

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Saad Dahlab-Blida 1
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales
Département de Construction Aéronautique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Aéronautique

Spécialité : Avionique



THEME

***Etude et simulation des fonctions de
compression d'impulsion et de filtrage
doppler du radar de surveillance ATCR 33S***

Présenté par :

LEULMI Rayane

HATTEB Nesrine

Encadré par :

Mme : OTMANE Fadhéla

Mr : CHERFA Youcef

Soutenu publiquement le 13/07/2021 devant le jury composé de :

Président : DILMI Smain

MCA

Université de Blida 1

Examineur 1 : KRIM Mohamed

MAB

Université de Blida 1

Examineur 2 : LEBSIR Abdelkadir

MCB

Université de Blida 1

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ مِنْ
تَلْحُمٍ أَكْفَرًا
فَلْيَعْبُدْهُ وَهُوَ
الْعَزِيزُ الرَّحِيمُ
الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ
وَالَّذِي عَلَّمَ الْإِنسَانَ
مَا لَمْ يَكُن لِيَعْلَمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ
مِنْ تَلْحُمٍ أَكْفَرًا
فَلْيَعْبُدْهُ وَهُوَ
الْعَزِيزُ الرَّحِيمُ
الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ
وَالَّذِي عَلَّمَ الْإِنسَانَ
مَا لَمْ يَكُن لِيَعْلَمِ

درویش



.Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH de nous avoir donné la volonté pour préparer ce travail.

Notre gratitude et notre reconnaissance que nous saurions suffisamment exprimer vont d'abord à notre promotrice madame OTMANE Fadhéla qui nous a proposé suivi, dirigé et encouragé pour finir ce travail avec une très grande générosité, qu'il trouve ici l'expression de nos meilleures salutations.

*Nous tenons à remercier notre encadreur monsieur CHERFA Youcef.
Nous tenons à remercier aussi madame BRAHIMI Fadhéla.*

Nos remerciements vont aussi à monsieur BOUKRA Fouad le chef de département technique.



Dédicace

*Avec l'aide d'ALLAH tout puissant on a pu achever ce mémoire.
Je dédie à :*

*Tous ceux qui sont donné toutes les peines et les sacrifices pour me voir
réussir dans la vie.*

*Les deux personnes les plus chères à mon cœur, mon père 'ALLAH yerahmo'
et ma mère, qui m'ont apporté soutien et confort tout au long de mes études.*

Mes frères : Zinedine, Redouane , Yacine, Djamel.

Et toute la famille HATTEB.

Ma cousine : Rania.

Ma chère tante et son mari.

Mes cousins : Redouane et Amir.

Tous mes amis que j'aime et que j'estime sans exception.

Ma chère binôme «Rayane» et sa famille «LEULMI ».

*Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant toutes mes années
d'études.*

Nesrine



Dédicace

Avec l'aide d'ALLAH le tout puissant on a pu achever ce travail que je dédie :

A mon père Layachi qui a attendu avec patience le fruit de sa bonne éducation et m'avoir aidé avec leurs conseils et leur soutien moral. A ma mère Nabila le grand coeur sur la terre, en espérant que dieu leur donne la santé.

A mes tantes Feriel et Aicha qui sont donné toutes les peines et les sacrifices pour me voir réussir dans la vie.

A mes sœurs Ranime, Amani et Aridje.

A mes frères Chamsou ,Abdou ,Bahaa ,Wail et Moncef.

Toute la famille : LEULMI .

A ma chère binôme Nesrine et toute sa famille HATTEB.

*A tous mes amies : Chaima, Karima, Souhila,
Selma, Fatima ,Rawnek, Amina, Sara ,Wafaa*

A tous ceux qui connait et sans oublie mes enseignants qui m'ont soutenu durant toutes mes années d'études.

Rayane

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	I
Dédicace 1.....	II
Dédicace 2.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Résumé.....	XII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités

Introduction	3
I.1. Etablissement National de la Navigation Aérienne : ENNA.....	3
I.1.1. Présentation de l'établissement.....	3
I.1.2. Mission de l'ENNA.....	3
I.1.3. Organisation de l'ENNA	4
I.1.4. Direction d'Exploitation et de la Navigation Aérienne (DENA).....	5
I.1.5. Département technique.....	6
I.2. Radars	6
I.3. Classe de radars	6
I.3.1. Radars secondaires	7
I.3.2. Radars primaires.....	7
I.3.2.1. Radars à onde continu (CW-radar).....	8
I.3.2.2. Radars à impulsions	9
I.4. Utilisation radar en aéronautique	9
I.5. Fréquences radar	11
I.6. Précipitations météorologiques.....	12
I.6.1. Types de précipitations	12
I.6.1.1. Les nuages	12
I.6.1.2. La pluie.....	13
I.6.1.3. La grêle.....	13

I.6.1.4. Le vent	13
I.6.2. Effet des précipitations météorologiques sur la sécurité d'un vol	13
I.6.2.1. Givrage	13
I.6.2.2. Cisaillement du vent	14
I.6.2.3. Exemples de catastrophes aériennes	15
Conclusion.....	16

Chapitre II : Radar ATCR 33S

Introduction	18
II.1. Description du radar ATCR 33S	18
II.2. Composantes du radar ATCR 33S	20
II.2.1. Emetteur	20
II.2.2. Récepteur.....	24
II.2.3. Antenne.....	26
II.2.4. Duplexeur	29
II.2.5. Système d'affichage	29
II.2.6. Processeur du Signal Radar	30
Conclusion.....	31

Chapitre III : Compression d'impulsion et filtrage Doppler

Introduction	33
III.1. Concept de compression d'impulsion	33
III.1.1. Principe	34
III.1.2. Rapport de compression d'impulsion	35
III.1.3. Lobes secondaires temporels.....	35
III.2. Techniques de compression d'impulsions	36
III.2.1. Codage de phase	36
III.2.2. Compression par modulation linéaire de fréquence.....	37
III.2.3. Compression par modulation non-linéaire de fréquence.....	39
III.3. Filtrage Doppler.....	40
III.3.1. Effet doppler	40
III.3.2. Principe du radar pulse doppler.....	41
III.3.3. Forme et spectre des signaux	42

III.3.4. Performances du radar pulse-Doppler	43
III.3.5. Détecteur de phase en sinus et cosinus (I&Q)	45
III.3.6. Filtrage Doppler	47

Chapitre IV : Simulation et résultats

Introduction	49
IV.1. Logiciel MATLAB.....	49
IV.2. Propriété temporelles et spectrales du signal radar LFM	50
IV.3 Traitement en vitesse	52
IV.3.1. Compression d'impulsion	54
IV.3.2. Filtrage Doppler numérique.....	55
Conclusion générale.....	62
Bibliographie.....	63

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Organigramme de l'ENNA.....	5
Figure I.2 : Organigramme de la DENA.....	5
Figure I.3 : Les Différents types du radar.	5
Figure I.4 : Présentation du principe d'un radar primaire.....	6
Figure I.5 : Principe du Radar à onde continue.	9
Figure I.6 : Radar d'approche.	10
Figure I.7 : radar de surface pour contrôler les mouvements à la base aérienne Logan.	10
Figure I.8 : Fonctionnement du radar météorologique.	11
Figure I.9 : Etapes d'accumulation du givrage.	14
Figure II.1 : Diagramme fonctionnel du radar ATCR 33S.	19
Figure II.2 : Diagramme du block de l'émetteur.	21
Figure II.3 : Modèle de transmission.....	22
Figure II.4 : Antenne radar ATCR 33S.	26
Figure II.5 : Diagramme de rayonnement antenne.....	27
Figure II.6 : Masque de couverture radar.	28
Figure II.7 : Exemples de sorties vidéo.	29
Figure II.8 : Structure en blocs du traitement du signal radar.	30
Figure III.1 : Les signaux d'entrée et de sortie d'un étage de compression d'impulsion.	33
Figure III.2: Impulsion classique courte (en bleu) et une impulsion longue transmise avec modulation d'impulsions interne (en vert).	34
Figure III.3 : Vue des lobes secondaires temporels.....	36
Figure III.4 : Schéma d'une modulation de phase.	37
Figure III.5 : Diagramme montre l'addition de la modulation à l'impulsion.	37
Figure III.6 : Ligne SAW.....	38
Figure III.7 : Filtre SAW en expansion et en compression.	39
Figure III.8 : Onde symétrique (par un générateur d'ondes).	40
Figure III.9 : Changement de fréquence dû à l'effet doppler sur une cible en mouvement.....	41
Figure III.10 : Diagramme fonctionnel d'un radar pulse doppler.	42
Figure III.11 : forme du signal d'émission et réception.....	43

Figure III.12 : Spectre d'un train d'impulsions.	43
Figure III.13 : Schéma du circuit du détecteur synchrone.	46
Figure III.14 : Détecteurs synchronisés.	46
Figure IV.1 : Forme du signal LFM.	51
Figure IV.2 : Spectre du signal LFM.	52
Figure IV.3 : Train d'impulsions LFM.	52
Figure IV.4 : Bruit blanc gaussien des chaines radar I et Q.	53
Figure IV.5 : Train d'impulsions LFM bruité.	54
Figure IV.6 : Réponse impulsionnelle du filtre adapté.	54
Figure IV.7 : Sortie du filtre adapté.	55
Figure IV.8 : Spectre doppler en fréquences normalisées.	55
Figure IV.9 : Spectre doppler en vitesse.	56
Figure IV.10 : spectre doppler en vitesse en km/h.	57
Figure IV.11 : spectre doppler avec ambiguïté.	57
Figure IV.12 : Spectre Doppler pour une rafale de 10 impulsions LFM.	58
Figure IV.13 : train d'impulsion LFM noyé dans un bruit (SNR=37 dB).	59
Figure IV.14 : sortie de filtre adapté.	59
Figure IV.15 : spectre doppler en vitesse en km/h.	60
Figure IV.16 : spectre doppler avec résolution de deux vitesses.	61
Figure IV.17 : spectre doppler avec deux vitesses non résolues.	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les principales gammes de fréquences porteuses pour applications radar.....	12
Tableau II.1 : Données Techniques du Radar ATCR 33S.....	20
Tableau II.2 : Fréquence de transmission d'impulsions courtes et longues.	22
Tableau II.3 : Caractéristiques de l'émetteur.	23
Tableau II.4. Caractéristiques du récepteur principal.	25
Tableau II.5 : Paramètres du système.	27
Tableau III.1 : Codes de Barker.	37

LISTE DES ABBREVIATIONS

ACP	Anti-Clutter Processor
AGC	Automatic Gain Control
ADC	Analog to Digital Conversion
ATC	Air Traffic Control
ATCR	Air Traffic Control Radar
A-MTD	Adaptive Moving Target Detection
BITE	Built In Test Equipment
CMS	Control and Monitoring System
COHO	Coherent Oscillator
CPI	Coherent Pulse Interval
CFAR	Constant False Alarm Rate
DET-T	Target Detection Circuit
DET-W	Weather Detection Circuit
DSP	Densité spectrale de puissance
ENNA	Etablissement National de la Navigation Aérienne
FFT	Fast Fourier Transform
FRI	Fréquence de répétition des impulsions
HPA	High Power Amplifier
IF	Intermediate Frequency
IPP	Inter Pulse Period
LRU	Least Replaceable Unit
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair

NM	Nautical Mile
PPI	Plan Position Indicator
PRF	Pulse Repetition Frequency
PSR	Primary Surveillance Radar

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude du radar ATCR 33S disponible à l'Etablissement Nationale de la Navigation Aérienne (ENNA) pour le contrôle du trafic aérien de la zone terminale et des voies aériennes, la détection d'aéronefs non coopératifs et même la prévention météorologique. Le radar ATCR-33S est un radar Doppler pulsé à compression d'impulsions. Les fonctions de compression d'impulsion et de filtrage Doppler sont examinées et simulées en utilisant Logiciel Matlab. Les résultats obtenus explicitent les propriétés temporelles et fréquentielles du signal LFM utilisé par le radar, l'apport du filtrage adapté pour la compression d'impulsion et l'amélioration du rapport signal au bruit (SNR), la mise en œuvre numérique du filtrage Doppler via la transformée de Fourier rapide (FFT). Les effets des paramètres radar sur l'estimation de la vitesse sont également explicités.

Abstract

This work is devoted to the study of the ATCR 33S radar available at the 'Etablissement Nationale de la Navigation Aérienne' (ENNA) for air traffic control of the terminal area and airways, the detection of non-cooperative aircraft and even the weather prevention. The ATCR-33S radar is a pulsed pulse Doppler radar. The functions of pulse compression and Doppler filtering are examined and simulated using Matlab software. The results obtained explain the temporal and frequency properties of the LFM signal used by the radar, the contribution of filtering adapted for pulse compression and the improvement of the signal to noise ratio (SNR), the digital implementation of Doppler filtering. via the fast Fourier transform (FFT). The effects of radar parameters on speed estimation are also explained.

ملخص

تم تخصيص هذا العمل لدراسة رادار ATCR 33S المتاح في المؤسسة الوطنية للملاحة الجوية (ENNA) لمراقبة الحركة الجوية في منطقة المطار والممرات الجوية ، واكتشاف الطائرات غير المتعاونة وحتى الوقاية من الطقس. رادار ATCR-33S هو رادار دوبلر نبضي. يتم فحص ومحاكاة وظائف ضغط النبض وتصفية دوبلر باستخدام برنامج Matlab. توضح النتائج التي تم الحصول عليها الخصائص الزمنية والترددية لإشارة LFM التي يستخدمها الرادار ، ومساهمة التصفية المتوافقة مع ضغط النبض وتحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) ، والتنفيذ الرقمي لتصفية دوبلر. عبر تحويل فورييه السريع (FFT). كما تم شرح تأثيرات معلمات الرادار على تقدير السرعة.

Le radar Doppler pulsé est un radar primaire à impulsions qui fournit la vitesse radiale de la cible par détection des décalages Doppler induits par la mobilité des cibles. Il trouve un large champ d'application dans le contrôle du trafic aérien par la détermination des vitesses des cibles, estimation de leurs positions futures et prévention des abordages aériens ou des situations météorologiques dangereuses. Les performances d'un radar Doppler pulsé sont étroitement liées à la durée des impulsions d'émission ainsi qu'à l'inverse de la période inter-impulsionnelle dite fréquence de répétition radar 'prf'.

Pour atteindre des portées importantes, un radar Doppler pulsé doit fonctionner avec une puissance crête du signal d'émission élevée, ce qui est techniquement difficile, ou bien générer des impulsions de durée longues, ce qui dégrade les performances de séparation (distinction) des cibles du radar. Pour cela une technique solution nommée la compression d'impulsion existe.

Pour la détermination des vitesses radiales de cibles mobiles, le radar Doppler pulsé utilise le filtrage Doppler pour la détection des décalages Doppler. Cette fonction est basée sur l'implémentation de la Transformée de Fourier Discrète (TFD) qui permet le passage d'une suite d'échantillons enregistrée à sa représentation spectrale.

Le radar ATCR 33S est un radar Doppler pulsé à compression d'impulsion de la série de radars ATC de Leonardo, qui équipe l'Etablissement National de la Navigation Aérienne (ENNA) pour un fonctionne en continu sur des sites même personnel 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Dans ce contexte, s'insère l'objectif de ce travail qui consiste à étudier et simuler les fonctions de compression d'impulsion et de filtrage doppler du radar de surveillance ATCR 33S .Afin de bien accomplir ce travail nous nous articulons autour de quatre chapitres :

- Chapitre I : une recherche générale sur les radars se fait par rétrospective de leur classification, leur utilisation en aéronautique ainsi que quelques précipitations météorologiques.
- Chapitre II : présente une description générale du radar ATCR 33S et ses composantes principales.
- Chapitre III : sera consacré aux techniques de compression d'impulsion et filtrage Doppler.
- Chapitre IV : une série de simulations sous MATLAB pour concrétiser l'acquisition de ces notions.

Chapitre I

Généralités

Introduction

Le contrôle du trafic aérien a pour rôle de suivre, guider, informer et optimiser les trajectoires des aéronefs dans l'espace de vol en route ou autour d'un aéroport. Le radar est un dispositif qui rayonne des impulsions d'énergie électromagnétique qui sont renvoyées par la cible jusqu'au radar sous forme d'échos afin de déterminer la direction, la distance, la vitesse et d'autres informations de l'objet qui a réfléchi son signal et ainsi prévoir leur déplacement.

I.1. Etablissement National de la Navigation Aérienne : ENNA**I.1.1. Présentation de l'établissement**

L'établissement national de la navigation aérienne (ENNA) dans sa nature juridique, est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), sous tutelle du ministère des transports, il est dirigé par un directeur général et administré par un conseil d'administration. Depuis l'indépendance, cinq organismes ont été chargés de la gestion, de l'exploitation et du développement de la navigation aérienne en Algérie : OGSA, ONAM, ENEMA, ENESA, ENNA. De 1962 à 1968 c'est l'Organisation de Gestion et de Sécurité Aéronautique (OGSA), organisme Alghero-Français, qui a géré l'ensemble des services D'Exploitation de l'Aviation Civile en Algérie. Le 1 Janvier 1968, l'OGSA a été remplacé par L'Office de la Navigation Aérienne et de la Météorologie (ONAM). Ce dernier a été remplacé, en 1969, par l'Etablissement National pour l'Exploitation Météorologique et Aéronautique (ENEMA) qui a géré la navigation aérienne jusqu'à 1983. En 1975, les activités de météorologie ont été transférées à l'Office National de Météorologie créé le 29 Avril 1975, sous forme d'Etablissement Public à caractère administratif.

Le décret N°83.311 du 07/05/1983 a réaménagé les structures de L'ENEMA et modifié sa dénomination pour devenir ENESA « Entreprise Nationale d'Exploitation et de Sécurité Aéronautique avec statut d'entreprise nationale à caractère économique. Afin de clarifier les attributions de l'ENESA, il a été procédé aux réaménagements de ses statuts ainsi qu'au changement de dénomination en « ENNA » par décret exécutif N° 91-149 du 18 mai 1991.

I.1.2. Mission de l'ENNA

- Assurer le service public de la sécurité de la navigation aérienne au nom et pour le compte de l'état.
- Chargé de la mise en œuvre de la politique nationale en matière de navigation aérienne en coordination avec les autorités concernées et les institutions intéressées.

- Le contrôle de la circulation aérienne pour l'ensemble des aéronefs évoluant dans l'espace aérien algérien.
- L'acquisition, l'installation et la maintenance des moyens de surveillance, de radio navigation et de télécommunications aéronautiques ainsi que leur calibration (au moyen de son avion laboratoire).
- La fourniture de l'énergie à l'ensemble des aéroports.
- La concentration, diffusion ou retransmission au plan national et international des messages d'intérêts aéronautique ou météorologique.
- Le service d'alerte au profit des aéronefs évoluant dans l'espace aérien algérien et son concours aux services des recherches et de sauvetage.
- Le service de sauvetage et de lutte contre l'incendie sur les plates-formes aéroportuaire.
- Participation à l'élaboration et à la mise en œuvre pour ce qui le concerne des plans d'urgence d'aéroports, des plans de servitudes aéronautiques et radioélectriques et des plans et programmes des recherches et de sauvetage.
- Gérer le domaine aéronautique constitué pour l'espace aérien, les terrains, bâtiments et installations nécessaires à l'accomplissement de sa mission.

I.1.3. Organisation de l'ENNA

L'ENNA est constituée de plusieurs directions, réparties selon l'organigramme de la figure I.1.

DDNA : Direction du Développement de la Navigation Aérienne.

DENA : Direction de l'Exploitation de la Navigation Aérienne.

DTNA : Direction Technique de la Navigation Aérienne.

DRFC : Direction des Ressources, des Finances et de la Comptabilité.

DJRH : Direction Juridique et des Ressources Humaines.

CQRENA : Centre de Qualification, de Recyclage et d'Expérimentation de la Navigation Aérienne.

DL : Direction de la Logistique.

CCV : Centre de Calibration en Vol

DSA : Directions de Sécurité Aéronautique.

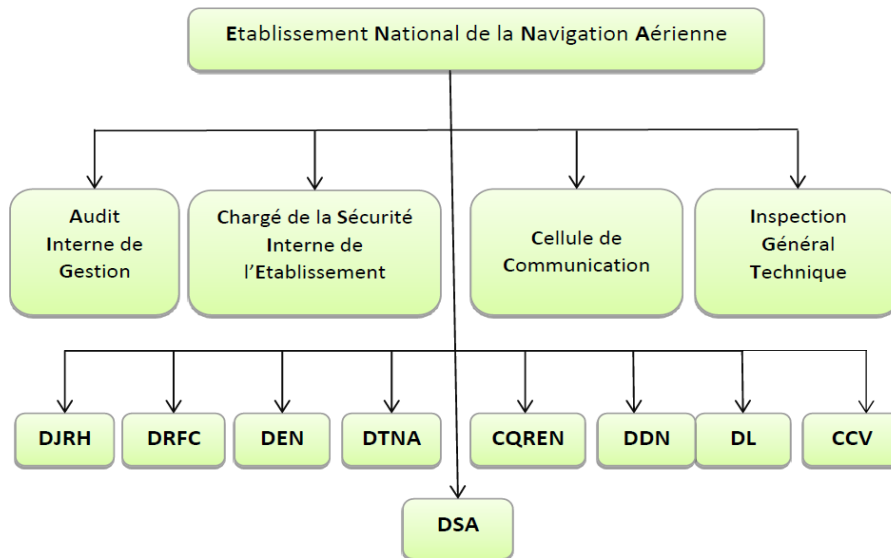


Figure I.1 : Organigramme de l'ENNA.

