que: Pulse Pair (dans le domaine temporel) et Fourier (dans le domaine fréquentiel). D'autres demeurent jusque là, à l'état de proposition, à savoir: le modèle AR, le modèle ARMA, le modèle Ramanujan-Fourier (les deux derniers étant proposés par 'M.LAGHA' dans le domaine fréquentiel) [37].

À propos de ce travail, on a utilisé les trois premiers estimateurs cités ci-dessus, et on a constaté quelques différences concernant la fiabilité de chacun d'eux. En effet, celui de Pulse Pair apparait le plus performant, un critère qui se manifeste par un gain en temps d'exécution et en espace mémoire grâce à l'exploitation directe des séries temporelles ( $I$  &  $Q$ ) ainsi que l'utilisation d'un simple calcul de leur fonction d'autocorrélation (à retard  $n=1$  ou  $n=2$ ) dans l'estimation des différents paramètres du spectre Doppler de la perturbation détectée (vitesse et largeur spectrale).

En contrepartie, l'estimateur Fourier, et en se fondant sur le calcul de la TFD des séries ( $I$  &  $Q$ ), une opération qui demande  $N(N-1)$  additions complexes et  $N^2$  multiplications complexes, et donc un temps de calcul

et d'espaces mémoires très importants, rend son utilisation un peu restreinte surtout dans les situations critiques telles que les opérations d'atterrissage et du décollage. Les mêmes inconvénients peuvent être assignés à l'estimateur AR. En effet, ce dernier étant lui-même une estimation d'un modèle AR avec ses différents paramètres, nécessite un temps d'exécution et de mémoires plus importantes, et donc des installations plus complexes et très coûteuses.

Une alternative à ces estimateurs classiques est celle de la théorie des ondelettes qu'on a développé dans le quatrième chapitre. Une théorie qui est basée principalement sur le débruitage du signal reçu tout en utilisant des seuils bien déterminés en premier lieu, puis ré-estimer les différents paramètres en utilisant l'algorithme de Pulse Pair déjà considéré tout seul comme un très bon estimateur. Et avec l'utilisation de seuils adaptatifs aux variations du signal à débruiter, la méthode précédente est renommée par la théorie des ondelettes à seuillage adaptatif, qu'offre de bien meilleures performances d'estimation.

Et comme la variation du seuil adaptatif est un peu lente par rapport à celles du signal traité, une proposition de perfectionner et de ré-améliorer la théorie des ondelettes à seuillage adaptatif est, d'utiliser des seuils qui s'adaptent très sensiblement aux fluctuations des signaux à débruiter. Un dilemme qui peut être l'objet de futures recherches dans ce domaine.

**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

---

- [1]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire\\_du\\_radar](http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_du_radar).
- [2]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_météorologique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_météorologique).
- [3]: Mario Montopoli & Frank S. Marzano; Meteorological Radar Systems (Support de cours; chapitre I.2).
- [4]: Turkish State Meteorological Service (12-16/09/2005); Training course on Weather Radar Systems (Module C: Processing Basics in Doppler Weather Radars).
- [5]: Environmental Science Activities for the 21<sup>st</sup> Century (ESA21); The Atmosphere.  
[http://esa21.kennesaw.edu/activities/atmosphere/atms\\_intro.pdf](http://esa21.kennesaw.edu/activities/atmosphere/atms_intro.pdf)
- [6]: M.RENAUDIN (Mars 1991); Météorologie; CÉPADUÈS éditions, Toulouse.
- [7]: L'atmosphère: structure et mouvement (chapitre2).  
[www.geographiedijon.fr/IMG/pdf/Chapitre02\\_part1.pdf](http://www.geographiedijon.fr/IMG/pdf/Chapitre02_part1.pdf)
- [8]: The Atmosphere (Introduction). [http://uccpbank.k12hsn.org/courses/APEnvironmentalScience/course\\_files/readings/2d\\_Atmosphere.pdf](http://uccpbank.k12hsn.org/courses/APEnvironmentalScience/course_files/readings/2d_Atmosphere.pdf)
- [9]: S.COCU; Activité documentaire: les couches atmosphériques.  
[http://ecl.ac-orleans-tours.fr/clg-marcel-proust-illiers-combray/cours\\_physique\\_chimie.pdf/documents/atmosphere\\_terrestre.pdf](http://ecl.ac-orleans-tours.fr/clg-marcel-proust-illiers-combray/cours_physique_chimie.pdf/documents/atmosphere_terrestre.pdf)
- [10]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosphère\\_terrestre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosphère_terrestre).
- [11]: Météorologie; brevet d'initiation aéronautique. <http://www.helico.org/IMG/pdf/Meteorologie-V2.pdf>
- [12]: [http://pages.infinit.net/nau/atmosphere\\_standard.pdf](http://pages.infinit.net/nau/atmosphere_standard.pdf)
- [13]: The International Standard Atmosphere (ISA); Mustafa CAVCAR, Anadolu University, Turkey. <http://home.anadolu.edu.tr/~mcavcar/common/ISAweb.pdf>
- [14]: Martin AUBE (Mai 2002); Initiation à la télédétection et à la modélisation de l'atmosphère (Support de cours).
- [15]: Etude documentaire; atmosphère terrestre.  
<http://ecl.ac-orleanstours.fr/clg-marcel-proust-illiers-combray/coursphysique/chimie.pdf/documents/atmosphereterrestre.pdf>
- [16]: Jean-Baptiste Lamarck (2001), Article Météorologie, Volume20, p451-477; Unité Mixte de Recherche CNRS / Cité des sciences et de l'industrie, Paris.
- [17]: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Météorologie>
- [18]: Météorologie.  
<http://www.aero-training.fr/datas/pdf/050 Meteorologie.pdf>

