

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

THESE DE DOCTORAT

En Aéronautique

Spécialité : Aéronautique

UTILISATION DE CONCEPT CNS-ATM POUR L'AMELIORATION DE
LA GESTION DU TRAFIC AERIEN ALGERIEN

Par

Abdelkader BOUDANI

S. BOUKRAA	Professeur, Université de Blida 1	Président
B. HADDAD	Professeur, Université de l'USTHB	Examineur
A. MELLIT	Professeur, Université Jijel	Examineur
M. DAOUDI	Associate Professor, King Abdulaziz University, Saudi Arabia	Examineur
M.LAGHA	Professeur, Université de Blida 1	Examineur
S.BERGHEUL	Professeur, université de Blida 1	Directeur de thèse

Blida, Mai 2019

RESUME

ملخص

الوضع الحالي لمحطات الرادار في الجزائر، وهران، عنابة، الوادي و البيض لا يغطي كامل المساحة في الشمال الجزائري اذ نجد بعض المناطق غير مغطاة مثل بوسعادة، غرب قسنطينة و بسكرة، هذه الوضعية تستطيع أن تحدث بعض العراقيل و بعض الاخطار في أداء عمل المراقبين الجويين.

لهذا السبب أنشأنا دراسة مقارنة لا نشاء محطة رادار جديدة. الدراسة التمهيدية تقترح موقعين اضافيين لحل

هذه المشكلة، هما الشريعة (36° 25' 32"N-002° 25' 36")

و أكفادو (36° 04' 36" N-004° 37' 15").

اذا هذه الدراسة تثبت أن الموقع الشريعة هو الأنسب لتغطية هذا المشكل.

الكلمات المفتاحية: تغطية الرادار، الفضاء الجوي الجزائري،

Abstract

Actually, the Implantation of radars in Algiers, Oran, Annaba, El oued, and El Bayadh, does not cover the totality of space in the Algerian north. In fact, the region of Boussaâda, ouest of Constantine and Biskra is not covered. This situation can create disasters.

For this reason, we have elaborated a simulation study of implantation for new radar station. Preliminary studies advance two locations for salve up this problem. CHREA (36° 25' 32"N-002° 52' 36"E) and AKFADOU (36° 04' 36"N-004° 37' 15"E). Our simulation shows that the location of CHREA is more adequate to seal the puncturing.

RESUME

Actuellement, l'implantation des stations radars d'Alger, d'Oran, Annaba, El Oued et El Bayadh ne couvre pas la totalité de l'espace du nord Algérien. En effet, la région de Boussaâda, ouest Constantine et Biskra n'est pas couverte. Cette situation peut engendrer des catastrophes.

Pour cette raison, nous avons établi une étude de simulation d'implantation d'une nouvelle station de radar. Les études préliminaires avancent deux sites susceptibles de résoudre ce problème à savoir de CHREA ($36^{\circ} 25' 32''\text{N}-002^{\circ} 52' 36''\text{E}$) et d'AKFADOU ($36^{\circ} 04' 36''\text{N}-004^{\circ} 37' 15''\text{E}$). Notre simulation montre que le site de CHREA est le plus adéquat, pour combler ce problème.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire des sciences aéronautique à l'institut d'aéronautique et des études spatiales- université de Blida 1-

Je voudrais tout d'abord remercier en lieu mon directeur de thèse. J'ai beaucoup appris à son contact : il m'a permis de progresser dans nombreux domaines tant scientifique que rédactionnels ou organisationnels. Donc, un Grand merci à Mr le professeur BERGHEUL Said, qui a accepté d'encadrer et de diriger les travaux de ma thèse, et ce par son conseils constructifs tant scientifiques ou techniques ainsi que son encouragements. et sa disponibilité dont vous avez fait preuve me touche beaucoup et me laisse penser que j'ai eu de la chance de vous rencontrer et de travailler sous votre guidance.

Je remercie Mr. Le Professeur REZOUG Tahar, Directeur de laboratoire des sciences aéronautiques pour son aide et ses conseils durant la réalisation de ce travail.

Je souhaite aussi faire part de ma gratitude aux membres de jury :

Mr. Pr. BOUKRAA Salah pour son acceptante d'être président du jury.

Et : Pr. HADDAD Boualam, Pr. MELLIT Adel, Pr. LAGHA Mohand et Pr. DAOUDI Mohamed, d'avoir accepté d'être examinateurs de mon travail de thèse.

Messieurs, ça me fait un grand plaisir de pris de votre temps qui est très cher pour lire. Corriger et critiquer le modeste travail que j'ai fait au cours de cette thèse période.

Je tiens à remercier Mr le Cne RAMDANI Mohamed, Cne BENAHMED Dahou, Cdt SABOUDJII amine et Ctne FIZI Mohamed de l'institut national de cartographie et de Télédétection, pour leurs aide que nous avons reçu de leurs part et notamment tous ce qui est base de donnée ainsi que les données topographiques.

Merci à tous ceux qui ont participé soit de proche ou de loin pour la finalisation de ce modeste travail.

TABLE DES MATIERS

RESUME.....	1
REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERS.....	4
LISTE DES ILLUSTRATIONS, FIGURES ET TABLEAUX.....	8
INTRODUCTION.....	13
CHAPITRE 1 L'ETAT D L'ART.....	15
1.1 Introduction.....	15
1.2 Généralités sur les espaces aériens.....	15
1.2.1 Les services de la circulation aérienne.....	15
1.2.2 Division de l'espace aérien.....	18
1.2.3 Classification des espaces aériens.....	22
1.2.4 Optimisation de l'espace aérien	24
1.3 Situation actuelle de l'espace aérien Algérie.....	27
1.3.1 Espace Aérien Algérien.....	27
1.3.2 Les routes aériennes.....	34
1.3.3 Mise en Oeuvre du RVSM, RNP, RNAV en Algérie.....	36
1.4 Moyens de Communication, Navigation, Surveillance.....	37
1.4.1 Communication.....	37
1.4.2 Navigation	39
1.4.3 Surveillance	41
1.5. Analyse de trafic.....	45
1.5.1 Introduction.....	45
1.5.2 Evolution du trafic aérodomes (2007-2017).....	47
1.5.3 Evolution du trafic de route (2007-2017).....	50
1.5.4 Evolution du trafic par secteur (2007-2017).....	51
CHAPITRE 2 ETUDE DE CONCEPT CNS-ATM.....	52
2.1 Introduction aux systèmes CNS-ATM.....	52
2.1.1 Evolution du trafic aérien	52
2.1.2 Le comité FANS	52