I.1.4. Direction d'Exploitation et de la Navigation Aérienne (DENA)

La Direction Technique de la Navigation Aérienne (DENA) est une direction à vocation technique, c'est l'une des directions les plus importantes de l'établissement national de la navigation aérienne vue des tâches qui lui sont confiées. La structure générale de la DENA est décrite par la figure I.2.

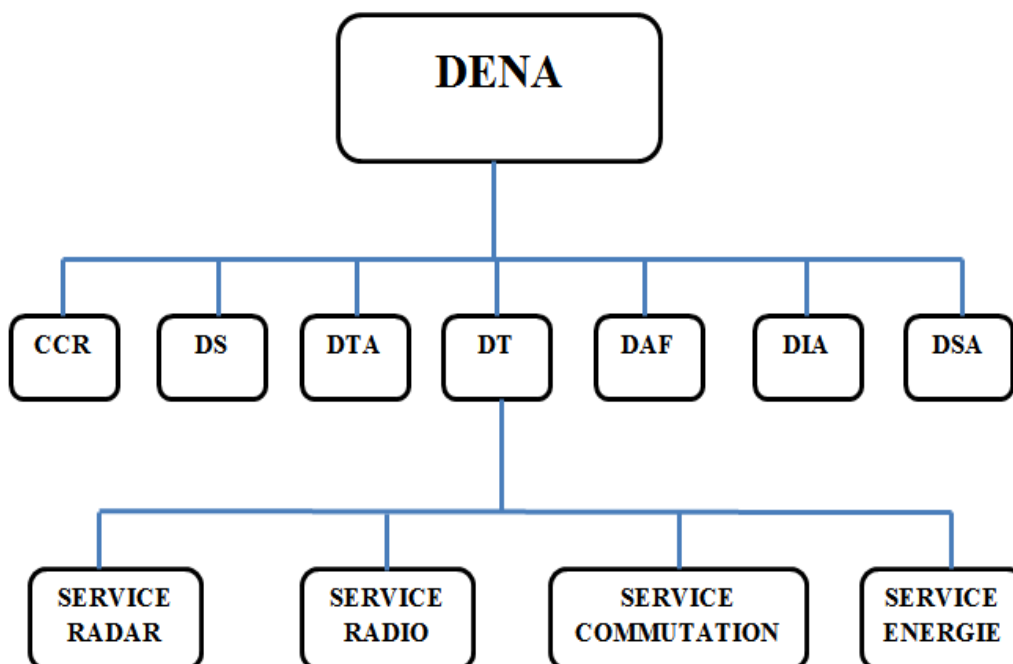


Figure I.2 : Organigramme de la DENA.

I.1.5. Département technique

Le DT est le département qui prend en charge tous les équipements de mesure, d'installation et de la maintenance qui apporte le soutien technique pour d'autres services pour assurer la sécurité aérienne. Il est composé de quatre services :

- Service Energie.
- Service Commutation.
- Service Radio.
- Service Radar.

I.2. Radars

Le mot RADAR provient de l'acronyme anglais "RADio Detection And Ranging" adopté par la marine américaine en 1940, que l'on peut traduire par 'détection et positionnement par des moyens radio'. La première trace généralement retenue dans la genèse du radar remonte à 1886, avec les expériences sur les ondes électromagnétiques du physicien Heinrich Hertz.

I.3. Classe de radars

Selon l'information recherchée, les radars possèdent différentes qualités et technologies. Ceci se traduit par différentes classifications qui peuvent être utilisées en fonction de certains critères, les critères de base peuvent être résumés en suivant :

- **Fonction** : Détection, poursuite.
- **Applications** : Contrôle du trafic, météo, navigation, cartographie, guidage, mesure de distances, mesure de vitesses, imagerie, etc.
- **Formes d'ondes** : pulsées, continues (CW), continues et modulées en fréquence (FM / CW).
- **Type de cibles** : avions, précipitations, missiles, et autres.

Il existe différents types de radar, ces variétés sont présentées sur la figure suivante :

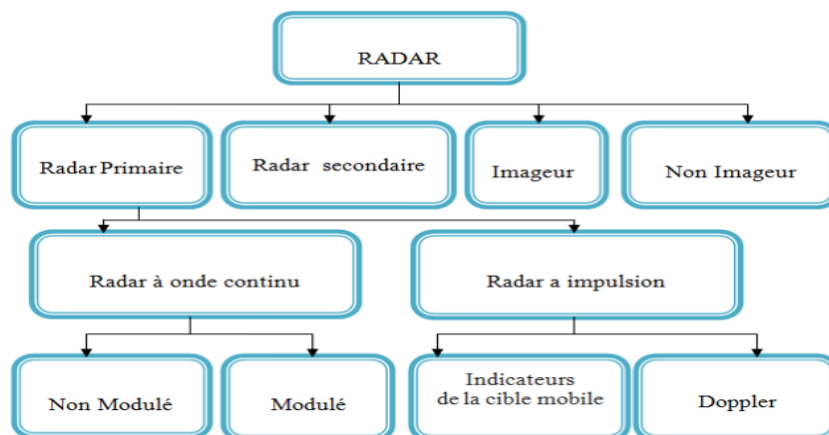


Figure I.3 : Les Différents types du radar

I.3.1. Radars secondaires

Un radar secondaire ou SSR (Secondary Surveillance RADAR) est un dispositif de contrôle aérien qui "interroge" le ciel. Ces radars utilisent le principe de dialogue. Les radars secondaires émettent des suites d'impulsions d'ondes électromagnétiques représentant des messages d'interrogation. Les transpondeurs à bord des avions détectent ces interrogations, les décodent, et émettent à leur tour des suites d'impulsions d'ondes électromagnétiques représentant les réponses à chaque interrogation reçue. Le radar délivre les informations du code d'identification avion et FL et peut déterminer également l'azimut de l'avion par l'angle de réception et la distance de l'appareil par le temps de retour du message. Ce dispositif a été amélioré depuis, du moins pour un usage civil, et a donné naissance aux transpondeurs mode S.

I.3.2. Radars primaires

Le radar primaire utilise le principe de l'émission d'une énergie électromagnétique et la détection du signal réfléchi pour fournir des informations à propos de la cible (distance, position,...etc.). Le schéma ci-dessous illustre le principe de fonctionnement du radar primaire. L'antenne du radar illumine la cible avec des micro-ondes, qui sont alors réfléchies puis interceptées grâce à un récepteur. Le signal électrique recueilli par l'antenne est appelé écho ou retour. Le signal transmis par le radar est généré par un émetteur puissant, l'écho réfléchi par la cible est capté par un récepteur très sensible. Chaque cible réfléchit le signal en le dispersant dans un grand nombre de directions.

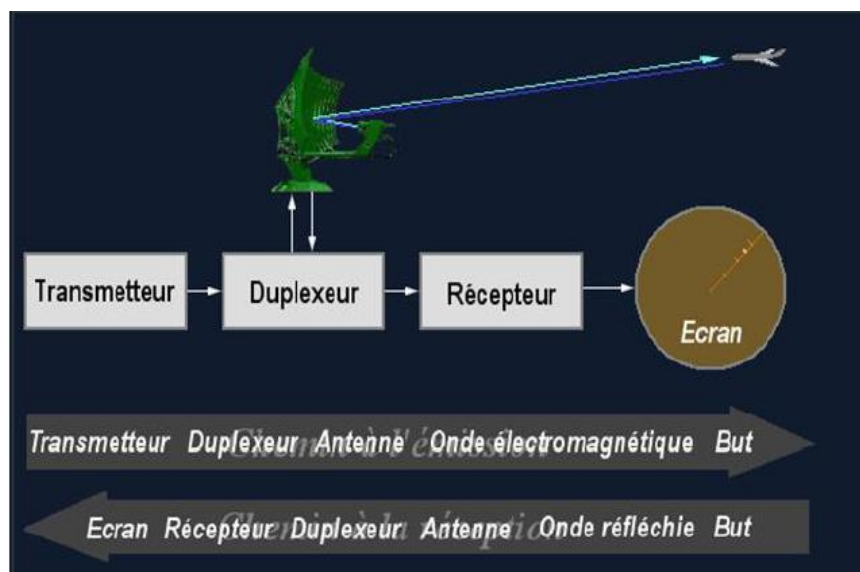


Figure I.4 : Présentation du principe d'un radar primaire.

Les échos détectés par le radar peuvent être visualisés sur l'écran traditionnel de type PPI (Plan Position Indicator) ou sur tout autre système de visualisation plus élaboré. Il existe plusieurs sous-classes de radars primaires.

I.3.2.1. Radars à onde continue (CW-radar)

Ce type de radar est généralement utilisé par les constructeurs automobiles pour la réalisation des systèmes embarqués anticollision et de contrôle intelligent de la conduite automobile. L'émetteur génère une oscillation continue (sans interruption) en fréquence et en amplitude rayonnée par l'antenne. Il existe également deux types de radar à onde continue, le radar à ondes continue non-modulée et le radar à ondes continue modulée.

- **Radar à onde continue non-modulée**

Emet en continu des ondes électromagnétiques à fréquence et amplitude constantes et reçoit les réflexions de la cible sur une antenne de réception (radar bi-statique). Ce type de radar est utilisé essentiellement pour la mesure de vitesse par décalage Doppler. Les radars CW ne permettent pas de déterminer directement la distance.

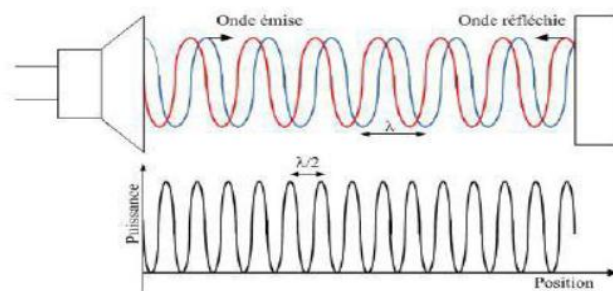


Figure I.5 : Principe du Radar à onde continue.

- **Radar à onde continue modulée en fréquence (FMCW) :**

Comme tous les systèmes CW, ce type de radar émet et reçoit en permanence un signal de fréquence variable en fonction du temps selon une loi généralement linéaire. Son principe repose sur une modulation en fréquence du signal à onde continue, ce qui introduit un marquage temporel du signal nécessaire à la mesure de distance. Le signal reçu par le radar est retardé d'une durée correspondante à la distance de la cible divisée par la vitesse de la lumière.

I.3.2.2. Radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent un signal formé d'un train d'impulsions de durée très brève, de très haute fréquence et de grande puissance (amplitude importante). Après l'émission d'une impulsion, suit un temps d'écoute plus ou moins long durant lequel les échos

éventuels sont reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. La direction, la distance et parfois la taille ou l'altitude de la cible peuvent être déterminées à partir du traitement des échos de retour. Dans cette catégorie de radars on peut trouver :

- **Radar à visualisation des cibles mobiles**

C'est un radar à impulsions capable de détecter la cible mobile dans un encombrement spécial en utilisant une fréquence de répétition d'impulsion faible (PRF).

- **Radar à Compression d'impulsion**

Ces radars utilisent une technique de traitement du signal qui s'appelle la compression d'impulsion. La compression permet à un récepteur d'améliorer la résolution en distance par rapport à une impulsion non compressée de même longueur. À l'origine, la compression temporelle a donc été développée pour amplifier la puissance de l'impulsion transmise (puissance de pointe). L'idée générale est d'obtenir une impulsion longue, afin de conserver une énergie suffisante à la réception, sans pour autant sacrifier la résolution par rapport à une impulsion courte de puissance équivalente.

I.4. Utilisation radar en aéronautique

Le radar est utilisé dans une large gamme d'applications telles que la détection des tumeurs, l'astronomie, l'archéologie, etc ... En aéronautique, on trouve.

- **Radar de route**

Ces radars suivent la position, la vitesse et la trajectoire des avions sur une large zone en utilisant la bande L. Habituellement, leur portée va jusqu'à 250 milles nautiques pour leur permettre de coordonner les vols. Ils effectuent une rotation sur 360 degrés.

- **Radar d'approche**

Radar d'approche de précision (RAP) est un radar spécialisé utilisé dans les aéroports pour faciliter les atterrissages, particulièrement par mauvaise visibilité. Il est placé près du milieu d'une piste (à une distance allant jusqu'à 2 000 mètres) et opère à distance. Le radar donne l'altitude, la distance et la trajectoire de vol de l'aéronef à la tour de contrôle qui peut alors guider le pilote vers la piste lors de mauvaise condition météorologiques. Le contrôleur aérien peut ainsi conseiller l'azimut et l'altitude à suivre au pilote jusqu'au point de décision, environ un demi mille marin ou 800 mètres, du bout de la piste.



Figure I.6 : Radar d'approche.

- **Radar de surface**

Le radar de surface est le dispositif le plus communément utilisé pour la surveillance des mouvements sur les pistes et le tarmac d'un aéroport. Il s'agit d'un radar primaire qui balaie toutes les zones où des véhicules de surface et les avions peuvent manœuvrer, excluant les quais d'embarquement. Le radar de surface est placé dans un endroit qui a une bonne visibilité de tout l'aéroport, en général sur une tour, et possède un taux de rafraîchissement très rapide. Certains aérodromes ayant plusieurs terminaux, comme celui de Munich, possèdent plusieurs radars de surface, chacun s'occupant d'un secteur. À cause des nombreux obstacles qui donnent des échos parasites, la qualité de la surveillance est donc souvent mauvaise et limitée.

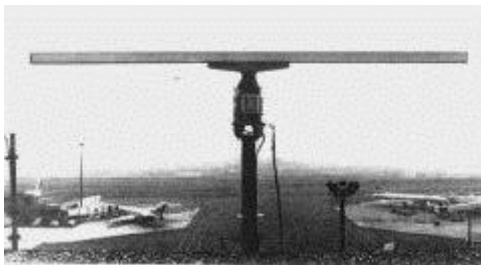


Figure I.7 : radar de surface pour contrôler les mouvements à la base aérienne Logan.

- **Radar météorologique**

Les radars météorologiques permettent de localiser les précipitations et de mesurer leur intensité en temps réel. Ils ont une portée d'environ 100 km pour mesurer la quantité de précipitations et d'environ 200 km pour détecter des phénomènes dangereux. Outre l'intensité des précipitations, les radars météorologiques fournissent également, en exploitant l'effet Doppler, des informations sur le vent dans les zones précipitantes. Les radars les plus récents sont quant à eux capables de faire la distinction entre les types de précipitations (pluie, neige, grêle...).

Un radar météorologique est constitué d'une antenne parabolique, d'un système d'émission-réception et d'un ordinateur. L'antenne est équipée de plusieurs moteurs destinés à l'orienter verticalement et horizontalement et d'un radôme, enveloppe sphérique qui protège l'ensemble des intempéries. Le calculateur assure le contrôle de l'antenne et de l'émetteur ainsi que le traitement du signal reçu. Il permet une visualisation locale des échos et un suivi en temps réel de l'état du radar.

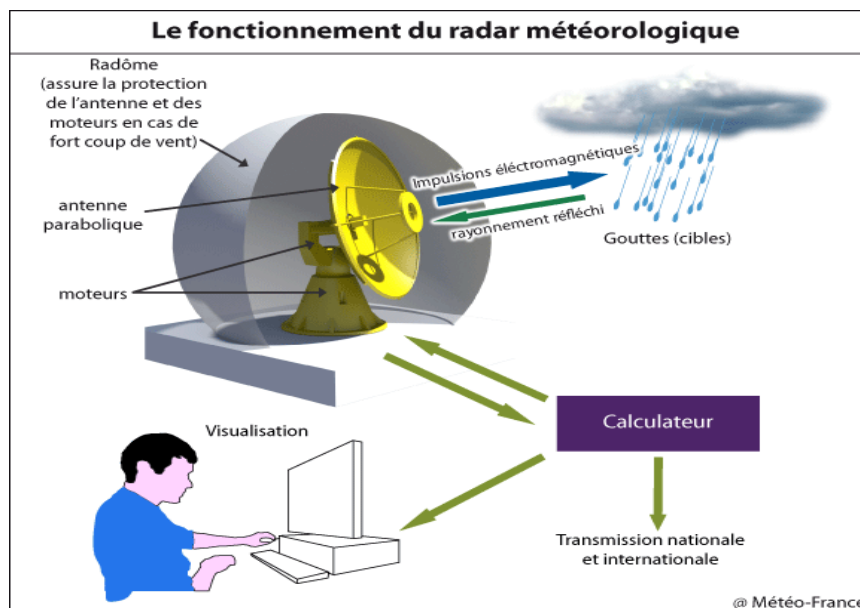


Figure I.8 : Fonctionnement du radar météorologique.

I.5. Fréquences radar

Le choix des fréquences radars est dépendant des exigences de leur fonctionnement. Les radars peuvent avoir une fréquence allant de quelques Mégahertz jusqu'à plusieurs centaines de Mégahertz. Pendant la deuxième guerre mondiale, et pour garder les secrets militaires, les lettres P, L, S, C, X et K ont été assignées à différentes plages de fréquence. À titre d'exemple, le radar de surveillance d'aéroport ASR-9 a été développé dans la bande S avec une largeur de bande de 200 MHz. Le radar PILOT de la surveillance maritime avec la technologie des ondes continues modulées en fréquence a été développé dans la bande X avec une largeur de bande de 400 MHz.

Fréquence	IEEE	Types de radars
3-30 MHz	HF	Radars transhorizon, Radars spécifiques (contre avions furtifs)
30-300 MHz	VHF	
0.3-1 GHz	UHF	Radars longue portée : suivi des satellites
1-2 GHz	L	Radars longue portée : suivi du trafic aérien
2-4 GHz	S	Trafic aérien, côtier et météo
4-8 GHz	C	Surveillance aérienne, conduite de tir
8-12 GHz	X	Radars aéroportés, conduites de tir, radar d'atterrissage
12-18 GHz	Ku	
18-27 GHz	K	
27-40 GHz	Ka	
40-75 GHz	V	Auto-Directeurs de missiles
75-110 GHz	W	

Tableau I.1 : Les principales gammes de fréquences porteuses pour applications radar.

I.6. Précipitations météorologiques

Sont dénommées précipitations, toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

I.6.1. Types de précipitations

I.6.1.1. Les nuages

Un nuage est une masse visible formée initialement d'une grande quantité de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère issues de la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air. Son aspect est fonction de la nature, de la taille et de la répartition des particules qui le composent, ainsi que de la lumière qui l'éclaire. Parfois, il nous apparaît blanc, presque transparent ou éclatant comme la neige, ou à l'inverse gris, voire noir et menaçant. À l'intérieur d'un nuage, les particules sont sans cesse en mouvement. Elles fusionnent, fondent, s'évaporent, se subliment pour mieux condenser ou geler à nouveau.

I.6.1.2. La pluie

Précipitation constituée de gouttes d'eau liquides à température positive ou négative. Dans ce dernier cas, la pluie se congèle sur toute surface à température négative et forme un dépôt de glace appelé verglas (on parle alors de la pluie se congelant). Le diamètre des gouttes de pluie est généralement compris entre 0.5 et 6 mm, et l'intensité de la pluie ne subit pas de variations importantes au cours de la précipitation. Néanmoins, la pluie pourra être faible, modérée ou forte en fonction de la quantité d'eau qui tombe par unité de temps.

I.6.1.3. La grêle

La grêle est une précipitation constituée de globules de glace compacte et dure (appelés grêlons, de forme plus ou moins sphérique et dont le diamètre est généralement compris entre 5 mm et 5cm (on a déjà observé des grêlons de 1 kg). Seuls les cumulonimbus fortement développés verticalement sont capables de donner de la grêle, dont le processus de formation fait intervenir de forts courants ascendants. La densité du grêlon est telle que sa vitesse de chute est élevée. Cette dernière est proportionnelle à la racine carrée du diamètre de grêlon : on peut retenir comme ordre de grandeur qu'un grêlon de 3 cm de diamètre aura une vitesse de chute de 25 m/s.

I.6.1.4. Le vent

Le déplacement d'une parcelle d'air en distance par rapport aux points de la surface de la Terre pendant un intervalle de temps donné s'appelle vent horizontal. Mais la parcelle peut avoir un déplacement ascendant ou descendant en altitude : ce que l'on peut appeler son mouvement vertical. Dans la langue courante et dans le langage des météorologistes, on appelle "vent" le seul mouvement horizontal de l'air. Pour les mouvements verticaux de l'air, les météorologistes parlent de vitesse verticale ou de courants.

I.6.2. Effet des précipitations météorologiques sur la sécurité d'un vol

I.6.2.1. Givrage

Le givrage est dû à la présence d'eau sous forme liquide à des températures négatives. En impactant, elle se transforme en glace : il y a accréation sur l'avion.

Le givrage modifie le profil de l'aile (diminution de la portance, augmentation de la traînée) et l'accumulation de la glace sur la cellule augmente le poids de l'avion. Ces deux phénomènes séparément ou ensemble peuvent entraîner le décrochage de l'avion.

Pour les avions munis de moteurs à pistons il y a le givrage du carburateur. Celui-ci peut

givrer en ciel clair si l'air est chargé d'humidité, même avec une température supérieure à zéro degré.