- [19]: Jean-Michel Hervieu (2010); METEOROLOGIE;  
<http://www.ctrbpl.org/documents/ctrinfo/meteo.pdf>
- [20]: tornade. <http://www.ticedu.uqam.ca/pub/Travaux/MG/EPEP/Aut08/Gr20/AFPE3650-20-8/tornade.pdf>
- [21]: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cisaillement>
- [22]: Le cisaillement de vent, <http://www.jeehell.org/cisaillements.pdf>
- [23]: Khaled ZERROUKI; instructeur en météorologie (septembre 2008), Cours de météorologie aéronautique adapté à la formation des personnels d'exploitation de la navigation aérienne.
- [24]: La turbulence. [http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/alaune/fiche\\_turbulence.pdf](http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/alaune/fiche_turbulence.pdf)
- [25]: S.MEGUELATI ; support de cours Radar, 5<sup>ème</sup> année Installation (DAB\_2009/2010).
- [26]: G.DELOM, Radar/Aspects théoriques, ENAC (1976).
- [27]: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-Doppler\\_radar](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-Doppler_radar)
- [28]: Jean-François RÉCOCHÉ; Radars et effet Doppler, Dossier thématique n°5.
- [29]: MERRILL I. SKOLNIK, MC-GRAW: "Radar Handbook", second édition, 1990.
- [30]: MERRILL I. SKOLNIK:"Introduction to Radar System", second edition, 1981.
- [31]: RICHARD J. DOVIK; DUSAN S. ZRNIC; DALE S. SIRMANS (1979) Doppler Weather Radar.
- [32]: Met Office National Meteorological Library and Archive, Fact Sheet N°15: Weather Radar, July 2007.
- [33]: L. Delobbe (2006); Estimation des précipitations à l'aide d'un Radar météorologique.[http://www.meteo.be/meteo/download/en/520471/pdf/rmi\\_scpub-1149.pdf](http://www.meteo.be/meteo/download/en/520471/pdf/rmi_scpub-1149.pdf)
- [34]: Mohand LAGHA – Messaoud BENSEBTI; Estimation du Spectre Doppler par la Transformée de Ramanujan Fourier (Publication).
- [35]: F.KADIC; Support de cours Statistiques, Master1\_CNS/ATM; DAB\_2011.
- [36]: 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.
- [37]: Mohamed TIKHMIRINE (DAB\_2009); Estimation des spectres Radar Doppler par la méthode des ondelettes (Thèse de Magister).