2.1.3	La dixième Conférence de navigation aérienne	54
2.1.4	Planification mondiale	54
2.1.5	Faiblesses des systèmes classiques	55
2.2	Aperçu sur les systèmes CNS-ATM.....	56
2.2.1	Définition.....	56
2.2.2	Vision stratégique	57
2.2.3	Missions de la mise en œuvre	57
2.3	Systèmes de communication.....	58
2.3.1	le rôle	58
2.3.2	Services de communication envisagés.....	58
2.3.3	Principales caractéristiques des nouveaux systèmes de communication .	58
2.3.4	Communication Air –Sol	59
2.3.5	Communication Sol-Sol	63
2.3.6	Questions générales relatives à la transition	64
2.4	Systèmes de navigation	64
2.4.1	l'objectif.....	64
2.4.2	Qualités de navigation requise (RNP)	65
2.4.3	Systèmes de navigation par satellite (GNSS)	66
2.4.4	Renforcements du GNSS	67
2.4.5	Avionique	69
2.4.6	Systèmes coordonnés WGS-84.....	69
2.4.7	Introduction progressive du système GNSS	70
2.5	Systèmes de surveillance actuels.....	71
2.5.1	Comptes rendus de position.....	71
2.5.2	Radar primaire de surveillance (PSR)	71
2.5.3	Radar secondaire de surveillance (SSR).....	72
2.5.4	Surveillance dépendante automatique (ADS)	72
2.5.5	Aperçu des options techniques.....	75
2.5.6	Besoins ATM en matière de surveillance.....	75
2.5.7	Performances de surveillance requises (RSP).....	76
2.5.8	Tendance future système de surveillance	76
2.5.9	Questions générales relatives à la transition.....	77
2.6	Aspects économiques des systèmes CNS-ATM.....	77
2.6 1	Introduction.....	77

2.6.2 Politique de l'OACI	78
2.7 Les avantages des nouveaux systèmes.....	79
2.7.1 Les avantages pour les compagnies aériennes	79
2.7.2 Avantage pour les états qui fournissent l'infrastructure de navigation aérienne.....	79
2.7.3 Aviation générale.....	80
2.8 Gestion du trafic aérien (ATM).....	80
2.8.1 Gestion de l'espace aérien (ASM)	81
2.8.2 Débit de la circulation aérienne de mesure (ATFM)	81
CHAPITRE 3 LES SYSTEMES DE SURVEILLANCE RADARS DU TRAFIC AERIEN.....	84
3.1 Introduction.....	84
3.2 Principes généraux des radars.....	84
3.2.1 Principe du radar	84
3.2.2 Classification des radars.....	86
3.2-2-1 Radar imageur	87
3.2.2.2 Radar primaire.....	87
3.2.2.3 Radar secondaire.....	88
3.2.3 Comparaison entre radar secondaire et primaire	89
3.2.4. Principe de fonctionnement d'un radar à impulsions.....	91
3.3 Équation de radar.....	98
3.3.1 Introduction	98
3.3.2 Établissement de l'équation du radar en espace libre.....	98
3.3.3 Influence des pertes sur la portée.....	101
3.3.4 Discussion de l'équation du radar.....	102
3.4 Applications des radars.....	102
3.4.1 Radar de surveillance.....	102
3.4.2 Altimètre.....	103
3.4.3 Mesure de niveau	104
3.5 Perturbations à l'exploitation radar primaire.....	104
3.5.1 Masque.....	104
3.5.2 Fausses alarmes (faux échos).....	104
3.6 Étude de radar de surveillance.....	105

3.6-1 Antenne à diagramme en cosécante carrée.....	106
3.6-2 Choix de la fréquence.....	107
3.6.3 Tracé de la couverture du radar.....	107
3.7 Composition d'une station radar.....	109
3.8 RADAR MODE "S".....	110
3.8.1 Généralités.....	110
3.8.2 Structure des signaux.....	111
3.9 Le transpondeur.....	112
3.9.1 Définition.....	112
3.9.2 Mode de fonctionnement	112
3.9.3 Rôle du transpondeur.....	113
3.9.4 Conclusion.....	114
CHAPITRE 4 SIMULATION ET INTERPRETATION DES	
RESULTATS.....	115
4.1 INTRODUCTION.....	115
4.2. l'étude des couvertures radar... ..	115
4.3. Les spécifications techniques et les données réelles	115
4.3.1 Le centre de contrôle régional CCR.....	118
4.3.2 La station radar d'Alger	119
4.3.3 Le flux d'information au niveau de la station Elaboration des couvertures radar.....	120
4.4. Elaboration des couvertures radar.....	121
4.4.1 Elaboration des couvertures radar via le logiciel Radio Mobile.....	121
4.4.2. Elaboration des bases de données topographiques... ..	126
4.5. L'organigramme de calcul (simulation).....	130
4.6 Résultats et Interprétation.....	134
4.7. Conclusion.....	139
CONCLUSION GENERALE.....	140
APPENDICE.....	142
REFERENCES.....	147

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES

Figure1.1 : Représentation du contrôle de trafic	17
Figure 1.2 : L'axe des voies aériennes est défini par des balises de radionavigation.	20
Figure 1.3 : La structure qui englobe CTA et CTR.	20
Figure 1.4 : Organisation de l'espace aérien.	21
Figure 1.5 : Niveaux de Croisières RVSM.	24
Figure 1.6 : Représentation des limites de l'espace aérien algérien.	28
Figure 1.7 : Sectorisation actuelle.	29
Figure.1.8 : Représentation des zones de contrôle.	30
La figure 1.9 : Présente plusieurs zones dangereuses DA Dxx	31
La figure 1.10 : Présente une zone Règlementé DA R98A	32
La figure1.11 : Présente une zone interdite DA P51	32
Figure 1.12 : les Espaces restreints en Algérie.	33
Figure.1.13 : Représentation des routes aériennes en Algérie.	35
Figure1.14: Représentation l'espace aérien R.V.S.M en Algérie.	37
Figure 1.15 : Couverture VHF actuelle.	38
Figure 1.16 : Couverture des Stations VOR	40
Figure 1.17 L'emplacement des Aides de navigation en Algérie.	40
Figure 1.18: Radar primaire/secondaire de surveillance	42
Figure.1.19 : Couverture Radar actuelle en Algérie	42
Figure 1.20 : Système TRAFCA.	44
Figure 1.21: L'organigramme de trafic d'aérodrome algérien	45
Figure 1.22 : L'organigramme de trafic géré par CCR d'Alger	46
Figure 2.1 : Représente les différentes utilisations du concept CNS-ATM.	57
Figure.2.2 : Représentation de la navigation par satellite.	65
Figure.2.3 : Représentation des systèmes de navigation par satellite (GNSS)	66
Figure.2.4 : Représente le système de renforcement du GNSS.	68
Figure.2.5 : Représentation de système ADS-B.	73
Figure.3.1 : Représente les deux chemins émission-réception du radar.	85
Figure.3. 2 : les classifications du système radar.	86