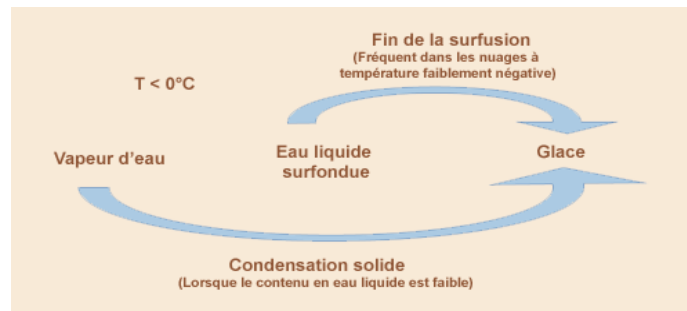


Figure I.9 : Etapes d'accumulation du givrage.

Lorsque la température est faiblement négative, il reste de l'eau liquide (dite en surfusion) dans les nuages. Au contact de l'avion, ces gouttelettes en surfusion se congèlent. De la glace se forme ainsi par accréation sur la surface de l'avion. L'eau ne congèle qu'à des températures négatives. Entre 0° et -12°/-15°C, très peu d'aérosols constituant des noyaux glyco-gènes. L'eau condensée est majoritairement liquide et surfondue. Le nuage présente un fort potentiel givrant.

I.6.2.2. Cisaillement du vent

Le cisaillement du vent peut être vertical ou horizontal, ou un mélange des deux types. L'OACI définit les composantes verticales et horizontales de cisaillement du vent comme suit :

- Le Cisaillement vertical est défini comme le changement de direction du vent horizontal et / ou de la vitesse avec la hauteur, qui serait déterminé au moyen de deux ou plusieurs anémomètres montés à des hauteurs différentes sur un seul mât.
- Le Cisaillement horizontal est défini comme le changement de direction du vent horizontal et / ou de la vitesse avec la distance horizontale, telle qu'elle serait déterminée par deux ou plusieurs anémomètres montés à la même hauteur le long d'une piste. Dans le monde de l'aviation, on s'intéresse surtout au caractère abrupt du changement. S'il est graduel, un changement de direction ou de vitesse n'occasionnera qu'un changement mineur de la vitesse sol. Si le changement est abrupt, il y aura un changement rapide de la vitesse propre ou de la trajectoire. Les cisaillements les plus dangereux sont souvent causés par des micro-rafales sous des cellules orageuses.

I.6.2.3. Exemples de catastrophes aériennes

- **Accident de TORONTO (2005)** : Le 2 août 2005, l'Airbus A340-313 d'Air France quitte Paris à 11h53, pour effectuer le vol 358 à destination de Toronto. À bord, se trouvent 297 passagers et 12 membres d'équipage. En approche finale, le radar montre de fortes précipitations : un gros orage passe sur l'aéroport. À l'atterrissage, l'avion ne peut faire un arrêt complet et sort en bout de piste. Il finit sa course dans un ravin et prend feu. Tous les passagers et membres d'équipage réussissent à évacuer l'appareil avant que le feu n'atteigne les voies d'évacuation. Deux membres d'équipage et dix passagers sont grièvement blessés lors de cet accident. La piste d'atterrissage de l'aéroport de Toronto mesure 2743 m de long. Au moment de l'atterrissage, le 2 août 2005, l'Airbus d'Air France pesait 190 tonnes, la piste était détrempée (6 à 7 mm d'eau), avec un vent arrière de 10 nœuds.
- **Crash de Fly Dubaï** : L'explication du crash du Boeing 737 de Fly Dubaï est probablement contenue dans les bulletins météorologiques qui se sont succédé samedi sur l'aéroport de Rostov-sur-le-Don en Russie. L'avion, qui avait déjà effectué une première approche suivie d'une remise de gaz deux heures plus tôt à 22 h 41, a tenté d'atterrir à 00 h 43 alors que le vent soufflait à 27 nœuds (50 km/h) du 240°. Ce qui, a priori, n'est pas un problème pour un avion de ligne se présentant sur la piste 22 (220°), donc avec une très faible composante de vent de travers venant de la droite. En revanche, ce qui est beaucoup moins favorable dans l'observation faite par la tour de contrôle au moment du crash, ce sont les rafales de vent de 42 nœuds, annoncées précédemment dans les bulletins météo avec des orages et de la pluie forte. En clair, en une fraction de seconde, la vitesse déjà lente de l'avion à l'approche peut varier de 15 nœuds à la hausse, mais aussi à la baisse. Ces changements subits, dits « cisaillements de vent », sont une hantise pour les pilotes, d'autant plus qu'elles interviennent en fin de vol, quand la fatigue se fait sentir alors que la vigilance doit être maximale. Pour les passagers, les turbulences en tous genres se déchainent. La sanction d'un cisaillement peut être mortelle, car il peut provoquer un décrochage quasi impossible à récupérer. Les enquêteurs vont aussi se demander pourquoi les pilotes du vol Fly Dubaï Dubaï-Rostov ne se sont pas déroutés au vu des conditions météorologiques locales exécrables.

Conclusion

Dans le contexte des applications radar dans le secteur aéronautique, et pour des objectifs de surveillance et de prévention météorologique, l'Etablissement National de Navigation Aérienne (ENNA) s'est dotée d'une installation radar ATC R33 S. Il s'agit d'un équipement radar de surveillance composé d'un canal de détection de cible et d'un canal météorologique.

Chapitre II

Radar ATCR 33S

Introduction

Le radar ATCR-33S fait partie de la série des radars ATC "Leonardo", utilise les dernières technologies pour assurer des performances avancées, telles qu'un fonctionnement en continu sur des sites sans personnel 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, avec paramètres de contrôle à distance, utilisant l'extracteur de données radar intégré. L'équipement est conçu selon la norme de toute redondance opérationnelle de l'unité clé.

Le radar ATCR-33S est un radar primaire à compression d'impulsion et à effet Doppler fonctionnant dans la bande S (2-3 GHz). Il est conçu pour détecter des avions non coopératifs et convient au contrôle du trafic aérien dans la zone terminale et en route. L'idée de conception du radar de contrôle du trafic aérien Leonardo peut être intégrée dans le concept des radars modernes qui doivent être utilisés en conjonction avec les systèmes ATC automatisés basé sur un traitement de données très complexe.

II.1. Description du radar ATCR 33S

Le radar de contrôle aérien ATCR 33S est à diversité de fréquences, il a une portée de 60 à 100 milles marins et utilise un transmetteur à semi-conducteurs de 8, 16 ou 32 modules. Il peut être équipé soit d'un réflecteur parabolique G-33 ou d'une antenne réseau à commande de phase ALE3x5 progressive. Une antenne secondaire ALE-9 à large ouverture verticale est montée sur l'antenne du radar primaire. Différentes fréquences de transmission sont utilisées pour les modes à longue et courte portée. La largeur de bande de la fréquence intermédiaire (FI) est de 4 MHz. Le détecteur de phase I et Q a une bande passante de 1 MHz. Un processeur de signal numérique effectue la compression d'impulsion et utilise quatre séries de filtres Doppler différents de 6 filtres chacun (10 en option). Le taux de fausse alarme est réglé séparément dans chaque filtre Doppler et optimisé grâce à une carte des échos statiques et du fouillis dynamique. Le traitement utilise la méthode de corrélation du centre de masse. Un système de test intégré (BITE) vérifie les composants et leur fonctionnement, ainsi que l'alimentation et la température de l'ensemble. Quatre canaux de réception indépendants peuvent être utilisés pour la redondance. Un canal météo intégré peut afficher une carte des précipitations à six. L'ATCR 33S est utilisé sur de nombreux terrains d'aviation dans le monde dont l'Ukraine et le Venezuela.

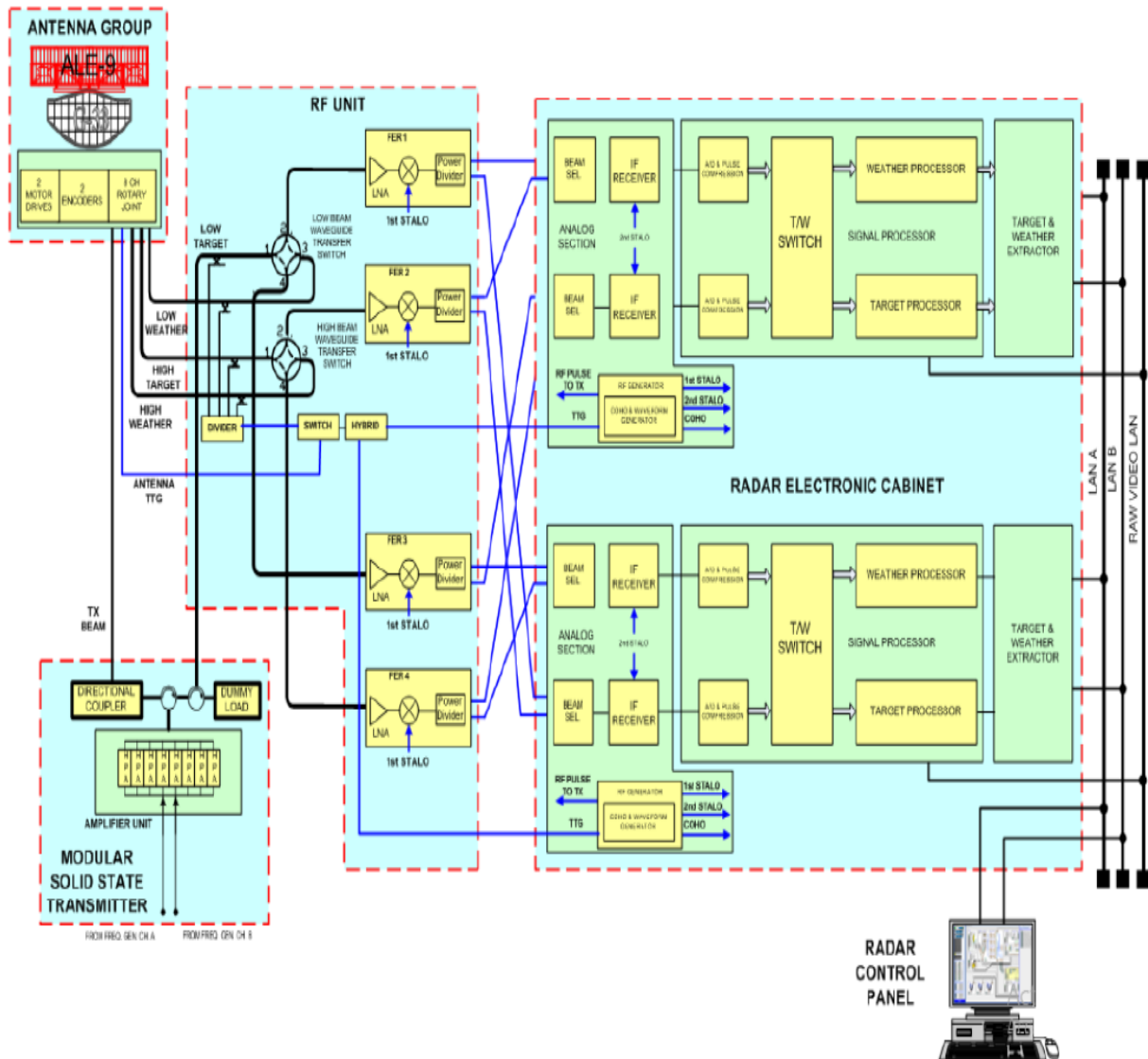


Figure II.1 : Diagramme fonctionnel du radar ATCR 33S.

La mission première du système ATCR 33S-DPC est d'assurer le traitement et la détection des signaux cible (TARGET) et la détection des signaux météo (WEATHER). La structure redondante à quatre canaux est telle qu'elle permet un traitement et une détection simultanés des signaux dans les canaux MAÎTRE et ESCLAVE si aucune panne ne survient dans les canaux. En présence de pannes dans un ou plusieurs canaux récepteurs, le système prévoit la poursuite d'au moins le traitement des signaux TARGET.

Fréquence	2 700 ... 2 900 MHz (<u>bande S</u>)
Fréquence de répétition des impulsions (FRI)	800 Hz
Largeur d'impulsion (τ)	10 μ s et 100 μ s
Puissance de pointe	19 et 24 KW
Puissance moyenne	2 et 2.6 KW
Portée maximale	60 milles marins (optionnel de 100 milles marins)
Résolution versus portée	220 m
Largeur du faisceau	1,45°
Coups au but par balayage	Mono-impulsion
Taux de rotation de l'antenne	10, 12 ou 15 min ⁻¹
MTBCF	40 000 h
MTTR	20 min

Tableau II.1 : Données Techniques du Radar ATCR 33S.

II.2. Composantes du radar ATCR 33S

II.2.1. Emetteur

L'ATCR 33S fonctionne en mode diversité de fréquence. Les deux fréquences de fonctionnement peuvent être sélectionnées dans la plage de fréquences de 2700 MHz à 2900 MHz. Les changements de fréquence sont effectués directement à partir du panneau de commande du radar, sans remplacement de composant, étalonnage ou réglage. Les générateurs de fréquence des deux canaux de réception sont indépendants l'un de l'autre, donc si un canal tombe en panne, le système peut toujours fonctionner en diversité de fréquence. Les éléments principaux et caractéristiques dans l'émission sont :

- Emetteur transistorisés,
- Etage de puissance modulaire (8 ou 10 modules),
- Fonctionnement modulaire en parallèle,
- Le remplacement d'un module ne nécessite pas l'interruption de la fonction de l'émission.
- Stabilité supérieure à 1/10000.

L'émetteur est modulaire et tolérant aux pannes, avec 8 modules de puissance et un ensemble de contrôle inclus dans une seule armoire. L'étage de puissance RF utilise la toute dernière technologie de transistor au nitrure de gallium (GaN), permettant d'augmenter simultanément la puissance transmise, l'efficacité et la fiabilité. Les unités d'amplification haute puissance (HPA) RF sont composées de :

- 1: 8 diviseurs de puissance RF.
- 8 modules d'amplificateur de puissance élevée (HPA).
- Combineur de puissance RF 8 :1.

Le signal de sortie du générateur RF alimente l'unité HPA (High Power Amplifier) où un diviseur de puissance 1: 8 divise le signal RF en 8 signaux RF (puissance et phase) égaux. Ces signaux sont amplifiés en parallèle par les 8 modules HPA. Après l'amplification, les sorties HPA sont additionnées dans le combineur HPA 8: 1, puis entraînées dans un guide d'ondes en bande S, où le dispositif capteur de puissance est connecté pour contrôler la puissance de pointe nominale.

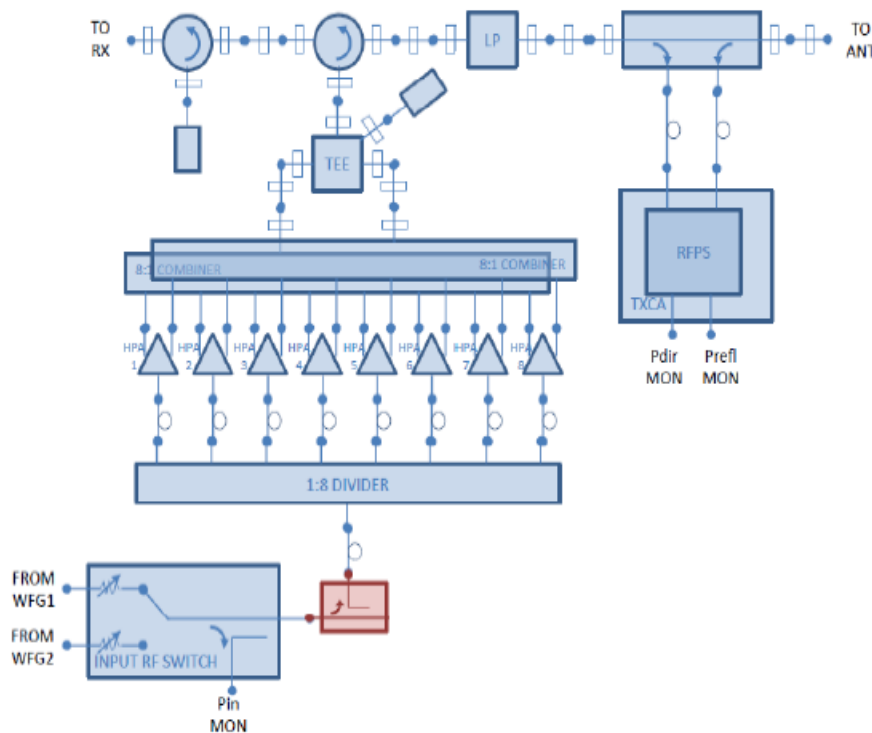


Figure II.2 : Diagramme du block de l'émetteur.

- **Forme d'onde émise**

L'émission dans le temps sur cible se compose de trains d'impulsions courtes et longues cohérentes respectivement utilisées pour la couverture courte et longue portée. Des impulsions longues (codées par la technique de compression d'impulsion) sont nécessaires pour atteindre de grandes portées. Cependant, l'utilisation de Longues impulsions a un inconvénient majeur sous la forme d'un large angle mort (distance aveugle). Pour surmonter ce problème, le radar émet également de courtes impulsions qui réduisent la portée globale aveugle à moins de 0,5 NM. La forme d'onde finale émise peut alors être composée de 2 périodes à impulsion courte suivies de deux périodes à impulsion longue, comme indiqué sur le schéma de la figure II.3



Figure II.3 : Modèle de transmission.

Deux fréquences F1 et F2 sont sélectionnées manuellement par l'opérateur via le panneau de commande radar dans un ensemble de quarante (40) fréquences disponibles dans la gamme de fréquence opérationnelle (2700 MHz - 2900 MHz), dans les modes de fonctionnement suivants :

- **Fixé** : Un couple de fréquences sélectionnées est transmis pour le balayage entier respectivement pour les impulsions courtes et longues.
- **Diversité** : un couple de fréquences sélectionnées est transmis pour le balayage entier respectivement pour les impulsions courtes et longues. Les deux fréquences sélectionnées sont permutées automatiquement à chaque couple. L'émetteur est capable de fonctionner en diversité de fréquence. La forme d'onde émise est composée d'impulsions courtes pour les faibles portées de longues impulsions de longues portées. Le mode de fonctionnement échelonné est effectué en changeant la fréquence de répétition des impulsions.

	Fréquence transmise dans le ODD CPI	Fréquence transmise dans le EVEN CPI
Impulsion courte	F1	F2
Impulsion longue	F2	F1

Tableau II.2 : Fréquence de transmission d'impulsions courtes et longues.

Les principales caractéristiques de l'émetteur ATRC 33S sont indiquées dans le tableau II.3 :

Technology	Solid state (GaN Technology)
Operating frequency range	2700 to 2900 MHz
Modulation	Pulse compression
PRF (Hz):	>900 Hz (average)
Stagger Ratio	16% (Max)

Duty cycle	10% max.
Output peak power (nominal):	≥ 17 KW
Pulse widths (short and long);	<ul style="list-style-type: none"> • 1 [μs] ± 100 [ns] • 90 [μs] ± 100 [ns] or <ul style="list-style-type: none"> • 10 [μs] ± 100 [ns] • 100 [μs] ± 100 [ns]
Rise time	< 200 [ns]
Fall time	< 65 [ns]

Tableau II.3 : Caractéristiques de l'émetteur.

Les fonctions de surveillance suivantes sont fournies au niveau de l'émetteur et du module unique :

- Le fonctionnement des HPA est surveillé avec un ensemble BITE associé et un transformateur de détection de courant. Le transformateur détecte le courant d'impulsion prélevé pendant le temps d'impulsion et envoie le signal de commande à des fins de surveillance.
- L'étage final de chaque amplificateur est surveillé par des circuits BITE qui envoient des indications de défaut à l'opérateur. Les erreurs de VSWR et de rapport cyclique supprimeront la puissance d'entrée si les paramètres dépassent les valeurs nominales.
- La surveillance de la puissance est fournie à la sortie de l'unité émettrice au moyen d'un capteur de puissance dédié.
- La température est surveillée en permanence au niveau des échangeurs de chaleur de chaque module HPA et au niveau de la fenêtre de sortie d'air de l'armoire. En cas de surchauffe, le module concerné est automatiquement désactivé. L'état de l'émetteur et les paramètres de surveillance sont affichés sur le panneau de commande du radar, fournissant une indication de défaillance pour chaque LRU. Le refroidissement de l'ensemble émetteur est assuré par des ensembles de soufflantes qui forcent l'air de la pièce d'équipement conditionné dans les

armoires. L'air froid est prélevé de la fenêtre d'entrée au fond des armoires et l'air chaud est expulsé à travers la fenêtre de sortie dans la partie supérieure des armoires.

II.2.2. Récepteur

L'ATR 33S est fourni avec deux récepteurs redondants inclus dans une seule armoire. Chaque canal comprend une section analogique, où la conversion de fréquence vers le bas et l'amplification du signal sont effectuées, et une section de traitement radar numérique, où les seules détections émises par le processeur de signal numérique A-MTD alimentent l'extracteur intégré ; il analyse les données et extrait les informations synthétiques sous forme de graphiques cibles et de vecteurs météorologiques. Les sorties du processeur de données sont envoyées au double réseau local.