- [38]: Mohand LAGHA – Messaoud BENSEBTI; Performance Comparison of Pulse Pair and 2-Step Prediction Approach to the Doppler Estimation
- [39]: Mohand LAGHA (DAB\_2008); Estimation des propriétés dynamiques d'un signal Radar par l'utilisation des méthodes spectrales (Thèse Doctorat).
- [40]: Yves Meyer, Stéphane Jaffard et Olivier Rioul; L'analyse par ondelettes; pour la science, Septembre 1987. (journal)
- [41]: Tarik ALANI (Département Informatique, ESIEE-Paris); Introduction aux ondelettes (Support de cours\_2011).
- [42]: Marie Farge, Kai Schneider, Olivier Pannekoucke and Romain Nguyen van yen; (15 Décembre 2010); Multiscale Representations: fractals, self-similar random processes and wavelets.
- [43]: Demaeyer Jonathan, Bebronne Michael et Forthomme Sébastien; LES ONDELETTES; Printemps des sciences (2003).
- [44]: Christophe BERNARD; Ondelettes et problèmes mal posés : la mesure du flot optique et l'interpolation irrégulière (Thèse de doctorat encadrée par Stéphane Mallat).
- [45]: M. Lagha, M. Tikhemirine, S. Bergheul, T. Rezoug, M. Bettayeb; Performance comparison of pulse-pair and wavelets methods for the pulse Doppler weather radar spectrum (January 27, 2012).
- [46]: [www.tsi.telecom-paristech.fr/pages/enseignement/ressources/beti/donoho/BasesAdaptees/MeilleureBase.html](http://www.tsi.telecom-paristech.fr/pages/enseignement/ressources/beti/donoho/BasesAdaptees/MeilleureBase.html)
- [47]: S. Grace Chang, Bin Yu et Martin Vetterli; Adaptive Wavelet Thresholding for Image Denoising and Compression; IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 9, NO. 9, SEPTEMBER 2000.
- [48]: B. Ismail, Anjum Khan; Image De-noising with a New Threshold Value Using Wavelets; Journal of Data Science 10(2012), 259-270.
- [49]: Z-E. BAARIR, A. OUAFI; Etude de la transformée en ondelettes dans la compression d'images fixes; Courrier du Savoir – N°05, Juin 2004, pp.69-74.
- [50]: Mohand LAGHA (DAB\_2008); Estimation de la vitesse moyenne et de la variance d'un cisaillement de vent à basse altitude via des méthodes spectrales (Thèse Magister).

# **ANNEXES**

---

L'équation du Radar traduit l'influence des phénomènes physiques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde, et jusqu'à la réception du signal réfléchi, et elle s'établit selon l'enchaînement suivant [4][31][33]:

- ☒ Le Radar émet une puissance totale  $P_t$  à l'aide d'une antenne de gain  $G$

$$P_{émise} = P_t \cdot G \quad (\text{A.1})$$

- ☒ L'antenne du Radar étant isotrope, la densité de puissance incidente au niveau de la cible située à une distance  $R$  du Radar est:

$$P_i = \frac{P_{émise}}{4\pi R^2} \quad (\text{A.2})$$

- ☒ La puissance totale captée par la cible, représentée par sa surface équivalente Radar (SER)  $\sigma$  est donnée par:

$$P_{cible} = P_i \cdot \sigma \quad (\text{A.3})$$

- ☒ Cette puissance étant réfléchié omni-directionnellement, la densité de puissance au niveau du Radar est:

$$P_i' = \frac{P_{cible}}{4\pi R^2} \quad (\text{A.4})$$

- ☒ La puissance totale captée par le Radar représenté par sa surface équivalente  $A_e$  tel que  $A_e = G \cdot \lambda^2 / 4\pi$ , est donnée par:

$$P_r = P_i' \cdot A_e \quad (\text{A.5})$$

- ☒ La combinaison des équations (A.1) à (A.5) aboutit à l'équation finale du Radar, qui est la suivante:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \Rightarrow R = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 P_r}} \quad (\text{A.6})$$

- ☒ Pour une portée maximale du Radar  $R_{\max}$  correspond la puissance minimale détectable par le récepteur  $S_{\min}$ , et l'équation (A.6) devient:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}}} \quad (\text{A.7})$$

En tenant compte des différentes pertes de propagation  $L_s$ , et du bruit à la réception  $P_b$  qui est en général d'origine thermique causant une dégradation du signal entrant dans l'étage récepteur et évaluée par un facteur de bruit  $F$  l'équation du Radar peut être réécrite dans sa version finale, en terminant d'abord la formulation de ces dernières équations qui sont comme suit:

- ☒ La puissance du bruit thermique en fonction de la largeur de bande  $B$  de la constante de Boltzmann  $K$ , et la température ambiante  $T_0 = 293K$

$$P_b = N = K \cdot B \cdot T_0 \quad (\text{A.8})$$

- ☒ Le facteur de bruit en fonction des signaux et des bruits à l'entrée et à la sortie du récepteur  $S_i, N_i, S_o$  et  $N_o$ .