Figure.3. 3 : Représente les caractéristiques des signaux émis.	88
Figure.3. 4 : Radar à onde continue.	90
Figure.3. 5 : Modulation FM et mesure de distance.....	90
Figure.3. 6 : Représente un système radar bistatique.	91
Figure 3. 7 : Représente les Signaux émis et reçus du radar.	91
Figure.3. 8 : Représente un écho de second balayage à la distance réelle de 400km.	92
Figure.3. 9 : Représente l'azimut et l'angle de site β de la cible.	94
Figure.3.10 : Représente le calcul de la distance R et d'angle de site β .	95
Figure.3.11 : Représente la résolution en distance.	96
Figure.3.12 : Représente la résolution angulaire.	97
Figure.3.13 : Représente la cellule de résolution	97
Figure 3.14 : Écran radar (photo prise à la station radar d'El-Oued).	103
Figure.3.15 : Représente la composition d'un radar de surveillance.	105
Figure.3.16 : Représente le cône mort.	106
Figure.3.17 : le diagramme d'antenne en cosécante carrée.	106
Figure.3.18 : Représente la couverture en site en espace libre.	108
Figure.3.19 : Représente la Couverture en présence du sol.	108
Figure 3.20 : Moteur tournant l'antenne (photo prise à la station radar d'El-Oued	
Figure 3.21 : Interrogation mode S.	111
Figure 3.22: Commande SLS.	112
Figure 3.23 : Le transpondeur.	113
Figure 4.1 : Couverture des cinq sites radar.	116
Figure 4.2 : Les stations radars reliées au CCR en Algérie.	117
Figure 4.3 : Le centre de contrôle régional CCR.	118
Figure 4.4 : Présentation de la station radar d'Alger.	119
Figure 4.5 : Flux d'information dans la station d'Alger.	120
Figure 4.6 : Acquisition de la grille des altitudes sous Radio mobile pour le Nord algérien.	121
Figure 4.7: Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio Mobile.	122
Figure 4.8 : Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio Mobile.	123
Figure 4.9 : L'élaboration des couvertures radar.	124

Figure 4.10 : Élaboration des couvertures radar d'Alger, d'Oran et d'Annaba pour FL100.	124
Figure 4.11 : Représente la couverture radar à FL100 pour le site AKFADOU.	125
Figure 4.12 : Représente la couverture radar à FL100 pour le site CHREA.	125
Figure.4.13 : Représente la couverture radar à FL100 pour le site proposé à CHREA.	126
Figure 4.14 : Les différents reliefs de l'Algérie.	127
Figure 4.15 : Le tell algérien.	128
Figure 4.16 : L'atlas Saharien Algérien.	128
Figure 4.17 : Le Sahara Algérien.	129
Figure 4.18 : Précision des données topographiques collectée.	129
Figure 4.19 : Base de données topographique globale de l'Algérie.	130
Figure 4.20 ; L'organigramme de calcul (simulation.....)	131
Figure.4.21: Représente l'impact du relief sur la couverture idéale du radar pour h=800m.	132
Figure.4.22: Représente l'impact du relief sur la couverture idéale du radar pour h=1200m.	133
Figure.4.23 : les sélections les informations à afficher.	134
Figure.4.24 : les informations à introduire pour implanter une nouvelle station radar.	134
Figure.4.25: Représente la couverture idéale pour six stations radars existantes au FIR d'Alger.	135
Figure.4.26: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour un niveau de vol FL 100.	135
Figure.4.27: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour un niveau de vol FL 200.	136
Figure.4.28: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour un niveau de vol FL 300.	137
Figure.4.29: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour la station d'AKFADOU.	138
Figure.4.30: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour la station de CHREA.	138
Figure.4.31: Représente la couverture radar proposée.	139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. 1.1 : Classification des Espaces Aérien.	22
Tableau 1.2: Classification des secteurs en Algérie.	29
Tableau.1.3 : Les centres de contrôle d'approche.	30
Tableau 1.4 : Moyens de Radio navigation en Algérie.	39
Tableau 1.5 : L'emplacement des Radars en Algérie.	41
Tableau 1.6 : Représente Evolution du trafic aérodomes : (2007-2017).	47
Tableau 1.7 Représente Un Récapitulatif de Trafic par Aérodom 2017.	49
Le tableau 1.8 : Représente l'évolution de Trafic en route 2007-2017.	50
Tableau 1.9 : Représente Evolution du trafic par secteur : (2012-2017).	51
Tableau 4. 1 : Stations radars actuelles et leur site d'implantation.	116

INTRODUCTION

Le trafic aérien mondial ne cesse de croître; il est passé de quelques millions de passagers en 1950 à 3,6 milliards en 2017[1]. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) estime que le nombre de passagers aériens atteindra les 6 milliards d'ici 2030. Cette augmentation effrénée du trafic remet en cause les modèles logistiques et d'infrastructure actuels des aéroports. Ceux-ci doivent s'adapter rapidement et durablement, et l'Algérie ne fait pas l'exception à cette règle. Elle occupe une position clé dans l'espace méditerranéen, elle couvre une superficie de 2.37 Mkm² et occupe une position charnière entre l'Europe et l'Afrique. En moyenne 90.000 avions fréquentent annuellement son espace aérien. La nature et l'étendue géographiques, les conditions climatiques, le volume et la complexité du trafic aérien mettent en évidence deux sous-ensembles Nord et Sud.

La partie nord, au climat méditerranéen concentre plus de 60% du trafic aérien. La circulation aérienne y est considérée comme relativement dense et complexe, de fait que les principaux aéroports sont situés dans cette sous-région ce qui implique que les aéronefs en évolution (arrivée, départ) prédominent. Dans cette partie, les moyens de communication de navigation et de surveillance sont en général, au niveau requis et en conformité avec le plan régional de l'OACI. Toutefois des insuffisances subsistent notamment dans la fonction «télécommunications» malgré les efforts pour l'améliorer. Grâce aux différents plans de développement, il est permis d'avancer que cette partie nord disposera, à moyen terme, d'une couverture radar complète avec automatisation du traitement des données. Elle disposera donc d'un environnement technique et opérationnel comparable à celui de l'Europe du Sud et de nos voisins. Ce qui devrait résoudre tous les problèmes d'interface et par corollaire améliorer la fluidité et la sécurité des flux du trafic.

La partie Sud, outre son immensité géographique, elle possède une grande partie inhospitalière au sens de la définition aéronautique. Elle se

caractérise aussi par une densité de trafic relativement faible, avec toutefois, un flux de trafic nord-sud en survol plus important.