Les échos reçus par l'antenne atteignent le système RF à travers le joint rotatif de l'antenne. Quatre signaux sont disponibles à l'entrée du récepteur :

- Signal de faisceau faible pour la détection de la cible (sortie d'antenne polarisée linéaire),
- Signal de faisceau HIGH pour la détection de cible (sortie d'antenne polarisée linéaire),
- Signal de faisceau FAIBLE pour la détection météorologique (sortie d'antenne orthogonale),
- Signal de faisceau élevé pour la détection météorologique (sortie d'antenne orthogonale).

Les sorties orthogonales sont utilisées pour la détection météorologique lorsque le système radar fonctionne uniquement en polarisation circulaire. En utilisant la polarisation linéaire, le processeur Météo est alimenté par les sorties LOW/HIGH linéaires. En cas de panne, le deuxième canal devient opérationnels sans perte d'information, car les deux canaux détectent et traitent en continu les données, même en état de veille. Le récepteur est équipé de manière appropriée d'un équipement de test intégré (BITE) pour faciliter la surveillance et la maintenance des performances, en fournissant l'identification des défauts au niveau LRU. Le CMS reçoit les informations BITE du récepteur pour l'affichage de l'état et des échecs. Des sorties de test tamponnées sont fournies pour vérifier les signaux du récepteur principal ou synchroniser les équipements de test externes sans affecter le fonctionnement normal du système radar.

Les principales caractéristiques générales du récepteur ATCR 33S NG sont indiquées dans le tableau II.4.

paramètre	valeur
Bande RF	2700-2900 MHz
Récepteur Plage dynamique	≥ 68 dB
Figure de bruit	≤ 2.5 dB
Signal minimum détectable	≤ -120 dBm Le niveau de MDS est mesuré par l'injection d'un signal de test cohérent (via un générateur de cible de test) dans le trajet de réception et l'évaluation du niveau de signal nécessaire pour obtenir la probabilité de détection requise (avec $P_{fa} = 10^{-6}$).
Fréquence IF	255 MHz
Bande passante IF	2.5 MHz

Tableau II.4. Caractéristiques du récepteur principal.

- **Section IF**

La section IF effectue la conversion du signal RF reçu jusqu'à la fréquence IF (255 MHz). Cette conversion vers les basses fréquences est faite en mélangeant le signal d'entrée provenant du FER avec le signal provenant du STALO. Le signal de sortie est alors à 255 MHz.

La fonction de contrôle automatique du gain (AGC) est appliquée pour équilibrer les variations de la puissance du bruit dans le canal du récepteur. Le STALO fournit les fréquences pour la deuxième conversion vers les hautes fréquences durant l'émission et une conversion vers les basses fréquences durant la réception. Le STALO fournit des fréquences dans la bande de fonctionnement avec une haute stabilité de fréquence/phase, afin de permettre le facteur d'amélioration requis pour le filtrage cohérent. La section IF amplifie également (amplification linéaire) les signaux d'entrée, normalisés selon la commande AGC du Data Processor, qui modifie le gain global afin de maintenir la constante de bruit de niveau RMS thermique. Cette fonction permet d'utiliser des seuils fixes dans des zones claires, réduisant ainsi les pertes de traitement CFAR.

A la sortie de la section de réception IF, un filtre est présent, adapté aux caractéristiques du signal reçu, présent pour rejeter la contribution de bruit en dehors de la bande passante du signal radar.

Une estimation de la puissance de bruit à l'entrée de chaque ADC (analog-to-digital converter) est normalement effectuée par des routines du processeur de signal. Les niveaux de bruit estimés sont comparés à une valeur nominale. Le résultat de la comparaison est transmis au processeur radar qui augmente ou diminue le gain des canaux du récepteur IF, ce qui amène le niveau de bruit le plus proche possible de la valeur nominale. Cette boucle de correction est effectuée séparément pour chacune des fréquences incluses dans le sous-ensemble sélectionné. Les informations de correction de gain sont affichées sur le panneau de commande du radar. La correction AGC des canaux de réception est indiquée par des alarmes.

II.2.3. Antenne

L'antenne est l'organe qui relie le radar au monde extérieur. Il performe plusieurs objectifs :

- Concentre l'énergie rayonnée en transmission ; c'est-à-dire elle directive et a une largeur de faisceau étroite,
- Permet d'observer un volume désiré de l'espace,
- Recueille l'énergie écho reçue de la cible,
- Fournit une mesure de la direction angulaire à la cible,
- Fournit une résolution spatiale pour une résolution (séparation) angulaire des cibles.



Figure II.4 : Antenne radar ATCR 33S.

L'antenne peut être un réflecteur parabolique à balayage mécanique, un réseau planaire à balayage mécanique, ou un réseau à balayage électronique utilisant un émetteur unique avec un aliment corporatif ou une configuration spatiale. Chaque type d'antenne a des avantages

d'éliminations particuliers. Généralement, plus l'antenne est grande, plus les contraintes pratiques peuvent en limiter la taille. Une antenne est caractérisée par :

- Son Gain d'antenne,
- Son diagramme d'émission.

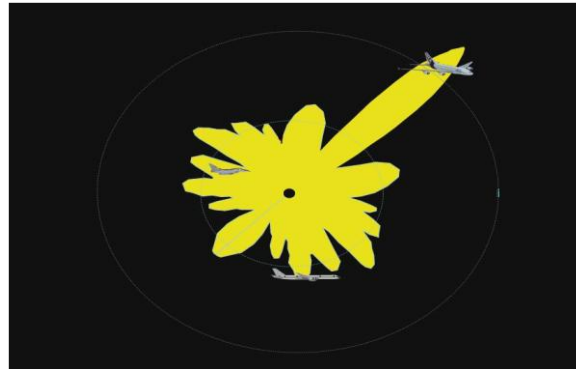


Figure II.5 : Diagramme de rayonnement antenne.

Le PSR considéré dans ce travail fournit des informations pour toutes les cibles de 1 m² dans un rayon minimum de 60 miles nautiques (NM) centré sur l'antenne radar dans les conditions suivantes :

Operation	Frequency Diversity CPI by CPI
Type d'antenne	G-33
Polarization	Linear
Inclinaison de l'antenne	2.2°
Antenne Azimuth Largeur de faisceau	1.45 ± 0.1°
Taux de rotation de l'antenne	15 rpm
Puissance de pointe transmise	17 kW
Fonctionnement de l'émetteur en condition dégradée	13 KW - 1 module in fault
Probabilité de détection PD	90 % in Clear 80% in Ground/Rain Clutter
Probabilité d'alarme fausse Pfa	10 ⁻⁶ in free space 10 ⁻⁵ in Ground/Rain Clutter
Section transversale du radar	1 m ²
Plage minimale détectable	0.2 NM
Azimut	360°
Angle d'élévation de la couverture	from Radar Horizon up to 40°
Plage de vitesse radiale cible	From 30 to 800 Knots

Tableau II.5 : Paramètres du système.

La couverture dépend du diagramme d'antenne, de l'émetteur, du récepteur et de la section transversale radar de la cible. Dans la figure II.6 nous présentons les limites du masque de couverture du radar ATCR 33S qui permet d'évaluer la couverture radar :

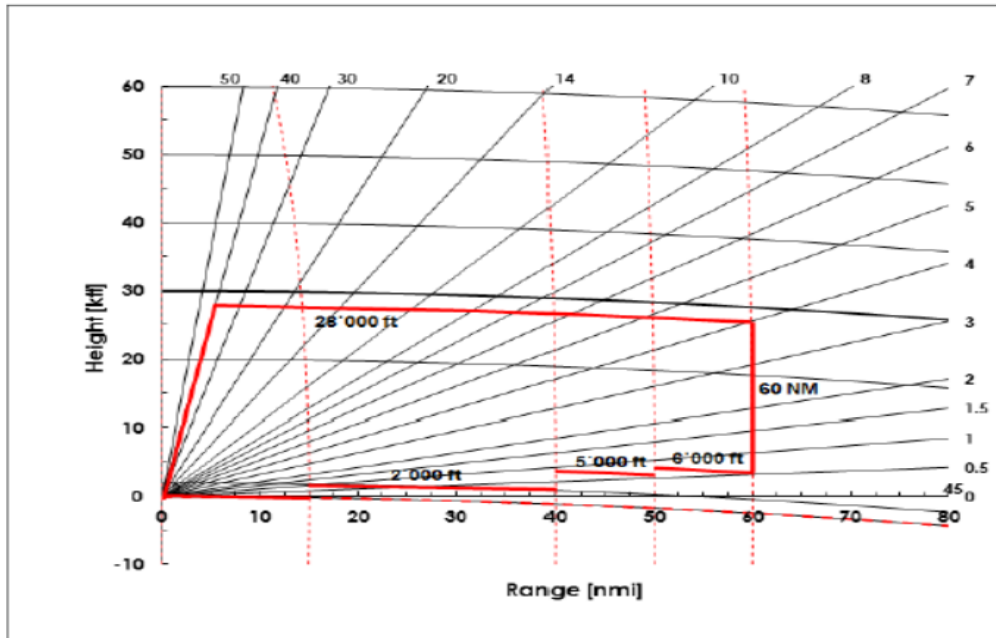


Figure II.6 : Masque de couverture radar.

1. Couverture depuis l'horizon radar jusqu'à une élévation d'au moins 40 °.
2. Entouré d'une hauteur d'au moins 28 000 pieds (FL 280).
3. La provision de couverture de bas niveau doit être :
 - jusqu'au niveau du sol,
 - jusqu'à la distance RHD (Radar Horizon Distance) ou jusqu'à 15 NM selon la valeur la plus élevée,
 - jusqu'à 2000 pieds à partir de RHD ou 15 NM, selon la plus grande des deux jusqu'à 40 NM.
 - Jusqu'à 5 000 pieds de 40 NM jusqu'à 50 NM.
 - Jusqu'à 6 000 pieds de 50 NM jusqu'à 60 NM.

II.2.4. Duplexeur

Le duplexeur est un dispositif permettant l'utilisation de l'antenne pour l'émission et la réception du signal. Il agit comme un commutateur qui relie alternativement l'antenne à l'émetteur puis au récepteur radio. Un duplexeur doit donc être conçu pour :

- fonctionner dans les plages de fréquence d'émission et de réception ;
- pouvoir supporter la puissance d'émission ;
- avoir une sensibilité de réception supérieure au bruit d'émission ;
- opérer à une fréquence égale ou inférieure à la limite de fréquence entre celles de l'émetteur et du récepteur ;
- isoler les deux canaux de façon adéquate.

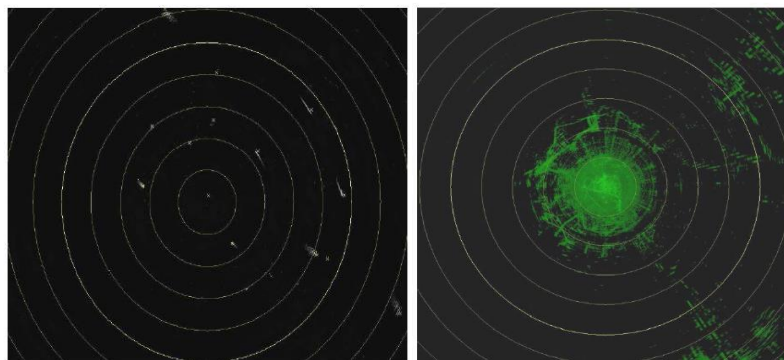
II.2.5. Système d'affichage

La fonction génératrice vidéo numérique est implémentée dans le processeur radar.

Les flux vidéo numériques suivants sont fournis :

- Vidéo 1 : Non traité (sélectionnable à l'entrée ou à la sortie du processeur MTD),
- Vidéo 2 : Vidéo traitée (en sortie de la fonction de détection),
- Vidéo 3 : Niveaux météorologiques (six niveaux météorologiques fournis par la carte WLM),
- Vidéo 4 : Cartes dynamiques du processeur de signal.

Des exemples de captures d'écran des sorties vidéo brutes typiques sont fournis dans les figures suivantes :



(a) traitée

(b) non traitée

Figure II.7 : Exemples de sorties vidéo.

II.2.6. Processeur du Signal Radar

Le radar ATCR 33S est doté d'un processeur de signal qui remplit un traitement du signal cible/météorologique et un extracteur. La structure en blocs des techniques de traitement du signal impliquées dans le radar ATC 33S est illustrée dans la figure II.8. Chaque bloc a son propre rôle dans le processus de détection et / ou de suivi de la cible.

- PC (Pulse Compression) permet via des techniques de filtrage spécifiques de récupérer le signal transmis par l'écho rétrodiffusé bruyant,
- AT (traitement d'amplitude) : élimine les valeurs parasites en vérifiant chaque échantillon amplitude,
- DF (filtrage Doppler) : évalue la vitesse radiale des cibles à travers une banque de filtres à bande étroite.
- ML (Module et Logarithme) : modifie mathématiquement le signal reçu dans le but d'améliorer la capacité de détection du radar.
- ACP (Anti-Clutter Processor) : évalue la puissance du bruit environnant en fonction de situation (mer, sol),

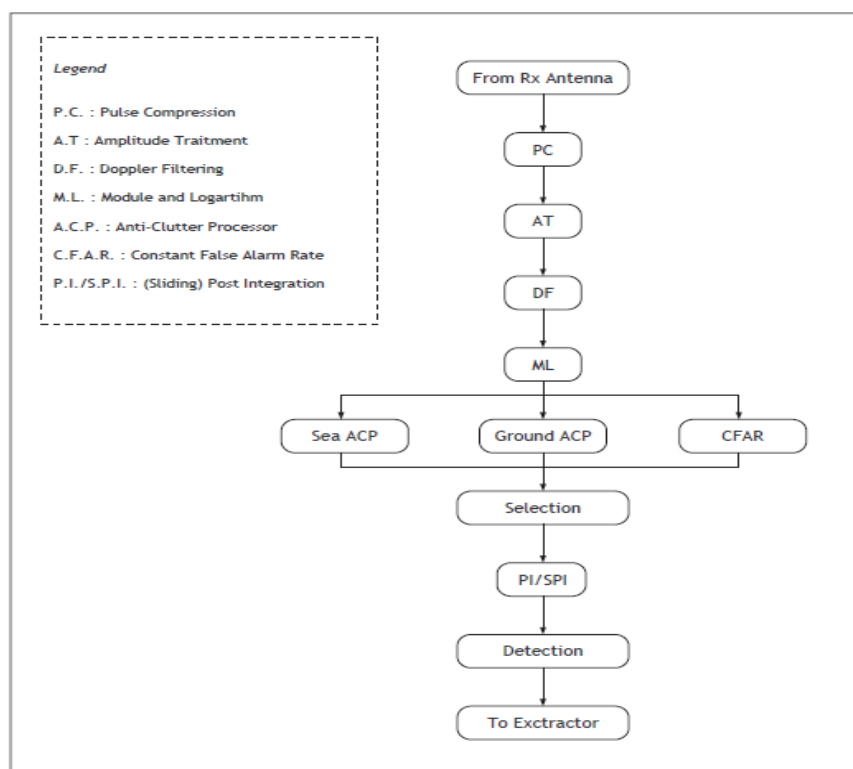


Figure II.8 : Structure en blocs du traitement du signal radar.

- CFAR (Constant False Alarm Rate) : ajuste les seuils de détection et les paramètres radar afin de maintenir les performances de détection,
- PI (post-intégration) : combine des impulsions dans un train émis pour améliorer la détection,
- SPI (Sliding PI) : fonctionne comme PI mais utilise la sortie de PI de tour en tour,
- Détection : fournit un indicateur indiquant la présence d'une cible dans chaque cellule définie.

Conclusion

Le radar ATCR 33S étant un radar doppler pulsé à compression d'impulsions, conçu pour fournir des informations de distance et de vitesse concernant des cibles avions ou météorologiques en approche et en route, un traitement numérique du signal adéquat est nécessaire pour l'accomplissement de cette tâche.

Chapitre III

Compression d'impulsion et filtrage Doppler

Introduction

Ce chapitre est consacré à deux fonctions primordiales dans le synoptique du radar ATCR 33S, il s'agit de la fonction de compression d'impulsion qui utilise la modulation linéaire de la fréquence, et la fonction de filtrage Doppler qui caractérise un radar Doppler pulsé et qui est fondée sur l'implémentation de la Transformée de Fourier Discrète (TFD).

III.1. Concept de compression d'impulsion

Dans un radar classique, deux choix existent pour augmenter la portée, soit augmenter la puissance crête du signal d'émission ce qui est techniquement difficile, soit augmenter la durée de l'impulsion ce qui dégrade le pouvoir de séparation radar ($\frac{c\tau}{2}$). Le concept de compression d'impulsion remédie à ce problème par l'utilisation d'impulsions modulées. A l'émission un radar à compression d'impulsions émet des impulsions de longue durée pour avoir une énergie élevée, et à la réception les impulsions sont comprimées pour avoir une bonne résolution en distance.

Initialement, la compression temporelle a été développée pour amplifier la puissance (puissance de crête) de l'impulsion transmise. L'idée générale est d'obtenir des impulsions longues afin d'économiser suffisamment d'énergie lors de la réception, sans sacrifier la résolution par rapport à des impulsions courtes de puissance équivalente. La forme de l'impulsion est illustrée à la figure III.1.

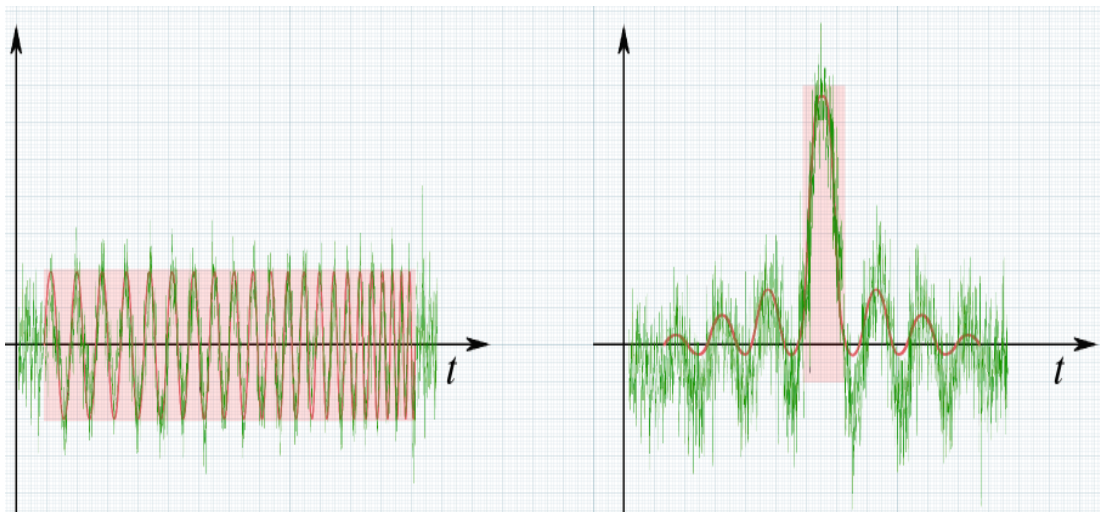


Figure III.1 : Les signaux d'entrée et de sortie d'un étage de compression d'impulsion.

III.1.1. Principe

On génère un signal dont le support temporel est relativement long pour maximiser l'énergie émise. Cependant, on module ce signal de telle manière qu'après un filtrage adapté, l'inter-corrélation entre le signal reçu et les différentes fréquences du signal émis permet de résoudre les signaux de retours de plusieurs cibles qui pourraient se chevaucher à l'intérieure de la distance que représente la longueur de l'impulsion. Comme chaque partie de l'impulsion a sa propre fréquence, les retours sont complètement séparés.

L'inter-corrélation entre le signal reçu et le signal émis permet également de faire ressortir le vrai signal du bruit de fond qui a une distribution statistique de bruit blanc. Grâce à un filtre, le récepteur radar peut extraire ce dernier en utilisant une fréquence synchrone à l'impulsion modulée initiale. Même si le signal retourné par la cible est sous le niveau du bruit, la multiplication du signal par cette fréquence réajuste la phase des composantes du signal de retour ce qui fait ressortir le vrai signal. Cela permet d'allonger la portée utile du radar au-delà de ce que prédit l'équation du radar classique.

La distance aveugle (R_{\min}) est cependant plus grande avec cette technique par rapport à une impulsion conventionnelle de même résolution car l'impulsion compressée est beaucoup plus longue, comme on peut voir sur la figure III.2. Le duplexeur qui alimente l'antenne avec le signal provenant du transmetteur ne peut commuter vers le récepteur qu'après la fin de l'impulsion, et dans le cas de l'impulsion compressée ce temps est beaucoup plus long.