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \Rightarrow \frac{S_i}{N_i} = F \cdot \frac{S_o}{N_o} \quad (\text{A.9})$$

- ☒ Par une synthèse des équations (A.7) à (A.9), la version finale de l'équation Radar à impulsions conventionnel sera la suivante:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot K \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot L_s \cdot \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{\min}}} \quad (\text{A.10})$$

- ☒ Pour un Radar Météorologique l'équation (A.6) peut se réécrire par [4]:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sum \sigma_i \quad (\text{A.11})$$

- ☒ La somme s'effectue sur le volume à partir duquel la puissance est reçue simultanément. Si les cibles sont uniformément distribuées, alors:

$$\sum \sigma_i = \eta \cdot Volume \quad (\text{A.12})$$

$\eta$  est la surface équivalente Radar par unité de volume. Le volume dont il s'agit est comme montré dans la figure (II.3).

$$Volume = \pi \cdot \left(\frac{R \cdot \theta_{az}}{2}\right) \cdot \left(\frac{R \cdot \theta_{site}}{2}\right) \cdot \left(\frac{C \cdot \tau}{2}\right) = \frac{\pi \cdot C \cdot \tau \cdot R^2 \cdot \theta_{az} \cdot \theta_{site}}{8} \quad (\text{A.13})$$

- ☒ La quantité d'eau contenue dans un volume de détection est décrite par un facteur très significatif; la *réflectivité équivalente Radar*  $Z_e$ , qui est reliée à  $\eta$  par la relation suivante ( $K$  est l'indice de réfraction complexe):

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z_e \quad (\text{A.14})$$

- ☒ En substituant les équations (A.13) et (A.14) dans l'équation (A.12), puis cette dernière dans l'équation (A.11), et en se mettant sur l'hypothèse stipulant la distribution Gaussienne du faisceau Radar, une correction de  $[1/2 \ln(2)]$  est ajouté, et l'équation finale du Radar Météorologique sera comme suit:

$$P_r = \underbrace{\frac{\pi^3 C}{1024 \ln 2}}_{\text{Constan tes}} \cdot \underbrace{\frac{P_t \cdot \tau \cdot G^2 \theta_{az} \theta_{site}}{\lambda^2} L_s}_{\text{Radar}} \cdot \underbrace{\frac{|K|^2 \cdot Z_e}{R^2}}_{\text{Cible}} \quad (\text{A.15})$$

Soit  $e(t)$  un signal émis en direction d'une cible située à une distance initiale  $d_0$  de la source d'émission se rapprochant radialement à la vitesse  $V_r$ .

La distance dont se situe cette cible est alors:

$$d(t) = d_0 - V_r t = C \frac{T_0}{2} \Rightarrow T_0 = -\frac{2 \cdot V_r}{C} t + \frac{2 \cdot d_0}{C} = -\frac{2 \cdot V_r}{C} t + \Phi \quad (\text{B.1})$$

Le signal reçu  $s(t)$  est la version atténuée en amplitude, et décalée en temps du signal émis  $e(t)$ , donc il sera de la forme suivante:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(2\pi \cdot f_r \cdot t) = A \cos(2\pi \cdot f_e(t - T_0)) \\ s(t) &= A \cos\left(2\pi \cdot f_e \cdot t + 2\pi \cdot f_e \frac{2 \cdot V_r}{C} t + \Phi'\right) \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Sachant que  $f_d = (f_r - f_e)$ , et  $(C/f_e) = \lambda$ , alors (B.2) peut s'écrire comme:

$$s(t) = A \cos\left(2\pi \left(f_e + \frac{2 \cdot V_r}{\lambda}\right) \cdot t + \Phi'\right) = A \cos(2\pi(f_e + f_d) \cdot t + \Phi') \quad (\text{B.3})$$

De l'équation (B.3), on tire la relation fondamentale décrivant le lien entre la vitesse radiale du mobile et le décalage Doppler du signal.

$$\frac{2 \cdot V_r}{\lambda} = f_d \Rightarrow V_r = \frac{f_d \cdot \lambda}{2} \quad (\text{B.4})$$

La vitesse radiale du mobile est donnée donc par:  $V_r = (f_d \cdot \lambda)/2$ .