Dans le domaine des télécommunications (service fixe et mobile) et de radionavigations, les moyens mis en œuvre dépassent les niveaux requis par le plan régional, c'est pour tenir compte des exigences du trafic domestique dont le réseau est le plus développé du continent africain. L'immensité de cette région, sa nature difficile, l'isolement quasi total de certaines localités font que la fiabilité et surtout la disponibilité des moyens implantés souffrent de beaucoup de contraintes [2,3]. Cela est particulièrement vrai pour des supports des télécommunications (ligne) dont la maintenance relève d'autres administrations. Cet aspect constitue un frein à la réalisation d'une couverture VHF complète et performante et à l'extension du service de contrôle à tout l'espace aérien; ce qui demeure l'objectif ultime. De plus, même si certaines liaisons sont réalisées par voie satellitaire, des problèmes demeurent au segment terrestre.

Actuellement, les capacités d'exploitation du trafic aérien dans la FIR d'Alger sont saturées, elles devront être modifiées pour répondre aux demandes futures. L'engagement régional de l'Algérie pour la mise en place du contrôle positif dans l'espace aérien supérieur et des minimas de séparation verticale réduite (RVSM) nécessite des améliorations à court terme, telles que la mise à niveau des opérations de contrôle d'approche des principaux aéroports.

L'objectif principal de notre travail est de trouver des opérations procédurales actuelles devront évoluer vers le contrôle radar plus performant dans l'espace aérien nord, puis aller vers le sud et ensuite vers un environnement d'exploitation de Surveillance Automatique Dépendante (ADS) dans l'extrême Sud au fur et à mesure que le trafic augmente.

Cette étude englobe dans le premier chapitre l'état de l'art avec une présentation générale de tous les moyens de communication, navigation et surveillance, dans le deuxième chapitre on a évoqué le concept CNS-ATM. Les systèmes de surveillance radars du trafic aérien dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre est dédié à la simulation et l'interprétation des résultats, on termine notre étude par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

L'ETAT DE L'ART

1.1 Introduction

Depuis le 17 décembre 1903, date à laquelle les frères Wright ont effectué le premier vol piloté avec un appareil à moteur plus lourd que l'air, l'aviation a beaucoup évolué, le nombre d'avions circulant dans le ciel étant devenu considérable, et compte tenu de la progression du trafic aérien mondialisé, il est primordial d'avoir une bonne gestion du trafic aérien, à différentes échelles géographiques telles que les territoires nationaux, les zones aériennes supranationales et les continents. Pour cela, il est recommandé de faire une présentation de l'espace aérien, et mettre en place des services assurant la sécurité de ce dernier.

1.2 Généralités sur les espaces aériens

Pour assurer la gestion du trafic aérien, l'organisation internationale de l'aviation civile (OACI) a mis en place des services de circulation aérienne qui contrôlent les différentes phases de vol.

1.2.1 Les services de la circulation aérienne

Le contrôle aérien est un ensemble de services rendus aux aéronefs afin d'aider à l'exécution sûre, rapide et efficace des vols. Les services rendus sont au nombre de trois :

a) Le service de contrôle

Est un service assuré dont le but est :

- De prévenir les abordages entre les aéronefs ;
- De régler et accélérer la circulation aérienne ;
- Veille aussi à éviter les collisions entre aéronefs qui évoluent au sol et les obstacles [4].

Ce service étant lui-même subdivisé en trois parties selon la phase du vol à laquelle il s'applique (Figure 1.1).

1) Le contrôle d'aérodrome (TWR : TOWER) : s'effectue à partir des tours de contrôle. Il assure la sécurité et le respect des procédures dans les phases de décollage, d'atterrissage et de roulage, afin :

- ✓ D'empêcher les collisions sur l'aire de manœuvre ;
- ✓ D'assurer l'acheminement sûr, ordonné et rapide de la circulation aérienne.

2) Le contrôle d'approche (APP : APPROACH) : C'est un service du contrôle de la circulation aérienne pour les aéronefs en vol lors de la phase d'arrivée et de départ. Il s'effectue par un bureau d'approche ou un centre de contrôle régional (CCR). Il s'agit de guider les aéronefs depuis la croisière vers l'axe de la piste où ils seront pris en charge par la tour de contrôle d'aérodrome.

3) Le contrôle en route : Ce contrôle concerne les avions qui sont dans la phase « *en route* » dont le but est de prévenir les abordages entre aéronefs, d'accélérer et de régulariser la circulation aérienne.

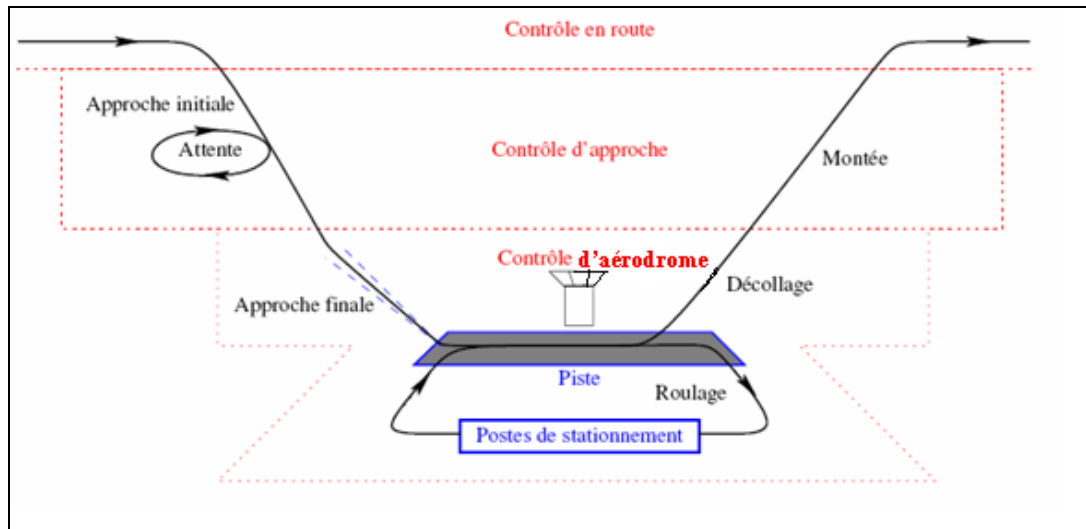


Figure1.1 : Représentation du contrôle de trafic.

b) Le service d'information de vol (FIS Flight Information Service)

Le rôle de ce service est de délivrer toute information utile à l'exécution sûre et efficace des vols. Il permet de disposer durant le vol de renseignements concernant les conditions météorologiques sur le parcours [4-5], l'état des aérodromes et des installations radioélectriques, sans oublier l'information sur le trafic aérien qui peut être considérée en tant que situation conflictuelle. L'information de vol peut aller jusqu'à des suggestions de manœuvre pour éviter les abordages. Les organismes chargés du service d'information de vol assurent également le service d'alerte.

c) Le service d'alerte

Ce service a pour rôle de déclencher l'alerte auprès des organismes de recherche et de sauvetage, et fournir pour tous les organismes de la circulation aérienne (organismes de contrôle ou d'information) tous les aéronefs qui se déclarent ou qui se trouvent en situation d'urgence [5].