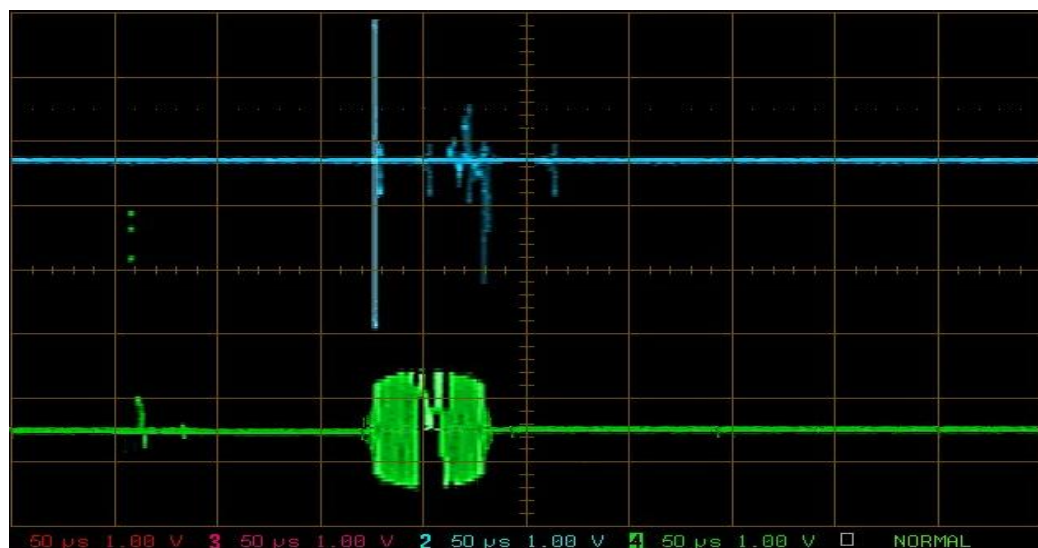


Figure III.2: Impulsion classique courte (en bleu) et une impulsion longue transmise avec modulation d'impulsions interne (en vert).

III.1.2. Rapport de compression d'impulsion

Par rapport aux impulsions non comprimées de même longueur, la compression permet au récepteur d'augmenter la résolution de la plage. Pour la compression linéaire par modulation de fréquence d'impulsions de durée par modulation de bande passante B , la résolution sera améliorée en fonction du taux de compression d'impulsions (RCI). Par exemple, une compression 50:1 signifie que la distance de résolution est réduite à 1/50 par rapport aux impulsions traditionnelles. Le calcul de ce ratio est le suivant :

$$RCI = \frac{(c_0 \cdot \tau / 2)}{(c_0 / 2B)} = B \cdot \tau \quad (III.1)$$

c_0 : la vitesse de la lumière.

RCI est le gain de puissance de l'impulsion comprimée sur celle non comprimée de même de durée, ce qui représente un gain du rapport signal sur bruit. On peut également trouver l'amélioration de la résolution en utilisant RCI selon :

$$R_{rés} = c_0 \cdot (\tau / 2) = PCR \cdot c_0 / 2B \quad (III.2)$$

Le rapport de compression est égal au nombre de sous-impulsions contenu dans l'onde émise, soit son codage par modulation. La résolution est donc proportionnelle à la durée d'un élément de ce codage. La portée maximale augmente comme la racine quatrième du RCI.

III.1.3. Lobes secondaires temporels

L'impulsion comprimée n'est pas une onde carrée, mais une série d'oscillations, comme le montre la vue du signal de l'oscilloscope (Figure III.3). La plus grande oscillation est le lobe principal, et les autres sont appelées lobes secondaires temporels. Sur l'affichage de type B (donne une image cartésienne où les coordonnées sont la distance et la direction) de la même image, on voit que le retour de la cible sera étiré spatialement de la même manière. En effet, l'énergie du lobe latéral le frappera à un moment différent de celui du lobe principal et sera donc placée à une distance différente. Par conséquent, ces lobes secondaires temporels sont importants pour déterminer la compression et les filtres à utiliser. Une façon de filtrer ces lobes de réception indésirables consiste à pondérer le retour en fonction de l'amplitude du signal d'origine. Le lobe principal apparaîtra, mais l'intensité diminuera, donc le rapport signal/bruit diminuera. Un bon filtre peut réduire les lobes secondaires jusqu'à 30 dB.

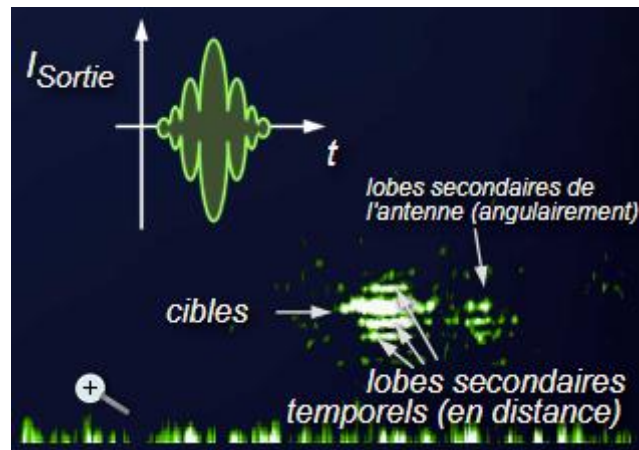


Figure III.3 : Vue des lobes secondaires temporels.

III.2. Techniques de compression d'impulsions

III.2.1. Codage de phase

Le codage de phase des ondes est différent du codage de phase des fréquences. Dans ce codage, une impulsion longue est divisée en plusieurs impulsions courtes, qui correspondent généralement à une sous-partie de l'unité de résolution de l'impulsion d'origine. Toutes les sous-impulsions ont la même durée, mais différentes phases initiales deviennent leurs identités. Ce code est généralement un code binaire. Par exemple, des déphasages nuls peuvent être affectés à certains blocs (cela équivaut à conserver ces blocs tels quels) et d'autres blocs peuvent être déphasés de $+\pi$ et $-\pi$ (ce qui équivaut à changer leurs signes). L'introduction de ce codage conduit à des discontinuités de phase entre les sous-impulsions. Le choix des phases aléatoires $0, \pi$ est très importante. Un cas spécial de ces codes est celui de Barker. Il est considéré comme optimum car il minimise les lobes secondaires temporels qui sont en plus d'égale amplitude. Le tableau montre la séquence de codage dans un tel cas. Une étude statistique par ordinateur a montré qu'un codage de 6 000 sous-impulsions ne nécessite que 13 éléments. Dans ce cas, le rapport de compression est de 13 et le niveau des lobes secondaires temporels est de -22.3 dB par rapport au lobe principal. Il est également possible de coder le signal sur un alphabet de plus de deux phases (codage polyphasé). Comme dans le cas de la modulation de fréquence linéaire, il suffit de réaliser une corrélation entre le signal émis et le signal reçu pour avoir le signal compressé.

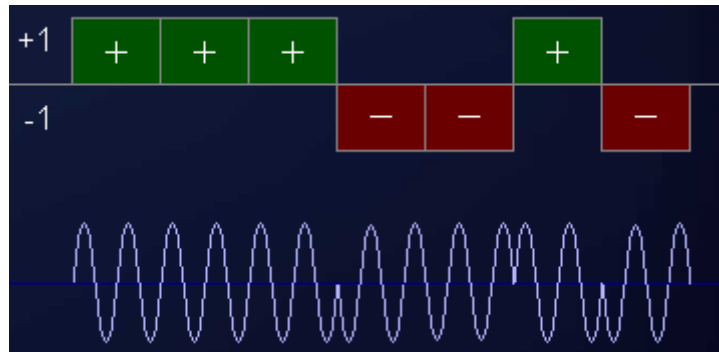


Figure III.4 : Schéma d'une modulation de phase.

Longueur du code n	Éléments du code	Maximum d'intensité du lobe secondaire (dB)
2	+ -	-6.0
3	+ + -	-9.5
4	+ + + - , + + - -	-12.0
5	+ + + + -	-14.0
7	+ + + - - - -	-16.9
11	+ + + - - - - - - - -	-20.8
13	+ + + + + - - - - - - - -	-22.3

Tableau III.1 : Codes de Barker.

III.2.2. Compression par modulation linéaire de fréquence

Cette méthode de compression d'impulsion utilise une modulation de fréquence linéaire. Ceci a l'avantage d'utiliser un circuit électronique relativement simple. Cependant, elle présente l'inconvénient que le brouillage du signal est relativement facile à réaliser en utilisant un simple appareillage de balayage des fréquences. L'exemple suivant montre le diagramme d'un circuit de compression linéaire.

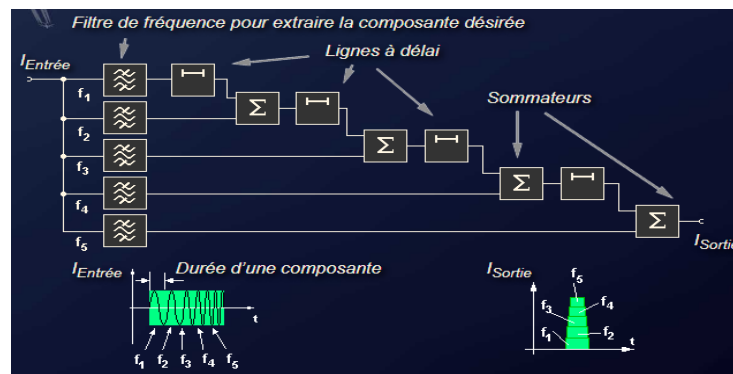


Figure III.5 : Diagramme montrant l'addition de la modulation à l'impulsion.

L'impulsion initiale est divisée en un certain nombre d'intervalles de temps à fréquence constante. Le filtre de compression est une série de circuits qui introduisent un délai en fonction linéaire de la fréquence. Le circuit permet à la fin de l'impulsion de « rattraper » son début ce qui donne une impulsion plus courte d'amplitude plus grande.

Il existe deux techniques possibles pour la génération de ce type de compression :

- Traitement numérique par conversion des (I/Q).
- Par traitement des ondes acoustiques de surface d'un cristal piézoélectrique.

Pour l'émission, on peut utiliser une génération active à l'aide d'un VCO ou une génération passive à l'aide de lignes dispersives tel que la ligne SAW (ligne à transducteurs en peigne).

- **Ligne SAW**

Une ligne dispersive SAW est constituée de surface en Quartz et de transducteurs entrée et sorties. Le signal à l'entrée va faire vibrer le quartz grâce au transducteur et une onde acoustique va se propager dans la ligne. Les fréquences couplées du transducteur vers la ligne dépendent de l'espacement entre les doigts. Dans les transducteurs de sortie, les fréquences hautes sont couplées à la gauche, et les fréquences basses sont couplées à la droite et arrivent à la sortie avant les fréquences hautes.

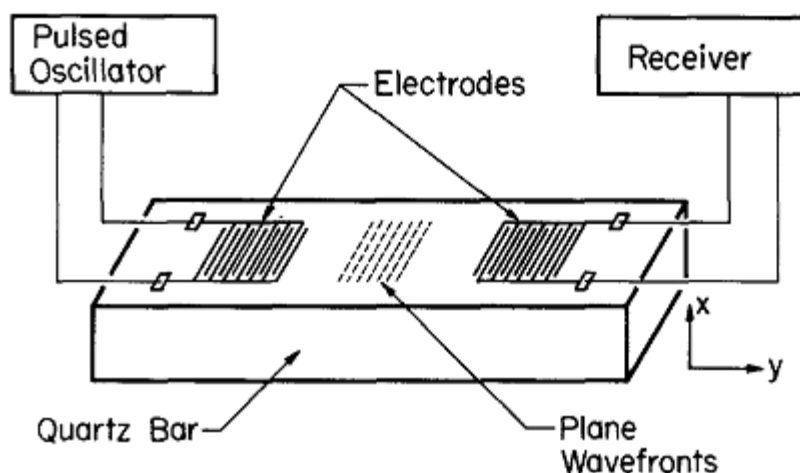


Figure III.6 : Ligne SAW.

La ligne SAW à la réception effectue l'opération de compression en inverse : les fréquences hautes sortent avant les fréquences basses, ce qui permet la remise en phase des composantes du signal et la formation d'une impulsion courte.

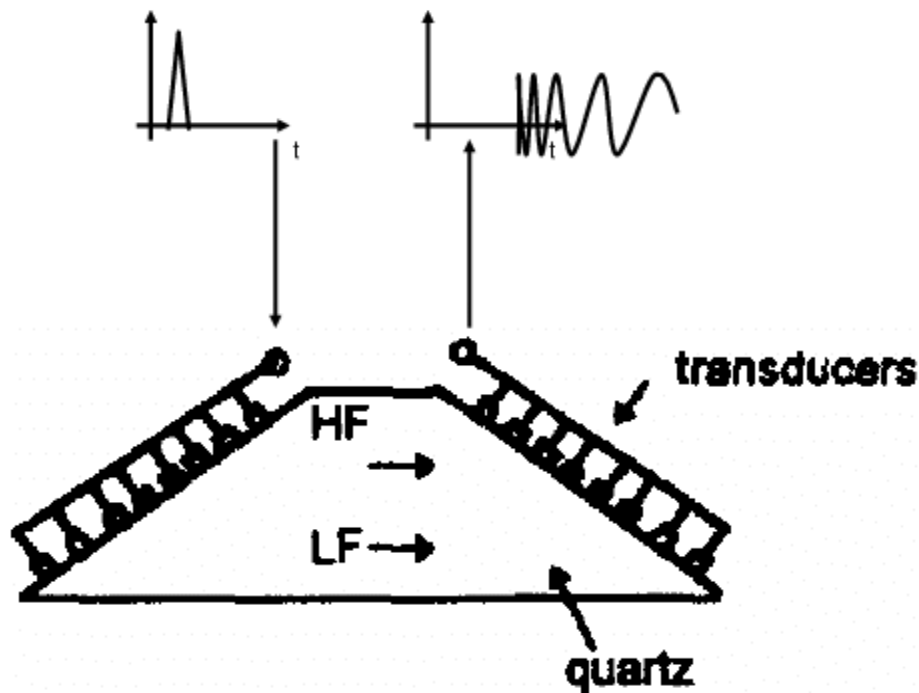


Figure III.7 : Filtre SAW en expansion et en compression.

III.2.3. Compression par modulation non-linéaire de fréquence

Le principe d'une modulation non-linéaire est de faire varier la fréquence selon une fonction connue. La modulation peut être symétrique ou asymétrique. Dans le premier cas, on utilise une variation de la fréquence du signal qui augmente durant la première moitié de l'impulsion et qui diminue durant la seconde. Dans le second cas, on utilise la moitié d'une onde symétrique.

Ce type de compression a plusieurs avantages :

- Elle ne nécessite pas de suppression des lobes secondaires car la modulation de l'onde est calculée pour en limiter l'amplitude,
- Elle permet d'avoir moins de perte dans le rapport signal sur bruit. Les désavantages de cette technique sont :
 - Une plus grande complexité électronique,
 - La nécessité de bien séparer la modulation de fréquence de chaque moitié de l'impulsion pour minimiser les lobes secondaires temporels.

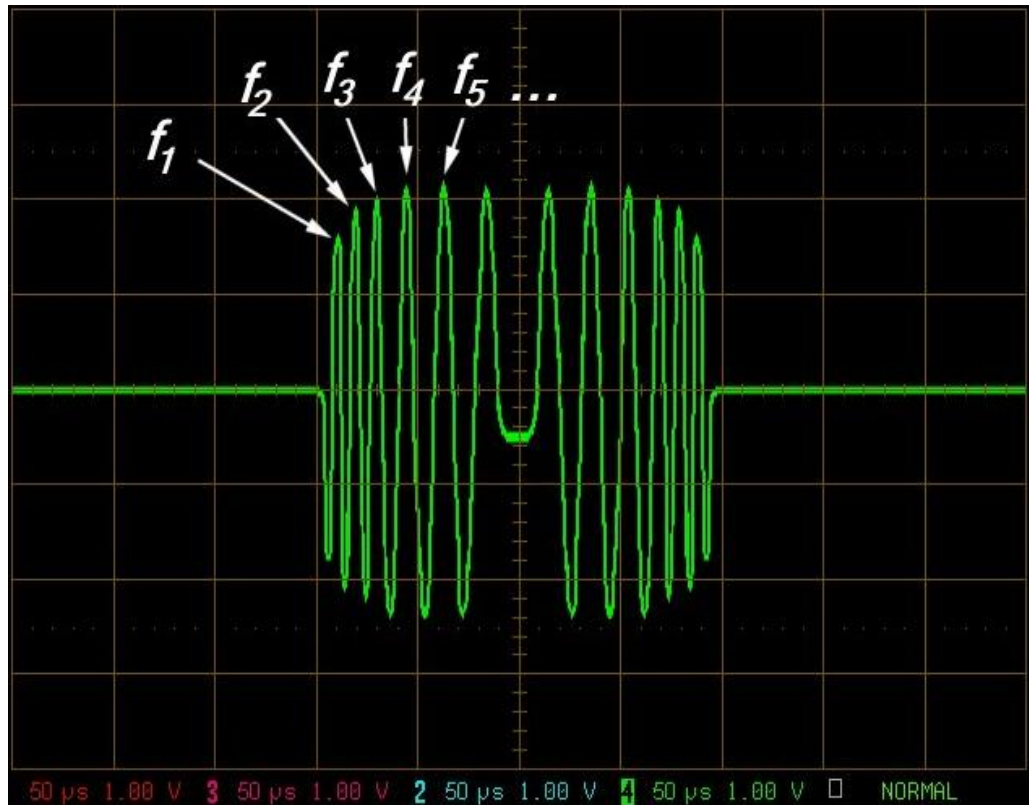


Figure III.8 : Onde symétrique (par un générateur d'ondes).

III.3. Filtrage Doppler

Le filtrage Doppler est une fonction principale dans le synoptique d'un radar pulse doppler. Il a pour objectif d'extraire les vitesses de cibles mobiles.

III.3.1. Effet doppler

Le radar transmet un signal électromagnétique à un objet et reçoit un signal réfléchi par l'objet. En évaluant le délai de temps entre l'émission et la réception le radar mesure la distance de l'objet au radar. Si l'objet est mobile la fréquence du signal reçu sera décalée de la fréquence du signal transmis, cet effet connu comme l'effet doppler. Le changement de fréquence doppler détermine la vitesse radiale de l'objet mobile.

L'effet Doppler est le changement apparent de la fréquence d'un signal sonore ou électromagnétique reçu par un observateur mobile par rapport à une source émettrice fixe ou bien par un observateur fixe par rapport à une source émettrice mobile. La variation apparente de fréquence est proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source le long du chemin qui les sépare. L'effet Doppler concerne le son mais aussi la lumière.

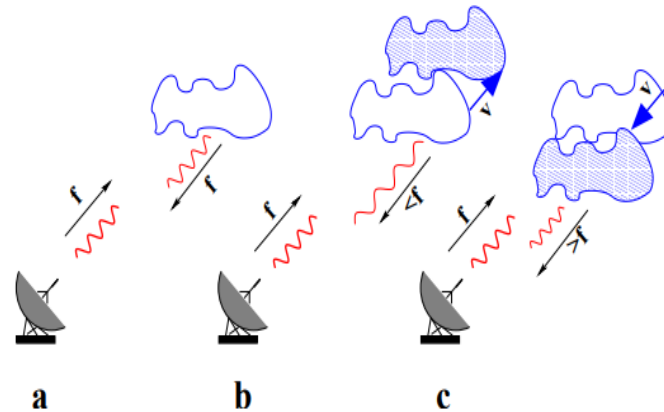


Figure III.9 : Changement de fréquence dû à l'effet doppler sur une cible en mouvement.

III.3.2. Principe du radar pulse doppler

Un radar Doppler pulsé est un radar capable, non seulement de donner le cap, la distance et l'altitude d'une cible, mais aussi de mesurer sa vitesse radiale (portée-vitesse). Pour cela il utilise l'effet Doppler. Le retour des impulsions radioélectriques renvoyées par réflexion sur la cible sont traitées pour calculer le glissement de fréquence entre l'onde émise et celle qui est reçue. Pour cela, le système d'émission doit avoir une excellente stabilité de phase, on dit, dans ce cas, qu'il est « cohérent ». On entend par cohérence, une continuité de phase d'une impulsion à la suivante.

La nature même des radars pulsés, et la relation qui existe entre la fréquence de la porteuse f^T et la fréquence de répétition des impulsions radar f^{FRI} (en anglais PRF pour Pulse repetition frequency) font que le spectre de fréquence peut être très complexe et risque de conduire à des erreurs. En général, pour éviter le repliement de spectre, on choisit f^{FRI} très élevée, mais ce choix peut occasionner des effets secondaires comme l'affichage de plusieurs distances pour une seule cible. Pour éviter cela, on utilise plusieurs fréquences d'impulsions différentes. Le radar doppler pulsé est fondé sur deux prémisses. La première est que la position de la cible peut être calculée en notant le temps entre l'émission d'une impulsion radar et son retour. La seconde sur le fait qu'une cible se déplaçant avec une vitesse radiale non nulle par rapport au faisceau radar provoque un glissement de fréquence entre la fréquence de référence de l'émetteur et celle de la porteuse reçue après réflexion sur la cible (effet doppler). Comme la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, la fréquence de l'onde augmente si la cible s'approche du radar. Si la cible s'éloigne du système radar, le contraire se produit. Si le radar est au sol, alors tous les changements de fréquence Doppler seront dus au mouvement de l'objet cible. Si le radar est un véhicule ou embarqué, alors les changements de

fréquence Doppler seront dus au mouvement relatif entre le radar et l'objet cible. Le décalage de fréquence Doppler peut être calculé comme suit :

$$f_{\text{Doppler}} = 2 V_{\text{relative}} / \lambda \tag{III.3}$$

Pour qu'un radar Doppler pulsé fonctionne, il est indispensable que les échos reçus soient cohérents avec la porteuse, au moins le temps que tous les échos soient reçus et traités.