L'effet Doppler peut être traduit par un décalage fréquentiel de  $(2 \cdot V_r / \lambda)$  ou par un déphasage de  $(4\pi \cdot d_0 / \lambda)$  entre les signaux émis et reçus.

Quoi que les différentes appellations et classifications des Radars soient inspirées essentiellement des principes de fonctionnement de ceux-ci ou des applications pour lesquelles sont conçus, les fréquences des signaux émis (fréquences Radar) sont d'une importance majeure dans l'affectation de différentes fonctionnalités et tâches appropriées à chaque type du Radar. Et comme tout autre Radar, le Pulse Doppler Météorologique fonctionne dans la gamme des hyperfréquences (fréquences de l'ordre de GHz) tout en exploitant les différentes bandes de fréquence, selon que l'application appropriée les suggère. De ce fait, cinq bandes de fréquences sont principalement définies [4]:

- ❖ **Bande L:** caractérisée par des fréquences variant de 1 à 2 GHz et de longueurs d'ondes comprises entre 15 et 30 cm. Elle est utilisée fréquemment par les Radars Météorologiques destinés aux études des turbulences dans l'air clair.
- ❖ **Bande S:** les fréquences sont comprises dans l'intervalle 2-4 GHz, tandis que les longueurs d'ondes sont définies entre 8 à 15 cm. Les signaux issus de cette bande ne sont pas faciles à atténuer, ce qui rend les Radars s'opérant dans cette bande d'un grand intérêt pour l'observation des phénomènes météorologiques que ce soient à longues ou à courtes distances.
- ❖ **Bande C:** cette bande est définie par une variation de fréquence entre 4 et 8 GHz, et les Radars appropriés s'opèrent à des longueurs d'ondes de 4-8 cm. Le signal émis peut facilement être atténué, ce qui la rend mieux l'utiliser pour les détections à courtes distances. Les antennes y liées sont de faibles dimensions, et donc possibilité de les aéroporter. La bande C ne nécessite pas assez de puissance comme le cas de la bande S.
- ❖ **Bande X:** caractérisée par des longueurs d'ondes de 2.5 à 4 cm, ainsi que de variations de fréquences entre 8 et 12 GHz. Du fait de leurs faibles longueurs d'ondes, les Radars appropriés sont très sensibles, et ne sont utilisés que pour les détections à très courtes distances. Ces Radars sont très exploités comme aéroportés dans les aéronefs pour la détection des turbulences.
- ❖ **Bande K:** les Radars appropriés s'opèrent à des longueurs d'ondes de 0.75 à 1.2 cm ou de 1.7-2.5 cm, correspondant à des fréquences de 27-40 GHz ou 12-18 GHz. Cette bande est similaire à la bande X, mais caractérisée par plus de sensibilité.

La théorie des ondelettes développée récemment, inspire ses origines de l'analyse de Fourier qui revient au début du dix-neuvième siècle (1807). Une chronologie du développement de la représentation fréquentielle est citée rapidement comme suit [41]:

- ☒ 1822: Publication des travaux de Fourier pour l'analyse spectrale.
- ☒ 1946: Analyse de la STFT par Gabor.
- ☒ 1965: Développement d'algorithmes rapides pour le calcul de la TFD par Cooley et Turkey. C'est la transformée de Fourier rapide (FFT).
- ☒ Fin des années 1970: Insuffisance de la STFT pour une bonne résolution temps-fréquence simultanément, stipulée par Morlet. C'est la naissance des ondelettes, mais avec un manque de rigueur mathématique.
- ☒ Début des années 1980: Formalisation de la transformée et la conception de la transformée inverse par Grossman. Ainsi que la redécouverte du travail de Calderon (1964) sur l'analyse harmonique.
- ☒ 1984/1985: Yves Meyer présente la similarité entre les travaux de Morlet et Calderon, la redondance dans le choix des fonctions de base de Morlet et ainsi que l'utilisation de fonctions de base orthogonales d'ondelettes avec une meilleure localisation temporelle et fréquentielle.
- ☒ Redécouverte du travail d'Alfred Haar effectué en 1909, sur les fonctions de base orthogonales.
- ☒ 1986/1987: Unification des travaux disparates par Mallat (analyse multi résolution, transformée discrète, ...etc.).
- ☒ 1988: Mise en œuvre de classe d'ondelettes par Daubechies (compactes, orthogonales, ...etc.), et liberté du choix des fonctions de base au prix de la redondance.
- ☒ 1988/1992: Reconstruction parfaite de signaux en utilisant les banques de filtres FIR (1988) et les banques de filtres multidimensionnels (1992), par Martin Vetterli et Jelena Kovacevic.
- ☒ 1993: Mise en œuvre d'ondelettes biorthogonales compactes par Cohen, Daubechies, J.Feauveau.
- ☒ 1996: Mise en œuvre des paquets d'ondelettes par Coifman.
- ☒ 1993/1999: La poursuite adaptée, Mallat.