1.2.2 Division de l'espace aérien

L'espace aérien n'est pas entièrement contrôlé, seules des portions d'espace le sont. En 1992, l'OACI (Organisation de l'Aviation civile internationale) a uniformisé l'appellation des différents espaces aériens (contrôlés ou non) sur la base des services rendus.

Au voisinage des aérodromes importants, la densité et la diversité du trafic imposent aux aéronefs des procédures strictes. A l'inverse, certaines portions d'espace sont peu fréquentées et la circulation aérienne y est très peu dense. Dans ces espaces, les exigences réglementaires sont moins strictes. Pour séparer les différents types de trafic qui appartiennent à la CAG (circulation aérienne générale), l'espace aérien est subdivisé en plusieurs parties, chacune étant adaptée à la densité et au type de trafic auxquels elle est soumise [5].

L'espace aérien se subdivise, fondamentalement, en deux espaces :

- Espace aérien contrôlé ;
- Espace aérien non contrôlé.

a) Espace aérien contrôlé :

Les espaces aériens contrôlés sont utilisés pour protéger les trajectoires IFR. Les services rendus sont les services de contrôle, d'information et d'alerte. Parmi ce type d'espace, se trouve :

- ✚ Les **CTA** : (Control Area ou les régions de contrôle) qui peuvent être composées de :
 - ✓ **TMA** : (Terminal Control Area ou les régions de contrôle terminal) ;
 - ✓ **AWY** : (Air Way ou les voies aériennes) ;
- ✚ Les **CTR** : (Control Zone ou les zones de contrôle).

b) Partition de l'espace aérien inférieur

L'espace aérien inférieur est déterminé suivant la nature des services de circulation aérienne qui doivent être établis. Sa partition sera effectuée de la manière suivante :

Région d'information de vol (FIR Flight Information Region) : C'est un espace aérien de dimensions définies à l'intérieur duquel le service d'information de vol et le service d'alerte sont assurés. La FIR se subdivise en :

➤ **Région de contrôle (CTA)** : Espace aérien contrôlé situé au-dessus d'une limite déterminée par rapport à la surface, voir figure (1.3).

Elles peuvent être composées :

- ✓ **Des régions de contrôle terminales (TAM : Terminal control Area)** : c'est une région de contrôle établie en principe, au carrefour des routes ATS aux environs d'un ou de plusieurs aérodromes importants.
 - ✓ **Des voies aériennes (Air Way)** : Ce sont des couloirs empruntés par les vols IFR. Elles ont généralement une largeur de 10 NM (18.5 km). L'axe des AWY est défini par des balises de radionavigation, voir figure (1. 2).
- **Zone de contrôle (CTR)** : C'est un espace aérien contrôlé, s'étendant verticalement à partir de la surface jusqu'à une limite supérieure spécifiée. Les limites latérales d'une zone de contrôle sont d'au moins 9.3 km (5NM) à partir du centre de l'aérodrome ou des aérodromes concernés. Les CTR sont destinées à englober les trajectoires de décollage, d'atterrissage et de la circulation aérienne d'aérodrome (Figure 1.3).

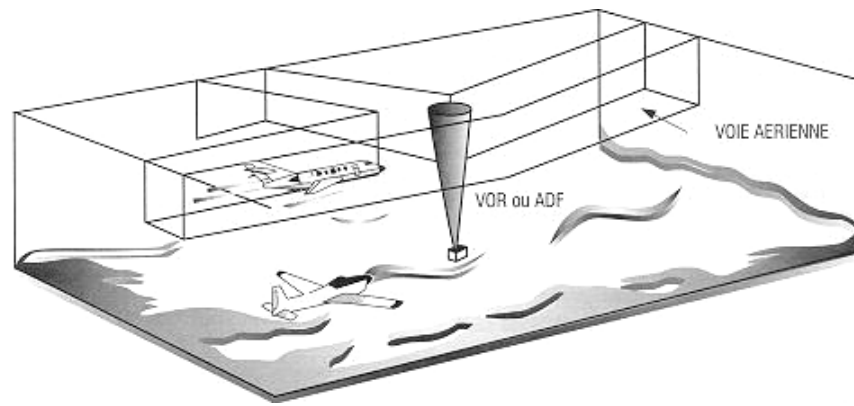


Figure 1.2 : L'axe des voies aériennes est défini par des balises de radionavigation.

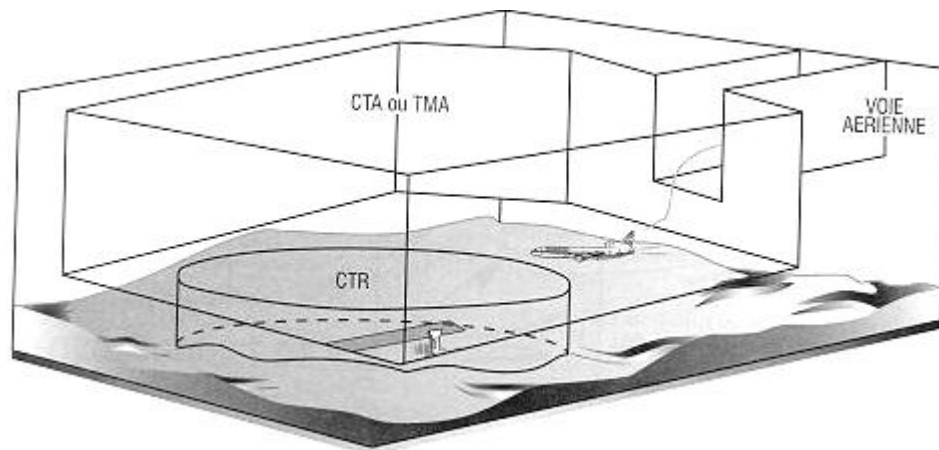


Figure 1.3 : La structure qui englobe CTA et CTR [5].

c) Espace aérien non contrôlé

Les espaces aériens non contrôlés sont des espaces de trafic moindre, où l'intervention des services de la circulation aérienne est limitée à l'information et l'alerte, il est divisé en :

- ✓ Région d'information de vol F.I.R (Flight Information Région) ;
- ✓ Région supérieure d'information de vol U.I.R (Upper Information Région).

✚ Région d'information de vol (F.I.R)

Espace aérien de dimensions latérales définies à l'intérieur duquel le service d'information de vol et le service d'alerte sont assurés. Leurs limites s'étendent jusqu'au niveau de vol FL195.