Pour cela il existe plusieurs techniques. La plus immédiate est que le signal de l'émetteur soit généré par un oscillateur ultra-stable (COHO) et que le signal reçu soit démodulé par un autre oscillateur ultra-stable (STALO) sur lequel la phase est verrouillée. Le déplacement Doppler peut alors être déterminé avec précision en comparant les différentes fréquences des échos avec les fréquences du signal émis. Pour déterminer le décalage doppler en général, on utilise pour cela, soit une transformée de Fourier rapide, soit la technique de l'autocorrélation.

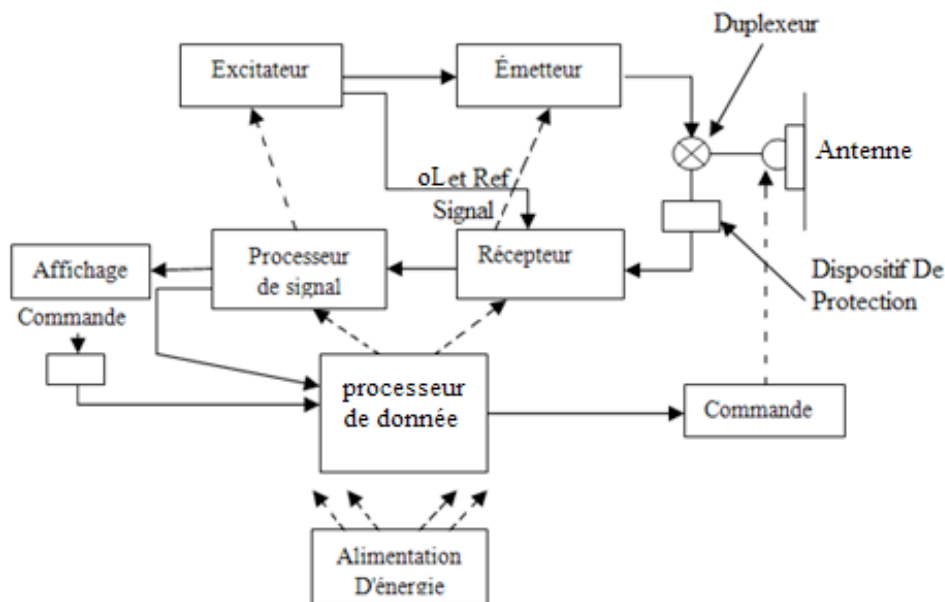


Figure III.10 : Diagramme fonctionnel d'un radar pulse doppler.

III.3.3. Forme et spectre des signaux

Pour pouvoir mesurer le décalage Doppler (vitesse de la cible), le radar émet des rafales de N impulsions cohérentes (à phases identiques), ceci permet d'augmenter la durée de la mesure. Le spectre d'un tel signal est un spectre centré autour de la fréquence porteuse avec des raies espacées f_r (fréquence de répétition radar) de part et d'autre de la raie centrale de la porteuse.

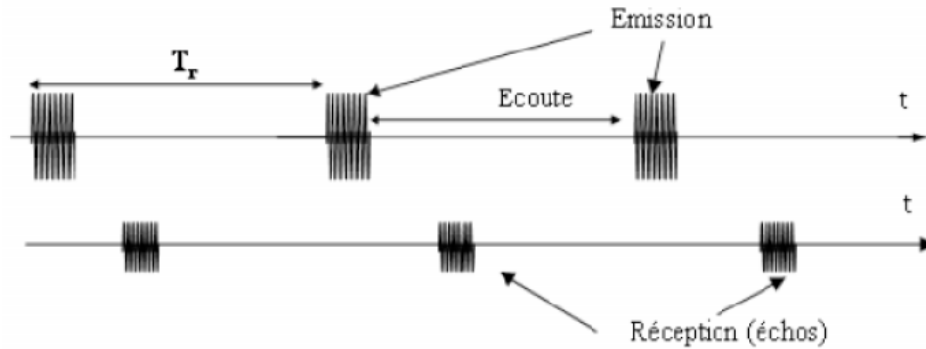


Figure III.11 : forme du signal d'émission et réception.

Le spectre du signal reçu est identique à celui de l'émission avec translation vers la gauche ou la droite selon la quantité et le signe du décalage Doppler causé par une cible mobile.

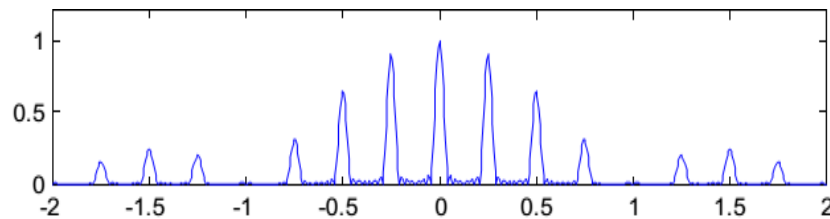


Figure III.12 : Spectre d'un train d'impulsions.

III.3.4. Performances du radar pulse-Doppler

L'intensité de l'écho réfléchi en direction du radar varie plus ou moins aléatoirement, la détectabilité d'une cible dépend de nombreux facteurs, la plupart d'entre eux sont :

- Puissance de l'onde transmise.
- Fraction du temps τ/T de la puissance d'émission.
- Taille de l'antenne.
- Propriétés réfléchissantes de la cible.
- Durée pendant laquelle chaque cible est sur le lobe principal balayage.
- Nombre de scans où la cible apparaît.
- Longueur d'onde de l'onde radio.
- Intensité du bruit et de l'encombrement.

- **Ambiguïté doppler**

En utilisant l'équation générale de la fréquence Doppler, la vitesse radiale nette maximale (v_r) peut être calculée de la manière suivante :

$$f_{\text{FRI}} > |f_{\text{D}}| = \frac{2 \cdot v_r \cdot f_{\text{tx}}}{c_0} \quad \text{où } f_{\text{D}} : \text{ est la différence de fréquence Doppler.}$$

$$f_{\text{tx}} : \text{ la fréquence transmise.} \quad (\text{III.4})$$

c_0 : la vitesse de la lumière dans le milieu.

$$v_r < \frac{c_0 \cdot f_{\text{FRI}}}{2 \cdot f_{\text{tx}}} \quad (\text{III.5})$$

Cette équation n'est valide que si le sens du décalage Doppler est connu : s'approchant ou s'éloignant du radar. S'il est inconnu, la vitesse non ambiguë est la moitié :

$$v_r < \frac{c_0 \cdot f_{\text{FRI}}}{4 \cdot f_{\text{tx}}} \quad (\text{III.6})$$

D'autre part, la portée maximale non ambiguë d'un radar est inverse à la fréquence de répétitions des impulsions, plus le temps d'écoute est long plus la portée est grande :

$$R_{\text{max}} < \frac{c_0}{2 \cdot f_{\text{FRI}}} \quad (\text{III.7})$$

En multipliant l'équation III.6 par l'équation III.7, on trouve une constante qui ne dépend que de la fréquence de transmission du radar :

$$R_{\text{max}} \cdot v_r < \frac{c_0^2}{8 \cdot f_{\text{tx}}} \quad (\text{III.8})$$

La variation de la fréquence de répétition des impulsions a donc un effet inverse sur la portée et la vitesse maximale non ambiguës : si on augmente f_{FRI} , la vitesse non ambiguë augmente mais la portée diminue, et vice-versa si on diminue f_{FRI} . C'est ce qu'on appelle le « dilemme Doppler ».

- **Résolution Doppler**

Lorsque le signal reçu est décalé par effet Doppler, l'entrée du filtre adapté diffère du signal auquel il a été adapté. La réponse du filtre adapté à son signal après décalage Doppler est décrite par une extension bidimensionnelle de la fonction d'autocorrélation, dite fonction d'ambiguïté. Une propriété importante de la fonction d'ambiguïté est que le volume en dessous

est une constante. Entre autres choses, cela signifie que l'amélioration de la résolution du retard doit se faire au détriment de la résolution Doppler réduite.

La résolution en distance a été obtenue en utilisant une impulsion courte et en la modulant en fréquence ou en phase afin d'augmenter sa bande passante de fréquence. D'autre part, la résolution de la vitesse (Doppler) peut être améliorée en augmentant la durée de l'impulsion. Un signal dont la fonction d'ambiguïté présente un pic étroit à la fois dans les axes retard et Doppler est un train cohérent de M impulsions. Avec un tel signal, la résolution en distance est proportionnelle à la largeur d'une seule impulsion, tandis que la résolution Doppler est inversement liée à la durée de l'ensemble du train d'impulsions $1/(MTR)$:

$$\Delta v = \frac{\lambda \Delta f_d}{2} = \frac{\lambda f_r}{2N} \quad (\text{III.9})$$

- **Vitesse aveugle**

La vitesse aveugle, ou d'aveuglement, est la vitesse radiale d'une cible-radar qui échappe à la visualisation des cibles mobiles (VCM) parce qu'elle est considérée comme un écho fixe ayant une vitesse nulle. En effet, la vitesse est notée par le déphasage entre des impulsions successives revenant de la cible ou de décalage en fréquence entre la porteuse et l'écho de retour. La vitesse aveugle dépend donc de la fréquence de la porteuse et de la PRI du radar par :

$$v_{\text{aveugle}} = \frac{\lambda}{2 \cdot Tr} \quad \text{où : } v_{\text{aveugle}} = \text{multiple de la vitesse aveugle.}$$

$$\lambda = \text{longueur d'onde de l'impulsion.} \quad (\text{III.10})$$

$$Tr = \text{période de répétition de l'impulsion (PRI).}$$

La vitesse aveugle est donc la vitesse radiale à laquelle une cible, doit se déplacer pour que le décalage Doppler soit exactement de $\pm n \cdot 360^\circ$ entre deux impulsions successives. Le VCM la considérera alors comme un écho de sol et l'éliminera.

III.3.5. Détecteur de phase en sinus et cosinus (I&Q)

La détection synchrone est une technique de traitement du signal hétérodyne permettant d'extraire des signaux de faible amplitude, mais à bande étroite, noyés dans du bruit important, à large bande, par multiplication du signal par un signal sinusoïdal de fréquence proche de celle de la fréquence moyenne à détecter. Les nouveaux radars utilisant

la technologie monopulse n'émettent qu'une impulsion à la fois et il est donc nécessaire de pouvoir extraire la partie donnant la phase, la partie imaginaire du nombre.

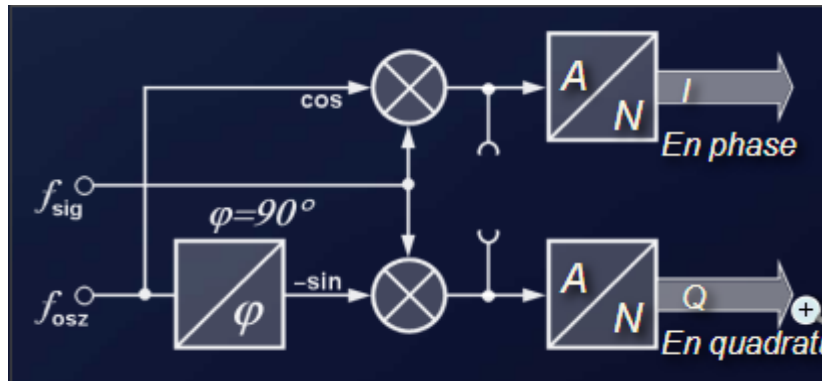


Figure III.13 : Schéma du circuit du détecteur synchrone.

Le détecteur synchrone permet une telle décomposition du signal de la fréquence intermédiaire sans perte d'information. La bande de base du signal en phase (I) et en quadrature de phase (Q) sont numérisés en utilisant une paire de convertisseurs analogue-numériques. Le détecteur synchrone est aussi appelé un récepteur de phase, un détecteur de quadrature de phase, un démodulateur I/Q ou un détecteur cohérent.

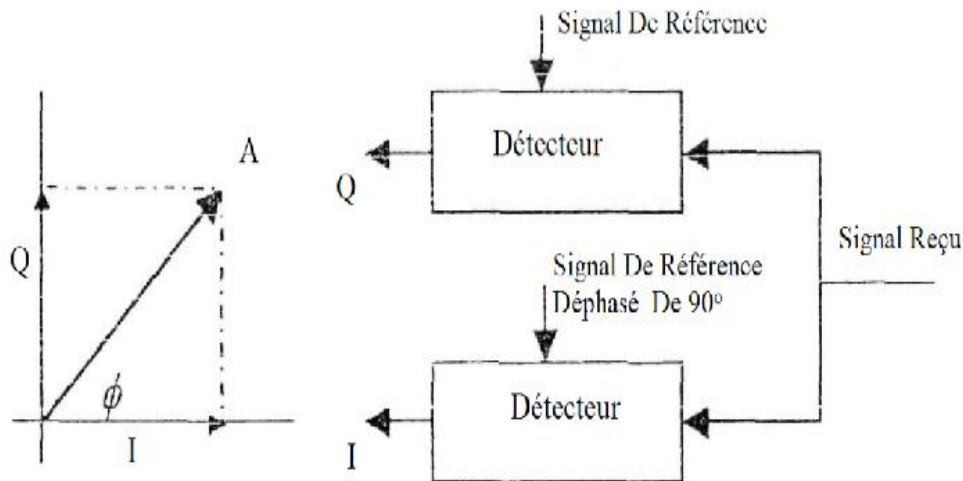


Figure III.14 : Détecteurs synchronisés.

L'idée derrière ce détecteur est tourner le signal de 90°, telle sorte que la partie imaginaire devienne celle qui est projetée sur l'axe des X et puisse être numérisée par le second détecteur. Même si on perd la valeur de la partie réelle, on peut l'extraire grâce au théorème de Pythagore. Comment effectuer cette rotation : il s'agit d'introduire un changement de phase de 90° du signal par un déphaseur. Ainsi, le signal du récepteur radar est divisé en deux,

le premier signal passe directement dans le convertisseur analogue-numérique (A/N) et le second passe par le déphaseur avec le second convertisseur.

Les deux données de sortie peuvent ensuite être traitées par un logiciel approprié. Les composantes I et Q sont reliées entre elles par :

$$I = A \cos (\Phi) \quad (\text{III.11})$$

$$Q = A \sin (\Phi) \quad (\text{III.12})$$

Φ est la phase de l'onde vidéo venant du récepteur et l'intensité du signal est simplement :

$$A^2 = I^2 + Q^2 \quad (\text{III.13})$$

La phase Φ sera calculée par :

$$\Phi = \arctan (Q/I) \quad (\text{III.14})$$

III.3.6. Filtrage Doppler

Le filtrage Doppler consiste à implémenter la Transformée de Fourier Discrète (TFD) pour la transformation du signal en spectre tel que pour une suite d'échantillons disponibles $\{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ le plus souvent obtenue à partir d'une opération d'échantillonnage d'un signal à temps continu, la TFD s'écrit :

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi f n} \quad (\text{III.15})$$

Avec $f \in [0, 1]$ se limitant à un nombre fini de L valeurs de la fréquence ($f = \frac{k}{L}$) avec $k \in \{0, 1, \dots, L-1\}$. L est le nombre de point de calcul de la TFD (nombre de fréquences discrètes), il influe sur la précision spectrale. N est le nombre de points de la suite temporelle $x(n)$, il influe sur la résolution spectrale. Cette opération est pratiquée sur les voies I et Q, le nombre L donne L fréquences (soit vitesses) différentes et l'échantillon spectral le plus représentatif est retenu.

Chapitre IV

Simulation et résultats

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux signaux radar et à leur traitement numérique. Dans Tout d'abord, nous générons un signal LFM et vérifions ses propriétés. La deuxième étape, nous Simuler la chaîne de traitement de l'écho reçu pour extraire la distance à la cible. Cette Impulsions LFM de longue durée (impulsion longue) et de courte durée (impulsion courte) du radar ATCR 33S sera utilisé pour comprendre son fonctionnement et ses performances. Pour la représentation réelle des chaînes I et Q du processeur, l'utilisation de signal radar sera très compliquée. Un bruit additif aléatoire est généré selon la loi de Gauss, et le résultat est Commenté les différents rapports signal/bruit. Un filtre approprié sera simulé dans les emplacements suivants par sa réponse impulsionnelle, c'est le conjugué du signal émis par LFM. Le filtre adapté obtenu par le produit de convolution sera vérifié et commenté. Une seconde simulation sera consacrée au traitement des échos pour l'extraction du décalage doppler et la vitesse de la cible.

Pour les simulations et les résultats obtenus, on a utilisé le logiciel MATLAB.

IV.1. Logiciel MATLAB

MATLAB ‘‘Matrix Laboratory’’ est un langage de script2 émulé par un environnement de développement du même nom, il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB (environ 4 millions en 2019) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des boîtes à outils ‘‘toolboxes’’. Les avantages relevés pour la solution Matlab sont :

- Sa richesse : l'environnement Matlab comporte une palette d'outils s'adressant à de très nombreux domaines.
- La finition : l'offre Matlab constitue un ensemble cohérent, soigné et fiable.
- C'est un standard de fait, enseigné dans la plupart des écoles et universités, ce qui facilite les échanges entre utilisateurs.
- la documentation livrée avec Matlab est excellente, complète et professionnelle.
- Programmation infiniment plus rapide pour le calcul et pour l'affichage.

-Une aide très bien faite.

-Possibilité d'exécuter des codes en dehors du programme.

IV.2. Propriété temporelles et spectrales du signal radar LFM

Le signal radar LFM de base est une impulsion exprimée par :

$$e^{j\pi w \frac{t^2}{\tau}} \quad (IV.1)$$

$$\text{Avec : } -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}$$

Le signal $s(t)$ échantillonné sur la durée τ s'écrit :

$$s_e(t) = s(t) \cdot \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \delta(t - nt_e) \quad (IV.2)$$

Avec N le nombre d'échantillons sur la durée τ :

$$N = \frac{\tau}{T_e} = \tau p W$$

En utilisant la propriété de décalage du peigne de Dirac :

$$s_e(t) = s(t) \cdot \sum_{n=0}^N \delta\left(t - \left(n - \frac{N}{2}\right) t_e\right) \quad (IV.3)$$

$$s_e(t) = \sum_{n=0}^N s(t) \cdot \delta\left(t - \left(n - \frac{N}{2}\right) t_e\right) \quad (IV.4)$$

$$s_e(t) = \sum_{n=0}^N s\left(\left(n - \frac{N}{2}\right) t_e\right) \cdot \delta\left(t - \left(n - \frac{N}{2}\right) t_e\right) \quad (IV.5)$$

Ainsi, on obtient une forme discrète du signal qui s'écrit :

$$s_n = e^{j\frac{2\pi}{2\rho^2 W \tau} \left(n - \frac{N}{2}\right)^2} \quad (IV.6)$$

De la forme :

$$s_e(n) = e^{j2\pi\alpha \left(n - \frac{N}{2}\right)^2} \quad (IV.7)$$

$$0 \leq n < N$$

Avec :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2\rho^2\tau} \\ N = p\tau W \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Avec :

W : (BF) bande de fréquence occupée par le signal.

τ : Durée de l'impulsion.

P : Constant.

Cette formule a été utilisée pour la génération des séquences discrètes du signal radar LFM. La figure IV.1 représente la forme de l'impulsion LFM. On remarque que la fréquence diminue pendant la première demi période selon une loi linéaire puis augmente selon la même loi dans la 2ème demi période (période : durée de l'impulsion LFM). On aperçoit un décalage de 90° entre les parties réelle et imaginaire de l'impulsion LFM.

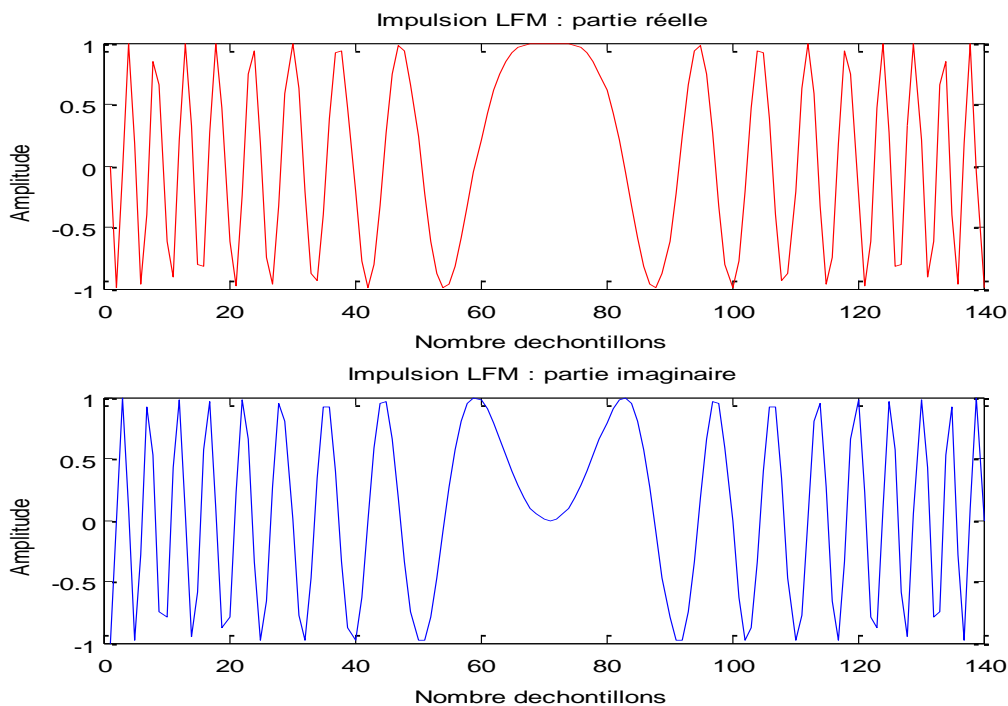


Figure IV.1 : Forme du signal LFM.