Ces ondelettes, le long de leurs développements, ont été bénéfiques pour plusieurs usages, tels que la compression, et le débruitage qui est l'outil utilisé dans ce présent travail.

Un ensemble "V" non nul, est appelé *espace vectoriel sur K* ou *K-espace vectoriel* ( $K = \mathfrak{R}$  ou  $\mathbb{C}$ ), s'il est muni des deux opérations:

$$\begin{aligned} V \times V &\rightarrow V, & (u, v) &\rightarrow u + v \\ K \times V &\rightarrow V, & (\lambda, u) &\rightarrow \lambda u \end{aligned}$$

Un ensemble F est un *sous-espace vectoriel* de V si F est muni de restrictions des lois de V. Il suffit pour cela que F vérifie :

$$\begin{aligned} \forall x \in F, \forall y \in F, x + y &\in F \\ \forall \lambda \in F, \forall x \in F, \lambda \cdot x &\in F \end{aligned}$$

Une *base* V d'un espace vectoriel est un ensemble de vecteurs linéairement indépendants, tel que tout vecteur  $v$  de V peut être écrit comme une combinaison linéaire de ces vecteurs de base. Il peut y avoir plus d'une base pour un espace vectoriel. Cependant, tous ont le même nombre de vecteurs, et ce nombre est connu sous le nom de la dimension de l'espace vectoriel.

Deux vecteurs  $v, w$  sont dits *orthogonaux* si leur produit scalaire est égal à zéro :

$$\langle v, w \rangle = \sum_n v_n \cdot w_n^* = 0$$

Un ensemble de vecteurs  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  est dit *orthonormé*, s'ils sont deux à deux orthogonaux les uns aux autres, et tous ont une longueur de "un". Cela peut être exprimé comme suit:

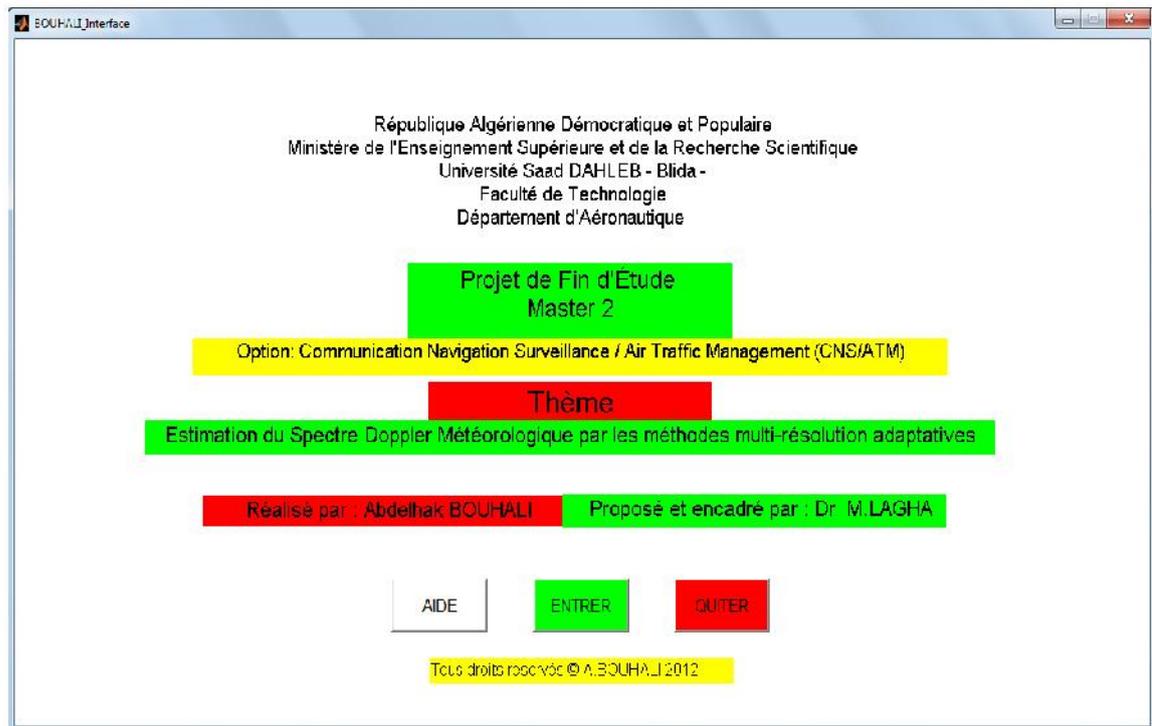
$$\langle v, w \rangle = \delta_{mn}$$

Où  $\delta_{mn} = 0$ , si  $m \neq n$  et  $\delta_{mn} = 1$ , si  $m = n$  est la fonction de Dirac.

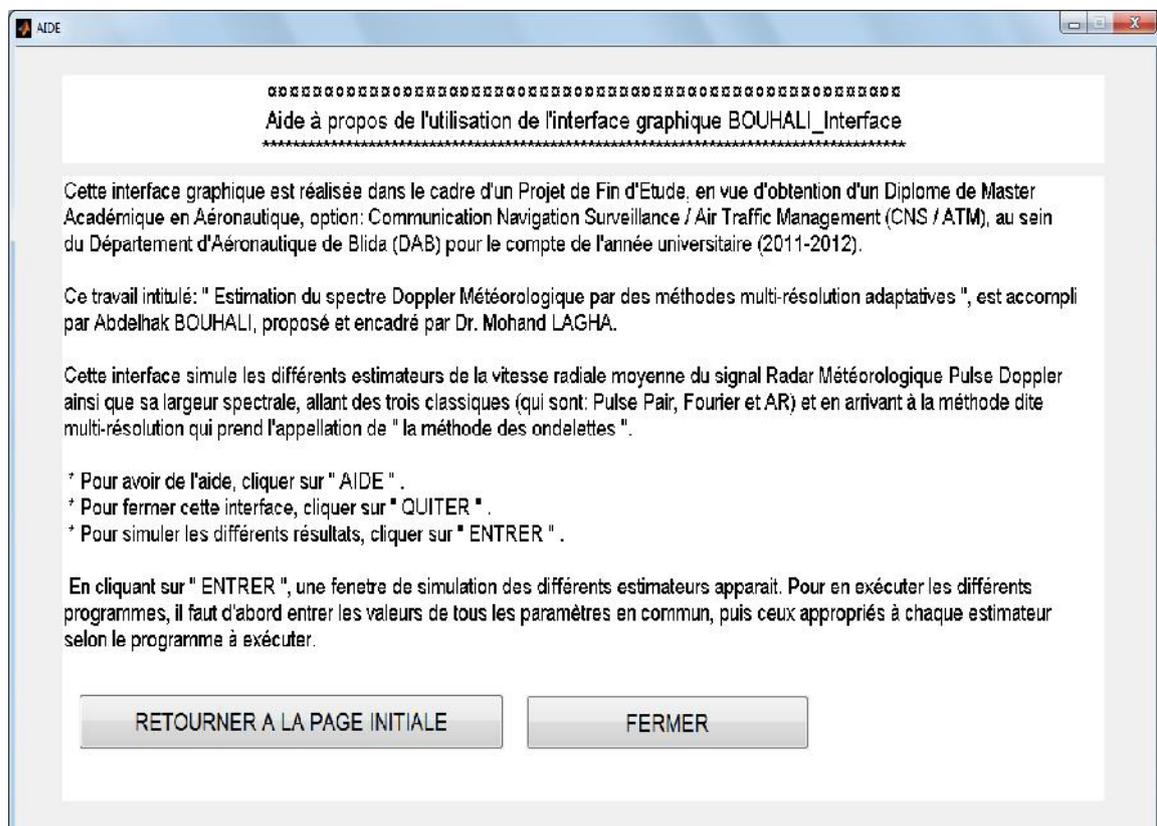
Une alternative aux bases orthonormales, aura lieu lors de leur non disponibilité. Ce sont une version un peu plus généralisée, et prennent l'appellation de *bases biorthogonales*. Le terme "biorthogonales" se réfère à deux bases différentes qui sont orthogonales les unes aux autres, mais chacune ne forme pas un ensemble orthogonal.