✚ Région supérieure d'information de vol (U.I.R)

Ils ont en été créé afin de limiter le nombre de régions d'information de vol (F.I.R) que les aéronefs volant à très grande altitude auraient à traverser. Une région supérieure d'information de vol (U.I.R) englobe l'espace aérien situé à l'intérieur des limites latérales d'un certain nombre de (F.I.R) [6].

La figure ci-dessous (1.4) résume les différents types d'espaces cités:

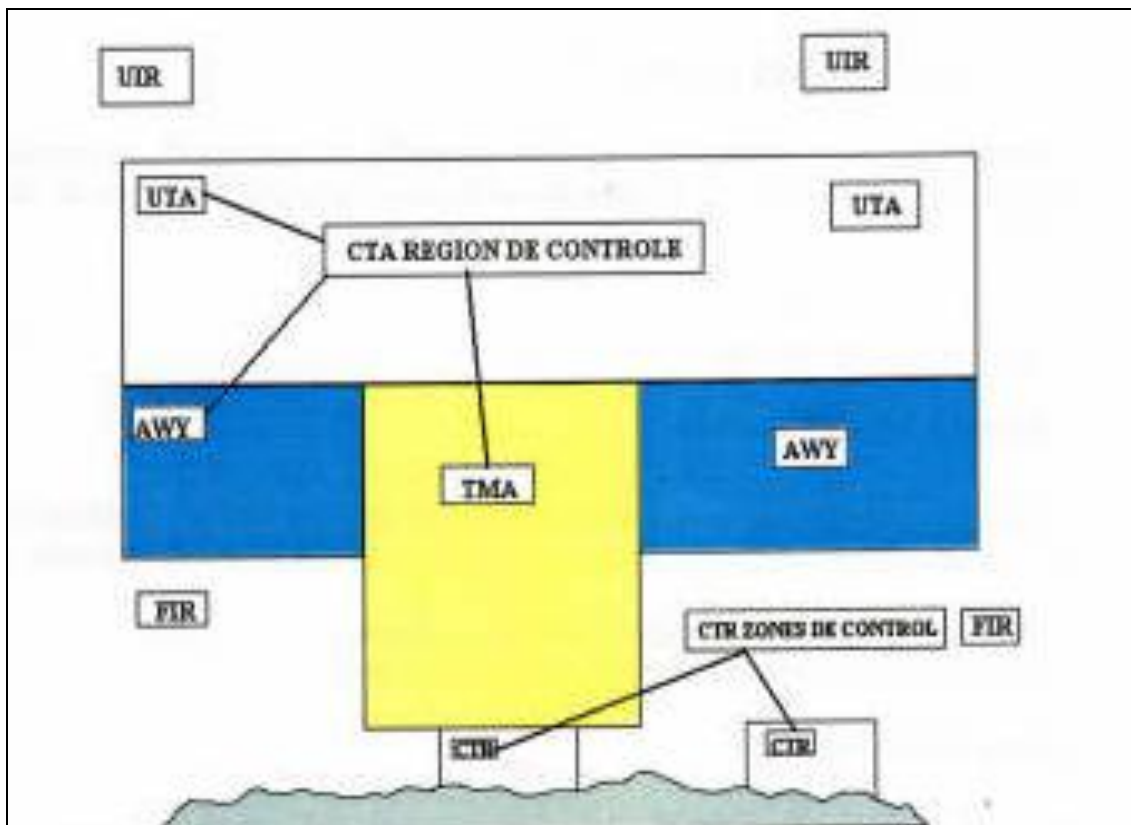


Figure 1.4 : Organisation de l'espace aérien [7].

1.2.3 Classification des espaces aérien

Les classes d'espace aérien sont une normalisation des services rendus dans les espaces aériens. Une classe d'espace définit les services qui sont rendus suivant le régime de vol, les conditions météorologiques minimales permettant d'effectuer des vols en régime VFR. Chaque classe d'espace se voit attribuer une lettre de A à G. A étant la plus restrictif, mais aussi la plus sécuritaire, G étant la plus libre.

Une classe est attribuée à un espace en fonction du trafic total et du trafic IFR circulant dans l'espace à un moment donné. Plus le trafic est grand, plus il sera nécessaire de relever le niveau de sécurité, et plus la classe deviendra restrictive. Il existe différentes classes d'espace aérien, destinées à établir les règles de compatibilité IFR/VFR [8-9].

Le tableau 1.1 ci-dessous résume les différentes classes des espaces aériens.

Tableau. 1.1 : Classification des Espaces Aérien [9]

Classe	Type de vol	Séparation assurée	Service	communication	Autorisation ATC
A	IFR seulement	A tous les aéronefs	ATC	Bilatérales permanentes	Oui
B	IFR	A tous les aéronefs	ATC	Bilatérales permanentes	Oui
	VFR	A tous les aéronefs	ATC	Bilatérales permanentes	Oui
C	IFR	IFR avec IFR IFR avec VFR	ATC	Bilatérales permanentes	Oui
	VFR	VFR avec IFR	-ATC pour séparation avec IFR -Information de trafic VFR/VFR et sur demande avis d'évitement de	Bilatérales permanentes	Oui

			trafic		
D	IFR	IFR avec IFR	-ATC -Information de circulation avec vols VFR (suggestion de manœuvre d'évitement sur demande)	Bilatérales permanentes	Oui
	VFR	Néant	Information de circulation avec tous les autres vols (suggestion de manœuvre d'évitement sur demande)	Bilatérales permanentes	Oui
E	IFR	IFR avec IFR	-ATC -Information de circulation avec VFR dans la mesure du possible	Bilatérales permanentes	Oui
	VFR	Néant	Information de circulation avec tous les vols dans la mesure du possible	Non	Non
F	IFR	IFR avec IFR autant que possible	Service consultatif de la circulation aérienne ; Service d'information de vol	Bilatérales permanentes	Non
	VFR	Néant	Service d'information de vol	Non	Non
G	IFR	Néant	Service d'information de vol	Bilatérales permanentes	Non
	VFR	Néant	Service d'information de vol	Non	Non

1.2.4 Optimisation de l'espace aérien
















Pour une bonne exploitation de l'espace aérien, on a généralement recours à différentes techniques (système RVSM, RNP et PBN...). afin d'obtenir un espace aérien plus optimisé [10-11].

a) RVSM (Minimum Réduit de Séparation verticale)

Le but de la mise en œuvre de la RVSM est de réduire la séparation verticale de 2000 ft à 1000 ft au-dessus du niveau de vol 290, afin d'offrir aux usagers six niveaux de vol supplémentaires. Ces niveaux de croisière supplémentaires permettent d'augmenter la capacité de l'espace aérien, de réduire les rendements de consommation carburant, d'améliorer la flexibilité opérationnelle des organismes de contrôle de la circulation aérienne et enfin d'assurer une bonne gestion du trafic aérien.