Le spectre du signal LFM obtenu par application de la transformée rapide de Fourier (fft) est illustré dans la figure IV.2. Nous constatons que la densité spectrale de puissance du signal LFM prend une forme presque rectangulaire dans sa largeur de bande.

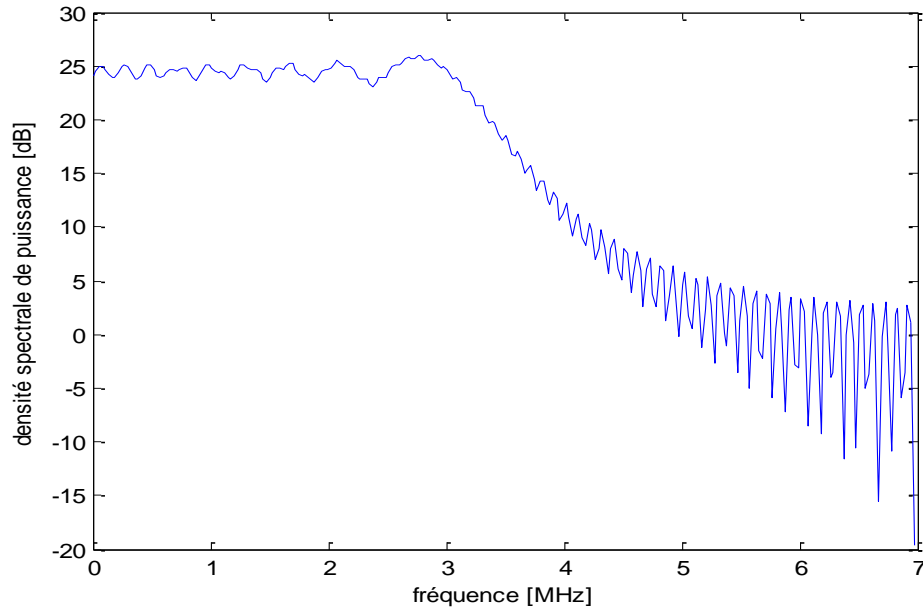


Figure IV.2 : Spectre du signal LFM.

IV.3 Traitement en vitesse

Pour détecter la vitesse d'une cible, le radar augmente le temps de mesure en générant un train d'impulsion LFM. La figure IV.3 illustre un train d'impulsions LFM composé de 10 impulsions de durée (τ) de 10^{-6} s et de période de répétition (IPP) de 0.1ms ce qui donne une fréquence de répétition (PRF) de 10kHz. La PRF est un paramètre radar important qui détermine l'ambiguïté distance et l'ambiguïté doppler.

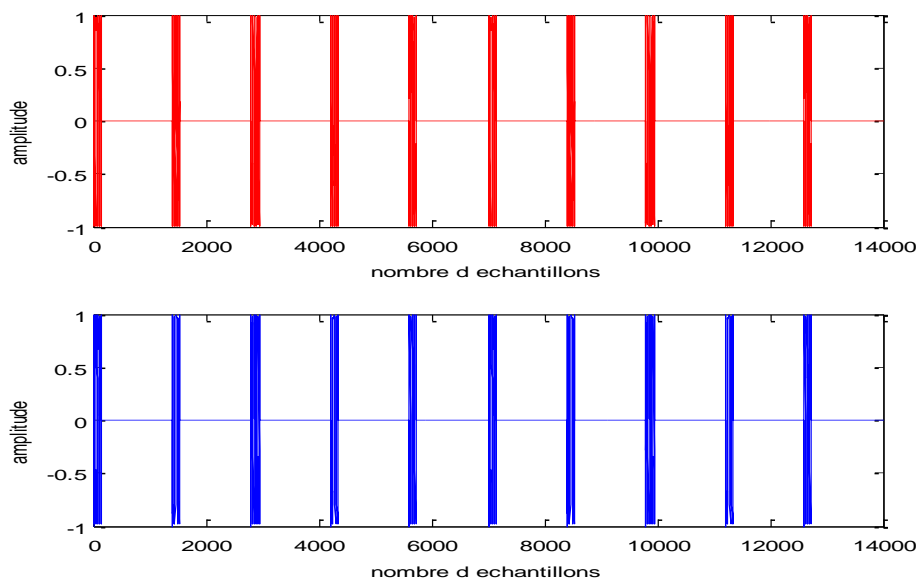


Figure IV.3 : Train d'impulsions LFM.

Une réception radar est toujours accompagnée d'un bruit additif de forme aléatoire. La figure IV.4 décrit la génération d'un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et variance 1. Le bruit affecte les deux chaînes I et Q, donc il est généré sous forme complexe.

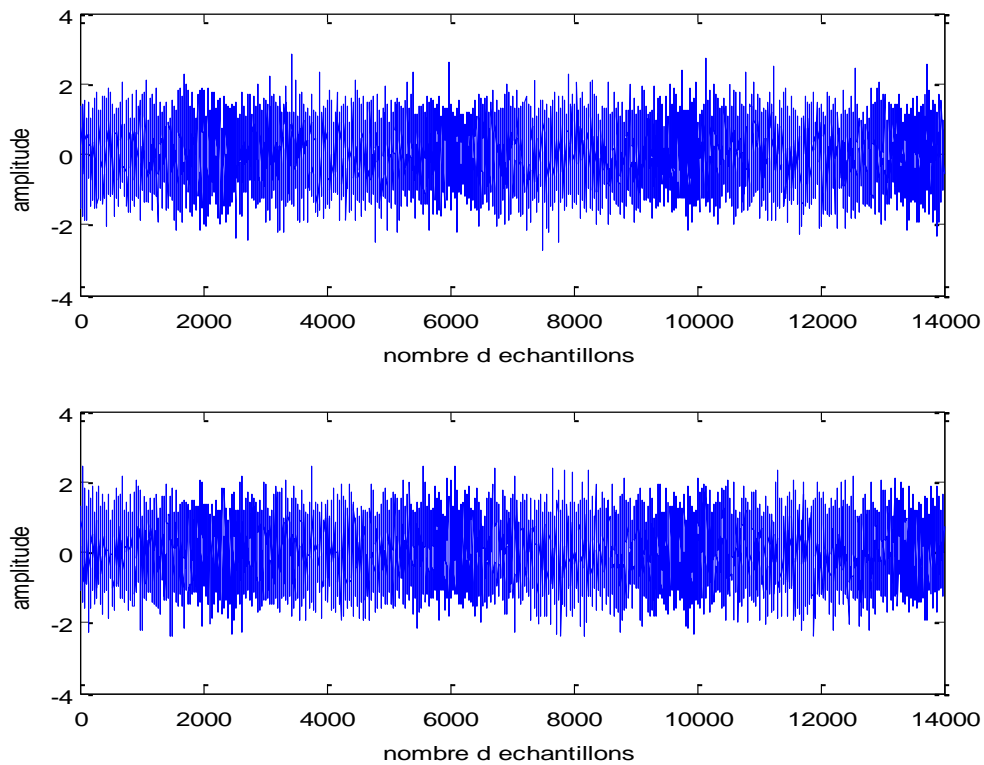


Figure IV.4 : Bruit blanc gaussien des chaines radar I et Q.

La figure IV.5 montre le train d'impulsions LFM bruité. Le bruit prend des valeurs aléatoires qui s'ajoutent à l'amplitude du signal sur toute la durée du train d'impulsions. Le bruit peut être très intensif jusqu'à avoir un signal complètement noyé dans le bruit. On mesure le fait de bruit à travers le rapport signal au bruit $SNR=10dB$. Plus le SNR est élevée, moins est significatif le bruit.

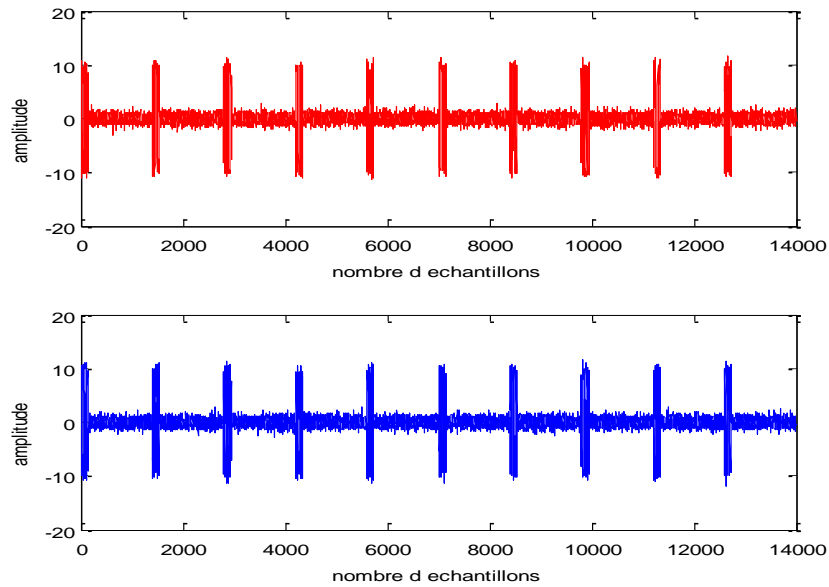


Figure IV.5 : Train d'impulsions LFM bruité.

IV.3.1. Compression d'impulsion

L'opération de compression d'impulsion est simulée par un filtrage adapté. Cette étape est essentielle pour la détection des échos radar. Le filtre adapté utilisé dans ce travail possède une réponse impulsionnelle qui est le conjugué du signal LFM (figure IV.6). Le signal obtenu à la sortie du filtre adapté par convolution est représenté dans la figure IV.7. Les pics obtenus représentent une maximisation du signal. En conséquence, le SNR après compression est amélioré à 34 dB.

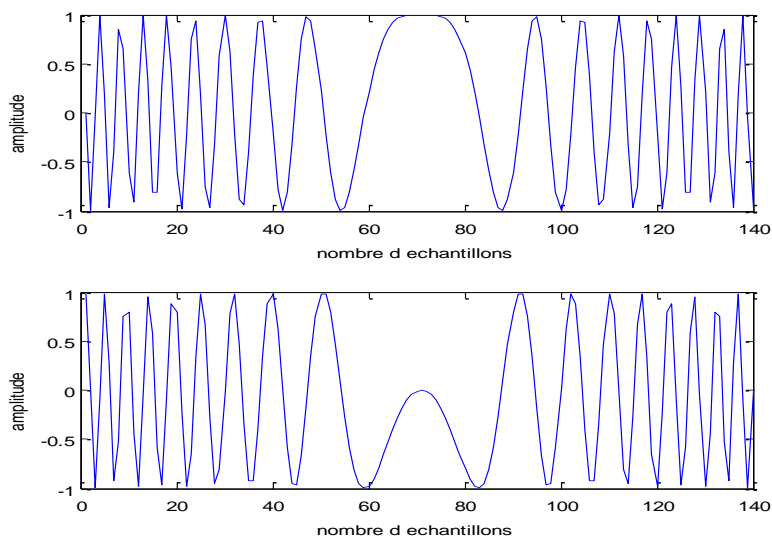


Figure IV.6 : Réponse impulsionnelle du filtre adapté.

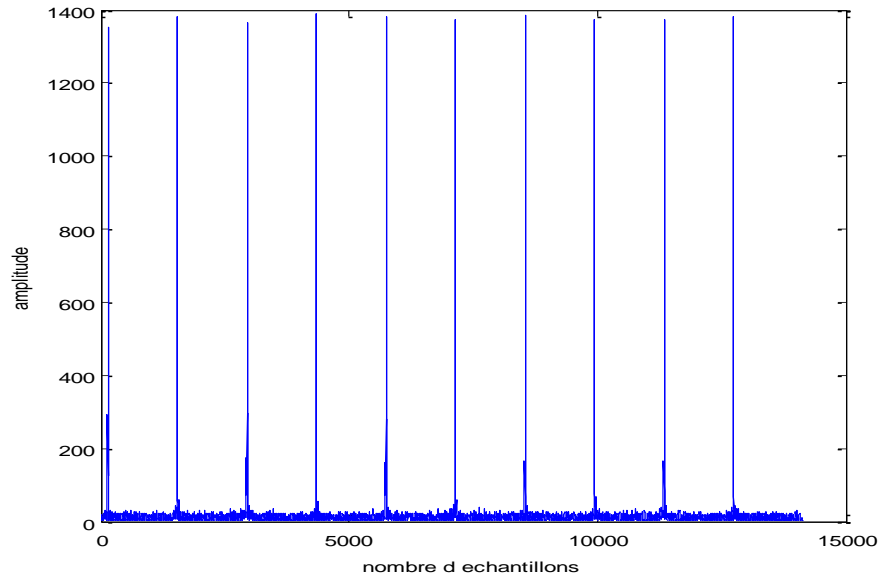


Figure IV.7 : Sortie du filtre adapté.

IV.3.2. Filtrage Doppler numérique

On sous-entend par filtrage doppler numérique l'application de la Transformée de Fourier Discrète (DFT) sur la série des échantillons radar (I, Q) afin d'estimer le décalage Doppler et déterminer la vitesse de la cible. Pour cela, la sortie du filtre adapté a été échantillonnée à la PRF et puis le spectre doppler a été obtenue par exécution de la transformée rapide de Fourier (FFT). Le spectre doppler représente la densité spectrale de puissance du signal en fonction de la fréquence.

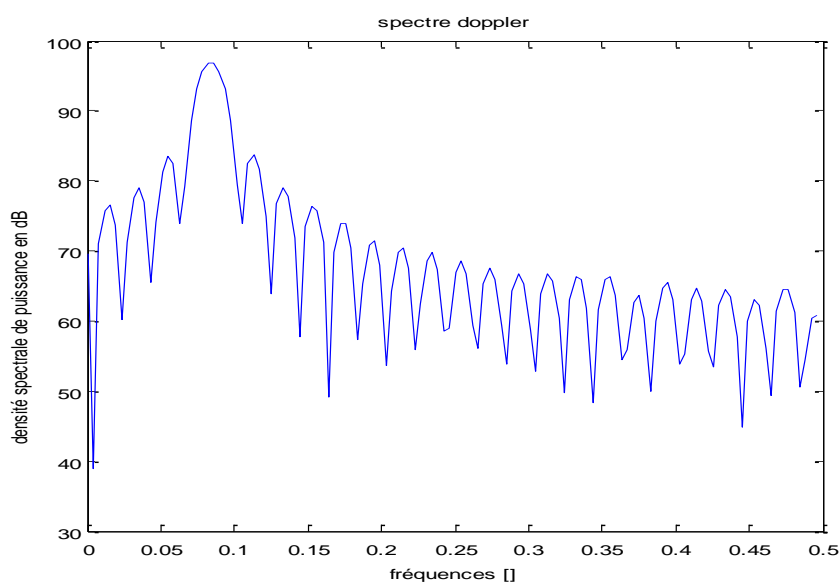


Figure IV.8 : Spectre doppler en fréquences normalisées.

La figure IV.8 illustre un exemple de spectre Doppler obtenu pour une variance de bruit de 10 et une rafale de 50 impulsions LFM de PRF égale à 3.33kHz, ceci induit un SNR de -15dB. Nous constatons (figure IV.8) un pic de puissance à la fréquence normalisée 0.08 ce qui correspond à une vitesse de 57km/h dans la figure IV.9. Sachant que l'écho doppler généré présentait un décalage de 280 Hz équivalent à une vitesse de 56 km/h. le SNR à la sortie du filtre adapté est 21 dB.

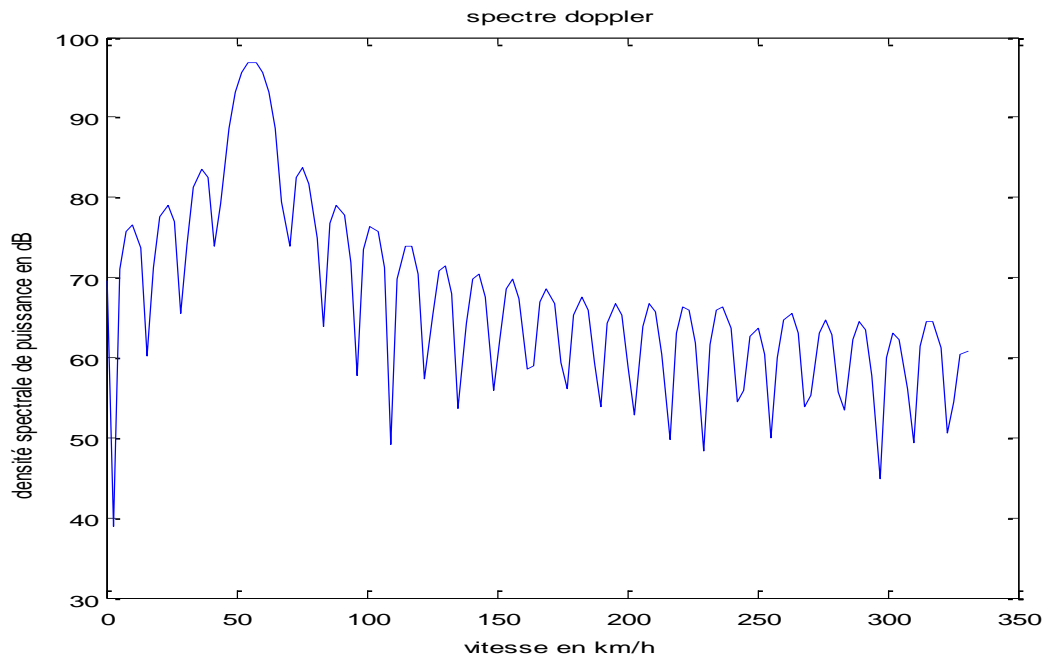


Figure IV.9 : Spectre doppler en vitesse.

- **Effet de la PRF**

Une autre simulation a été faite pour une rafale de 50 impulsions LFM de PRF égale à 2 kHz, avec un SNR de -17dB. Nous constatons un pic de puissance à la fréquence normalisée 0.1992 ce qui correspond à une vitesse de 79.68 km/h dans la figure IV.10. Sachant que l'écho doppler généré présentait un décalage de 400 Hz équivalent à une vitesse de 80 km/h. le SNR à la sortie du filtre adapté est 21 dB.

La figure IV.11 suivante illustre un exemple de spectre Doppler avec ambiguïté. Un écho Doppler de fréquence 1.05 kHz a été introduit dans une rafale de 50 impulsions LFM à une PRF de 2 kHz et un SNR de -17 dB. Le spectre indique une vitesse correspondante fausse.

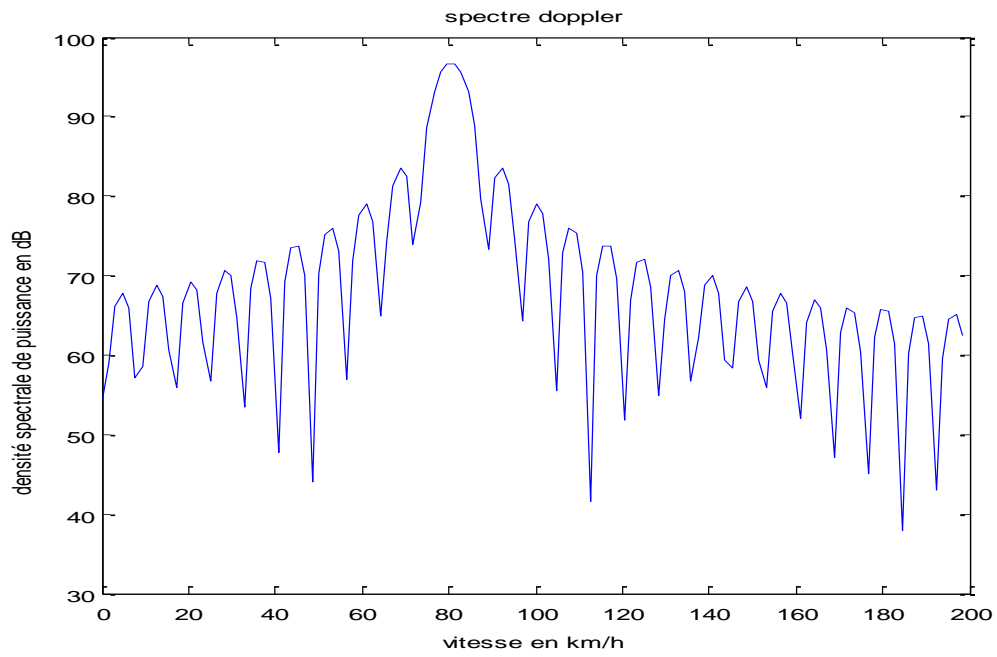


Figure IV.10 : spectre doppler en vitesse en km/h.