**Remarque:** De la même manière, on peut définir les notions d'orthogonalité de deux fonctions, ainsi que l'orthonormalité et la biorthogonalité d'un ensemble de fonctions scalaires.

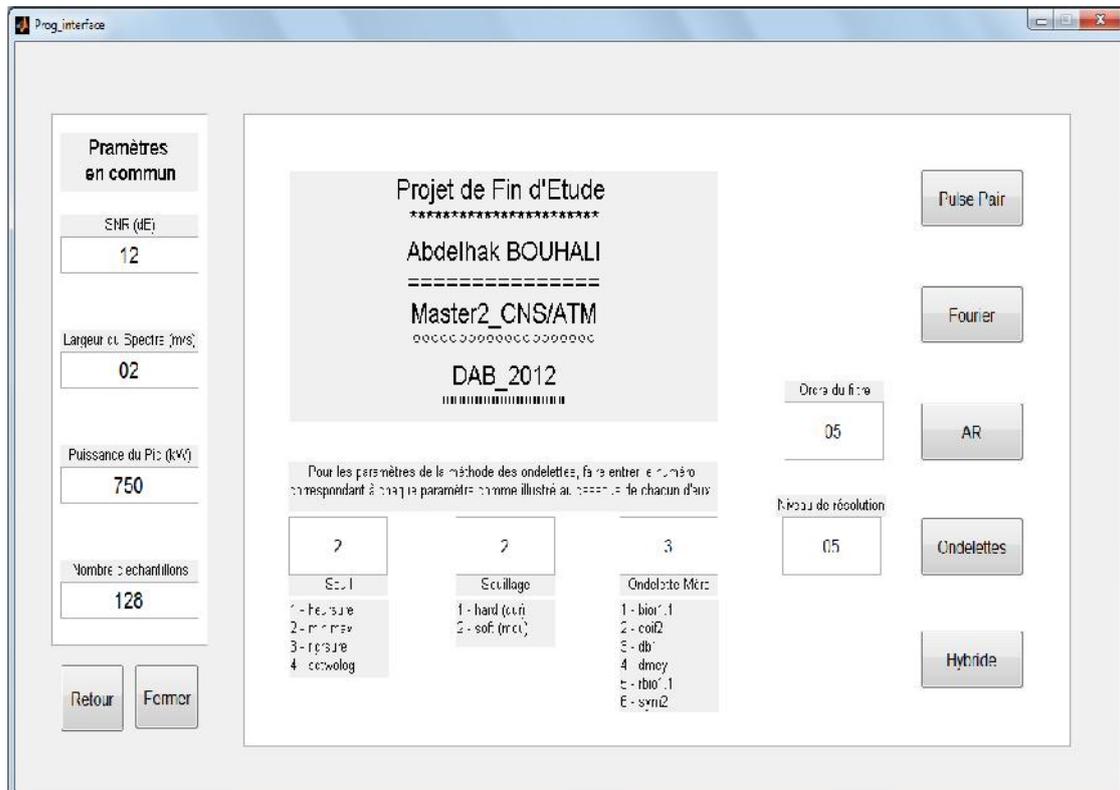
Dans cette interface, on a présenté les informations de base à propos de notre travail.



Pour obtenir plus d'informations à propos de l'utilisation de cette interface, appuyer sur "AIDE".



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



- ❖ En cliquant sur le bouton "Pulse Pair", on aura des figures comme celles de (Fig V.11), (Fig V.12) et (Fig V.13).
- ❖ En cliquant sur le bouton "Fourier", on aura des figures comme celles de (Fig V.14), (Fig V.15) et (Fig V.16).
- ❖ En cliquant sur le bouton "AR", on aura des figures comme celles de (Fig V.17), (Fig V.18) et (Fig V.19).
- ❖ En cliquant sur le bouton "Ondelettes", on aura des figures comme celles de (Fig V.20), (Fig V.21) et (Fig V.22).
- ❖ En cliquant sur le bouton "Hybride", on aura des figures comme celles de (Fig V.23) et (Fig V.24).
- ❖ Cliquer sur le bouton "Retour" → Retour à la page initiale.
- ❖ Tandis que le bouton "Fermer", sert à fermer la page de simulation en particulier, et l'interface graphique en général.