Niveau de croisière RVSM

L'organisation de l'aviation civile Internationale (OACI) a défini le niveau de croisière dans un espace RVSM entre FL290 à FL410 avec une séparation de 1000 ft, voir la figure (1.5) [11].

 FL430*		
	FL410 	
 FL400	FL390 	
 FL380	FL370 	
 FL360	FL350 	
 FL340	FL330 	
 FL320	FL310 	
 FL300	FL290 	
 FL280*		

Le niveau de vol FL	La conversion en Km
410	12.4968
390	11.8872
370	11.2776
350	10.668

Figure 1.5 : Niveaux de Croisières RVSM [11].

330	10.0594
310	9.4488
290	8.8392

La transition de R.V.S.M

La transition entre les différents niveaux de croisière R.V.S.M est établie sur la base d'un accord bilatéral entre les états ou les organismes de contrôle situés aux limites des espaces R.V.S.M. Dans cette phase de transition entre les espaces R.V.S.M et non-R.V.S.M, l'aéronef doit changer de réglementation en passant d'une séparation verticale de 1000 pieds à une séparation de 2000 pieds en respectant la règle semi-circulaire des espaces non- R.V.S.M (C.V.S.M).

Les avantages de la mise en œuvre du R.V.S.M

Le trafic aérien est en pleine croissance sur le plan mondial. Les systèmes A.T.M devront évoluer afin de pouvoir absorber de façon sûre et efficace cet accroissement continu du trafic.

Les avantages attendus de l'application de la R.V.S.M sont :

- Diminution de la charge de travail des contrôleurs aériens ;
- Possibilité d'augmenter la capacité du trafic aérien en route ;
- Réduction des conflits du trafic, en particulier aux principaux nœuds d'intersection ;
- Possibilités pour les contrôleurs aériens de gérer plus efficacement le trafic et d'accorder plus de demandes pour les niveaux de vols optimaux.

Une série de simulation A.T.C en temps réel montre que le R.V.S.M permet de réduire la charge de travail des contrôleurs.

b) RNAV Système de Navigation de Surface (Area Navigation System)

La R.N.A.V est une méthode de navigation qui permet les vols sur n'importe quelle trajectoire voulue dans la limite de la couverture des aides de navigation de référence au sol ou dans les limites des possibilités d'une aide autonome, ou grâce à une combinaison de ces deux moyens. Cela signifie en pratique que l'aéronef dispose d'équipement R.N.A.V qui fonctionne en déterminant automatiquement la position absolue de l'aéronef à partir d'une ou plusieurs données d'entrée (interne ou externe) différentes [12-13].

✚ **Les avantages attendus par la R.N.A.V sont :**

- Possibilité d'effectuer des vols sur des distances en ligne droite. (La navigation directe) entre 2 points réduits, les temps de vol en raccourcissant les distances ;
- Possibilité d'organiser des vols vers des destinations qui ne sont pas desservies par aides à la navigation;
- Permet d'améliorer la flexibilité du contrôle de la circulation aérienne;
- Permet d'alléger la charge du travail des contrôleurs aériens;
- Favorise la sécurité et la résolution des conflits;
- Offre une utilisation optimale de l'espace aérien.

d) Système de qualité de navigation requise (R.N.P)

Étant donné que les niveaux de qualité de navigation qui sont requis varient d'un espace à l'autre selon la densité de la circulation et la complexité des routes suivies. Le concept R.N.P porte sur la précision de navigation qui doit être maintenue par un aéronef volant à l'intérieur d'un espace aérien ou sur une route particulière. En effet, le RNP définit la qualité de navigation requise à l'intérieur d'un espace aérien, il permet d'espacer plus étroitement les routes, de réduire l'espacement entre les aéronefs et de réduire la hauteur de franchissement des obstacles sans nécessairement faire intervenir l'A.T.C.

Une caractéristique essentielle des opérations R.N.P est la capacité du système de navigation de l'aéronef de surveiller les performances de navigation qu'il atteint et d'informer l'équipage si les limites spécifiées sont dépassées. En d'autres termes, il se surveille lui-même. Il s'agit d'un système

R.N.A.V qui dispose de moyens de surveillance des performances et d'alerte embarquée.

Théoriquement, un espace aérien doit avoir un seul type de R.N.P. Cependant, plusieurs types de R.N.P peuvent coexister dans un même espace aérien.

Le R.N.P peut être appliqué du décollage à l'atterrissage, avec une variation suivant les exigences des différentes phases. Par exemple, lors des décollages et atterrissages le système de qualité de navigation requise (R.N.P) peut-être très exigeant et décroître lors de la croisière.

En conclusion, le R.N.P caractérise un espace aérien au moyen de l'expression d'une précision de navigation (le type de R.N.P) à respecter à l'intérieur de cet espace aérien pendant au moins 95% du temps de vol [14].

1.3 Situation actuelle de l'espace aérien Algérie :

1.3.1 Espace aérien algérien

a) Introduction

La position géographique de l'espace aérien algérien est entre le 19° N jusqu'à 39°N de latitude et de 9°W jusqu'au 12° E de longitude. L'Établissement National de la Navigation aérienne (E.N.N.A) agissant pour et au nom de l'état algérien est le seul établissement autorisé pour le contrôle de circulation aérienne. Il assure les services du contrôle aérien et d'information en vol aux aéronefs traversant l'espace aérien national, qui s'étend de la partie sud de la méditerranée contiguë aux F.I.R(s) Marseille, Barcelone et Séville au nord, adjacentes à l'ouest à la F.I.R Casablanca, à l'Est à la F.I.R Tunis et Tripoli, au Sud à la .FI.R Dakar et Niamey, voir figure (1.6).