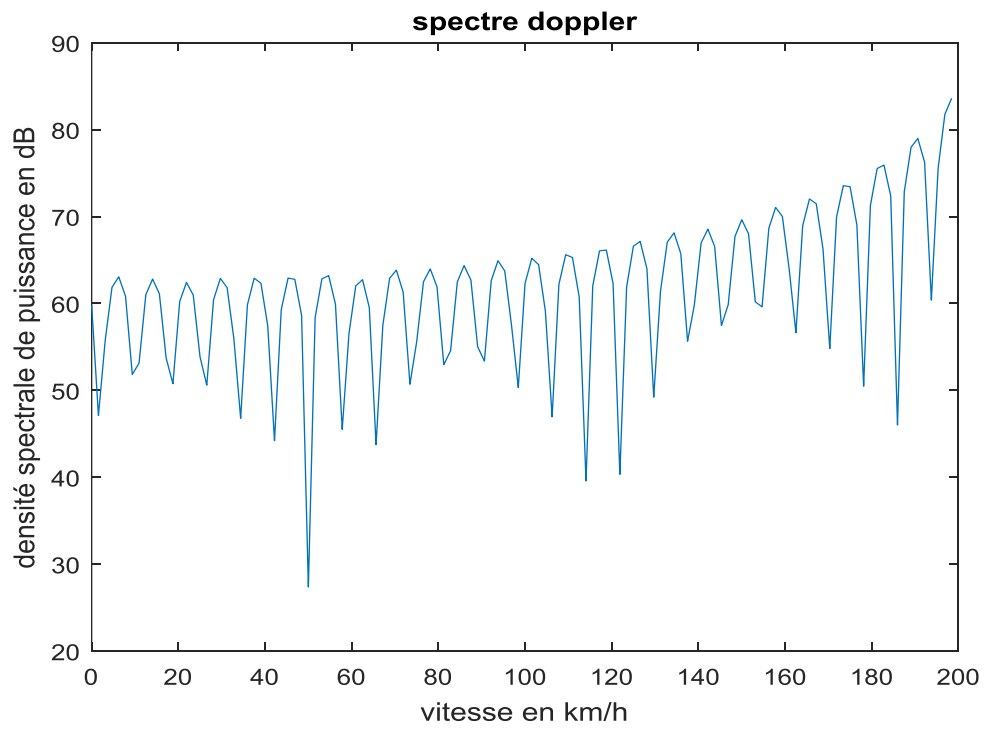


Figure IV.11 : spectre doppler avec ambiguïté.

- **Effet de la taille de l'enregistrement radar sur le spectre Doppler**

Dans ce qui suit, on montre l'effet de la taille de l'enregistrement radar sur le spectre Doppler par la génération d'une rafale de 10 impulsions LFM à un SNR de -17 dB et une PRF de 2 kHz. Le spectre obtenu sur la figure IV.12 montre que la réduction du nombre d'impulsion induit une dégradation du spectre doppler. La vitesse détectée est 75 km/h au lieu de 80 km/h. un manque de précision significatif pour la vitesse estimée qui est du à la réduction du nombre de fréquences normalisées de la TFD (comme si on a réduit la structure du banc de filtres dans l'implémentation de la TFD). Le SNR à la sortie du filtre adapté est 21 dB.

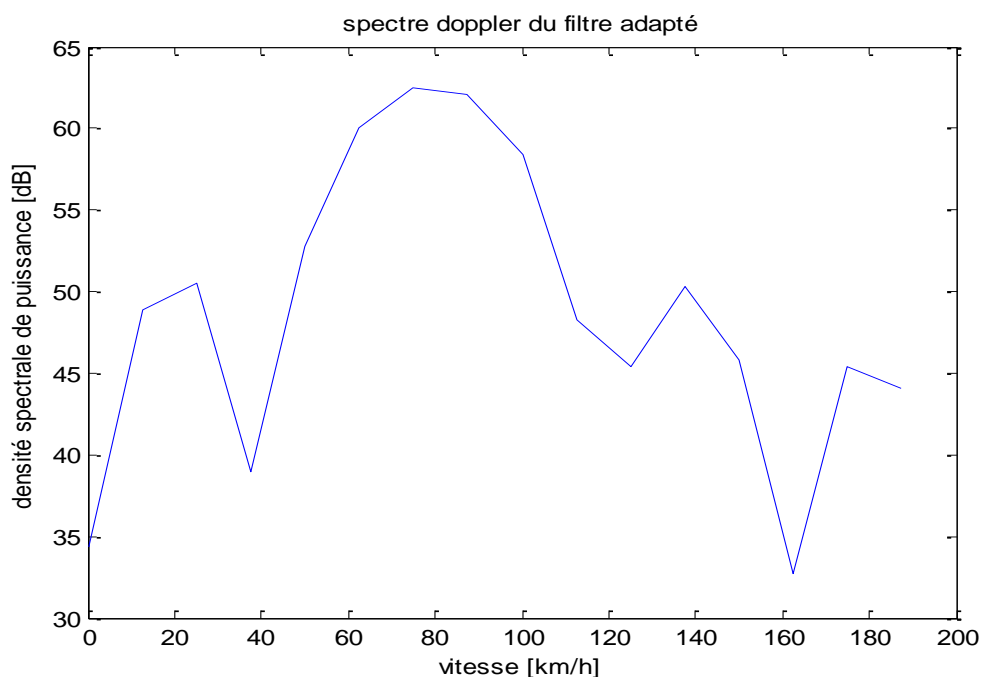


Figure IV.12 : Spectre Doppler pour une rafale de 10 impulsions LFM.

- **Effet du bruit sur le spectre Doppler**

Pour tester l'effet du bruit sur le spectre Doppler, nous avons mené une simulation avec une rafale de 50 impulsions LFM noyées dans un bruit blanc gaussien de variance 100 (figure IV.13). Nous constatons également l'intensité du bruit généré sur la figure qui illustre la sortie du filtre adapté (figure IV.14). Le spectre Doppler obtenu (figure IV.15) présente des fluctuations importantes à cause du bruit, mais grâce au filtre adapté la vitesse (79.68 km/h) reste détectable. Le SNR à la sortie du filtre adapté est 21 dB.

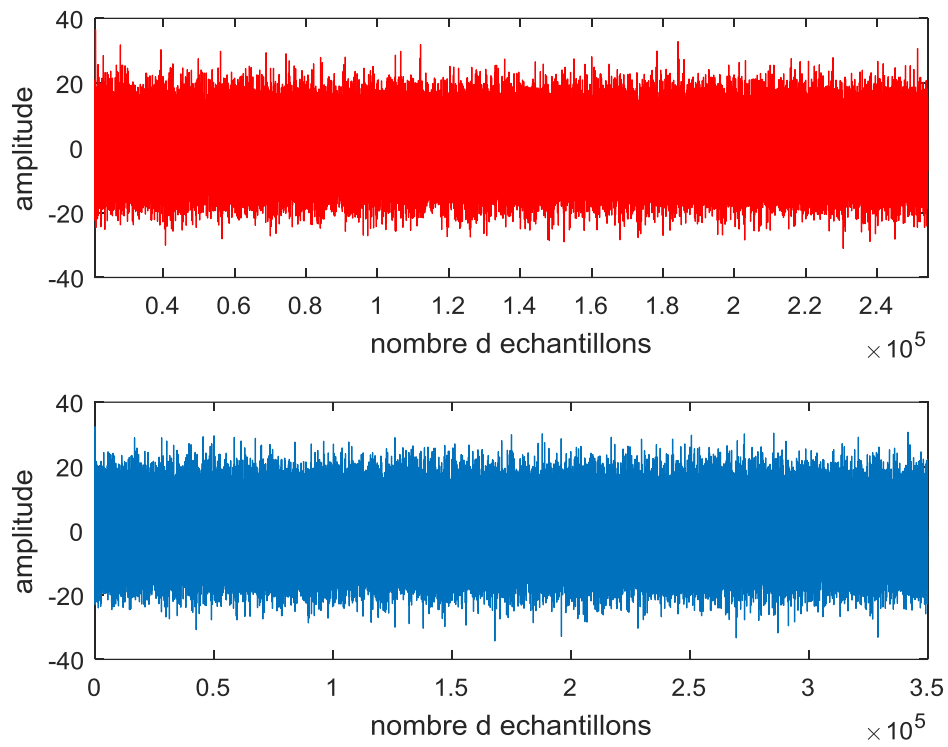


Figure IV.13 : train d'impulsion LFM noyé dans un bruit (SNR=37 dB).

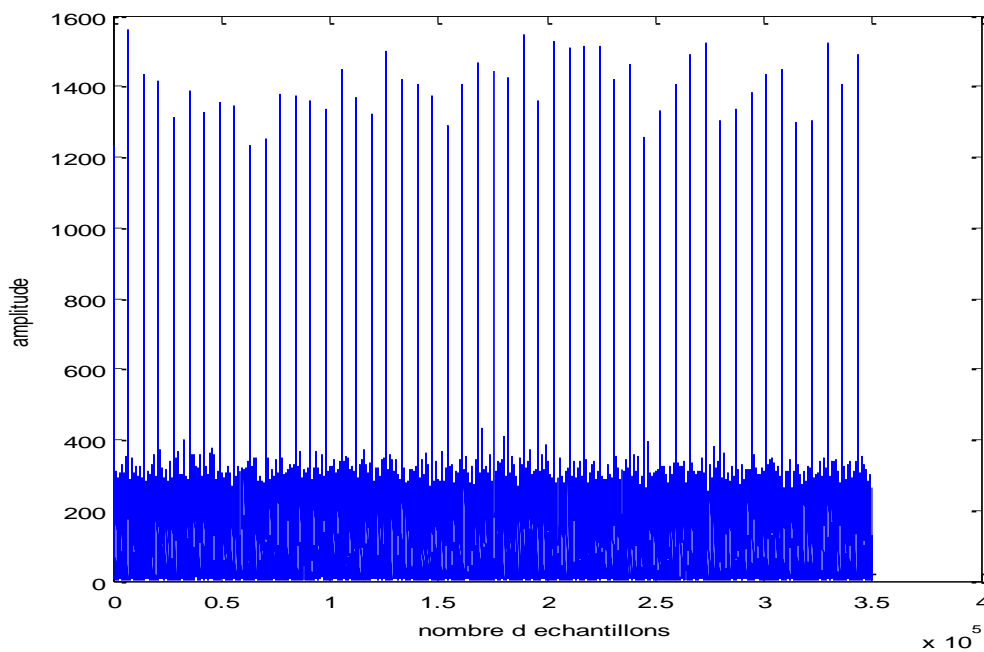


Figure IV.14 : sortie de filtre adapté.

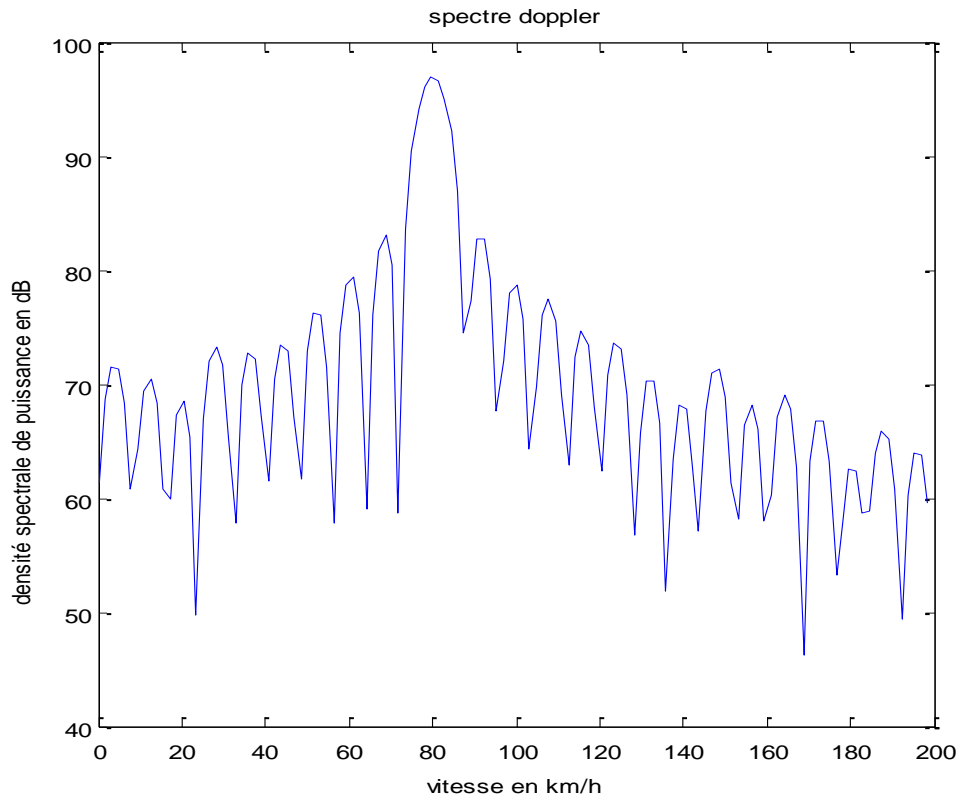


Figure IV.15 : spectre doppler en vitesse en km/h.

- **Résolution Doppler**

Pour vérifier la résolution Doppler, nous avons mené une simulation pour laquelle le signal radar se compose d'une rafale de 50 impulsions LFM, comportant deux échos à deux décalages Doppler distincts de 280 Hz et 322 Hz respectivement. Le SNR étant à -10 dB. Les deux vitesses correspondantes sont détectées sur le spectre Doppler estimé, le pic le plus intense donne une vitesse de 65.62 km/h, le second est à 56.25 km/h (vitesses réelles : 64.4 km/h et 56 km/h respectivement). Le SNR à la sortie du filtre adapté est 22 dB et la PRF à 2 kHz.

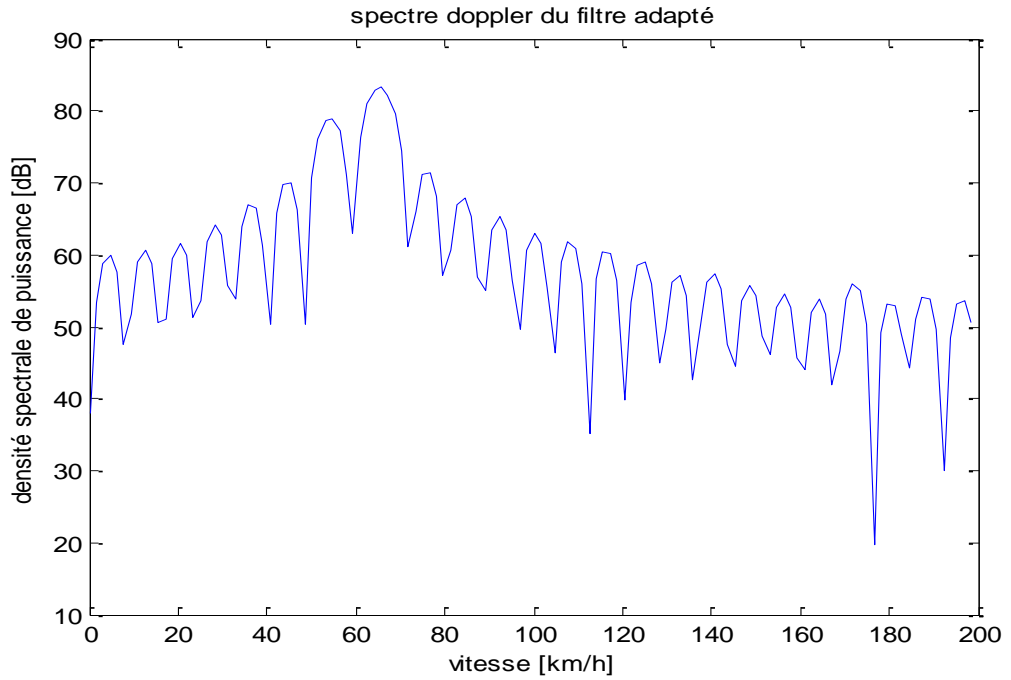


Figure IV.16 : spectre doppler avec résolution de deux vitesses.

Dans la figure IV.17 suivante, on maintient les mêmes données pour les deux échos et on change la PRF à 3.33 kHz, en résultat les cibles ne sont pas résolues, ce qui énoncé théoriquement.

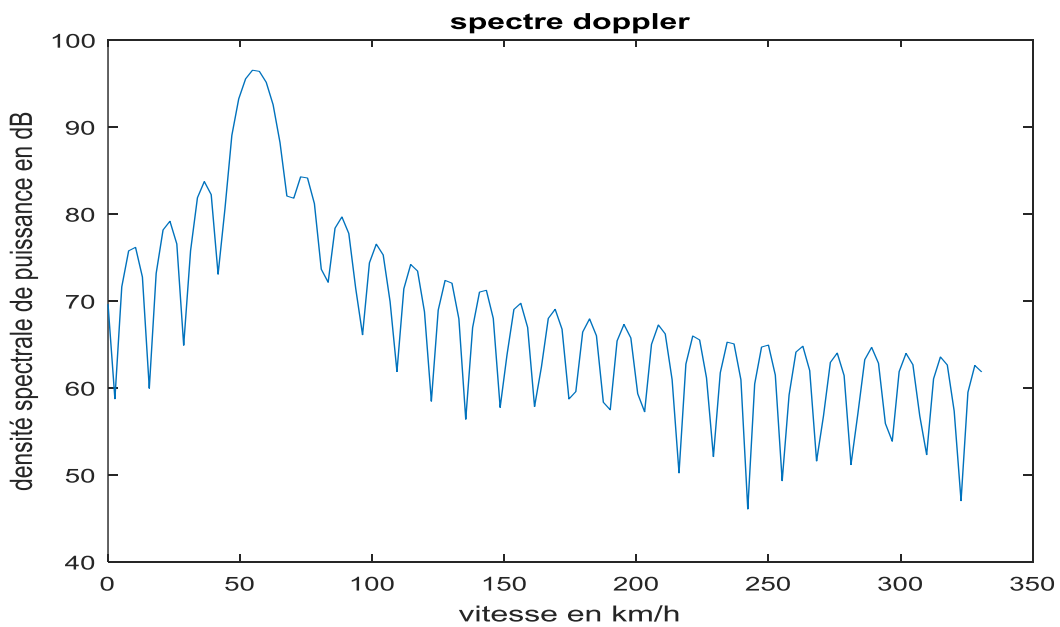


Figure IV.17 : spectre doppler avec deux vitesses non résolues.

Conclusion générale

Ce travail a été effectué dans l'objectif de comprendre le principe et les fonctions du radar ATCR 33S disponible à l'établissement Nationale de la navigation aérienne (ENNA). Le radar ATCR-33S est un radar Doppler pulsé à compression d'impulsions. Il est conçu pour détecter les aéronefs non coopératifs et convient pour le contrôle du trafic aérien de la zone terminale et des voies aériennes.

Ce radar effectue des mesures de distance et de vitesse, le traitement en vitesse nécessite l'émission d'un train Impulsion LFM. Dans le récepteur radar les fonctions de compression d'impulsion et filtrage Doppler sont exécutées en première étape pour l'estimation du décalage Doppler. La vitesse d'une cible mouvante implicitement liée à ce décalage en fréquence. L'ATCR-33S utilise cette technique afin d'acquérir de meilleures performances.

Dans ce contexte, l'accomplissement de ce travail nous permis de :

- Simuler une impulsion LFM et vérifier ses propriétés temporelles et fréquentielles,
- Simuler un train d'impulsions LFM affecté par un bruit blanc Gaussien à variances différentes.
- Simulation de la fonction de compression d'impulsion par un filtre adapté de réponse impulsionnelle égale au conjugué du signal LFM, le terme adapté fait allusion à l'amélioration du rapport signal au bruit (SNR) obtenue à la sortie du filtre,
- La simulation du filtrage Doppler nous a permis de se familiariser avec l'algorithme de la transformée rapide de Fourier (FFT) et d'obtenir des spectres en fréquences normalisées, en fréquences et en vitesses,
- Nous avons également vérifié l'effet du bruit, de la PRF, de la longueur de l'enregistrement radar sur le spectre Doppler,
- Concrétiser certaines notions de traitement numérique du signal radar,
- Enrichir l'exercice du logiciel Matlab.

Bibliographie

- [1] ATCR33S-DPC EQUIPMENT (TX10KW) TECHNICAL MANUEL TM-RS-2000_02-1_ATC33S_DPC_10KTX.
- [2] Fadhéla Othmane : "cours Radar", Institut d'aéronautique et d'étude spatial.
- [3] Christian Wolff et Pierre Vaillant, « **Radars de contrôle aérien** ».
- [4] Léopold FACY, « **PRÉCIPITATIONS, météorologie** ».
- [5] Merrill Skolnick, **"Radar hand book"**, éditions : chief.
- [6] Gérard Blanchet et Maurice Charbit, **"traitement numérique du signal simulation sous Matlab"**, édition hermes, Paris, 1998.
- [7] Gérard Blanchet et Maurice Charbit, **"Signaux et images sous Matlab"**, Science Europe Ltd, Paris, 2001.
- [8] Bouabellah Yazid, Larbi Mouhamed, **"Etude et simulation de la chaine de récepteur d'un radar à compression d'impulsion"**, thèse du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique, option Installations, université de Blida 1, année 2006/2007.
- [9] ATCR 33S-DPC RECEIVER TECHNICAL MANUAL TM-RS-9905-1_ATC33S_DPC_RX.
- [10] IPhO-BRUNEL-05-Doppler.pdf
- [11] <https://www.enna.dz/historique.htm>
- [12] <https://www.radartutorial.eu>
- [13] <https://www.aeroexpo.online/aeronautic-manufacturer/primary-radar-1436.html>
- [14] <https://www.scribd.com/document/74056425/atcr33>
- [15] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/precipitations-meteorologique>