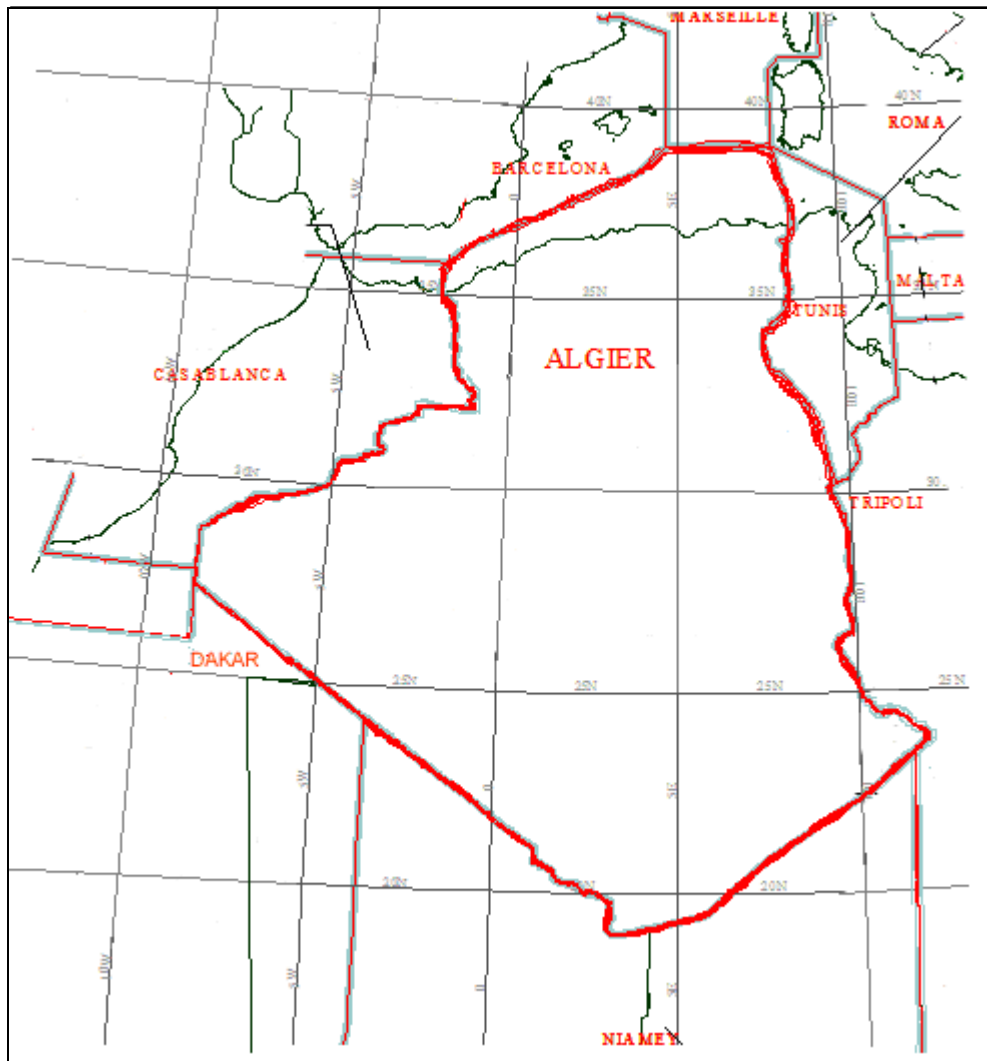


Figure 1.6 : Représentation des limites de l'espace aérien algérien.

b) Division de l'espace aérien algérien

La F.I.R d'Alger est divisée en sept secteurs ayant le statut d'espace O.A.C.I (Figure 1.7). Les (07) secteurs de la F.I.R sont classés comme suit :

- Les (03) secteurs du NORD (NORD/EST, CENTRE et NORD/OUEST) et les (03) secteurs du SUD (SUD/EST, SUD/CENTRE et SUD/OUEST) sont des espaces contrôlés.
- Le secteur SUD/SUD est un espace non contrôlé.

Le tableau 1.2 et la figure 1.7 ci-dessous reprennent la délimitation des (07) secteurs existants actuellement en Algérie :

Tableau 1.2: Classification des secteurs en Algérie

N° secteur	Secteur	Classe	Limite inférieure	Limite supérieure	Service de contrôle	Fréquence Hz
01	Centre Alger supérieur	A	FL245	FL450	MAGHREB contrôle Alger	132.45/124.9
01	Centre Alger Inférieur	D	GND/MSL	FL245	MAGHREB contrôle Alger	127.3/124.9
02	Nord/Est	D	GND/MSL	FL450	MAGHREB contrôle Alger	125.4/124.6
03	NORD/OUEST	D	GND/MSL	FL450	MAGHREB contrôle Alger	125.7
04	SUD/CENTRE	E	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	131.3/124.6
05	SUD/EST	E	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	124.1/124.6
06	SUD/OUEST	E	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	128.1
07	SUD/SUD	F	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	124.1/123.8/128.1

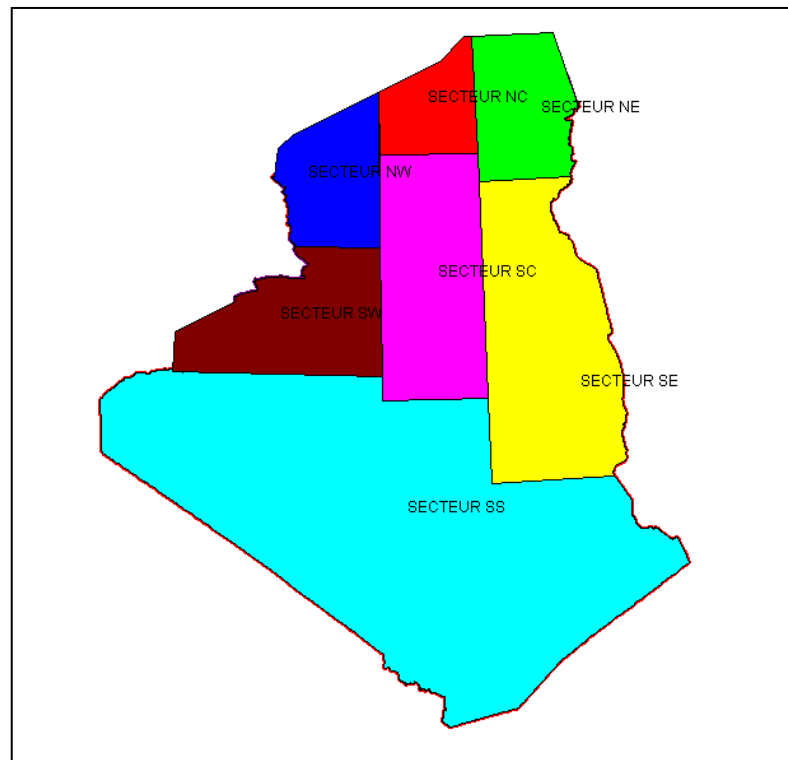


Figure 1.7 : Sectorisation actuelle.

c) Les zones déléguées à l'approche

Pour mieux gérer les manœuvres des aéronefs autour des aéroports ayant la plus grande densité de trafic, à l'image de celui de Francfort en Allemagne. L'Algérie a développé dans ce cadre cinq zones d'approche gérées par cinq centres de contrôle d'approche représentés sur le tableau (1.3) et la figure (1.8).

Tableau.1.3 : Les centres de contrôle d'approche.

Désignation	Classe	Limite inférieure	Limite supérieure
CTA Alger/Houari Boumediene	D	450m GND/MSL	FL105
CTA Annaba/El Mellah	D	450m GND/MSL	FL85
CTA Constantine/Mohamed Boudiaf	D	450m GND/MSL	FL105
CTA Hassi Messaoud/Oued Irara Krim	E	900m GND/MSL	FL105
CTA Oran/Essania	D	450m GND/MSL	FL40

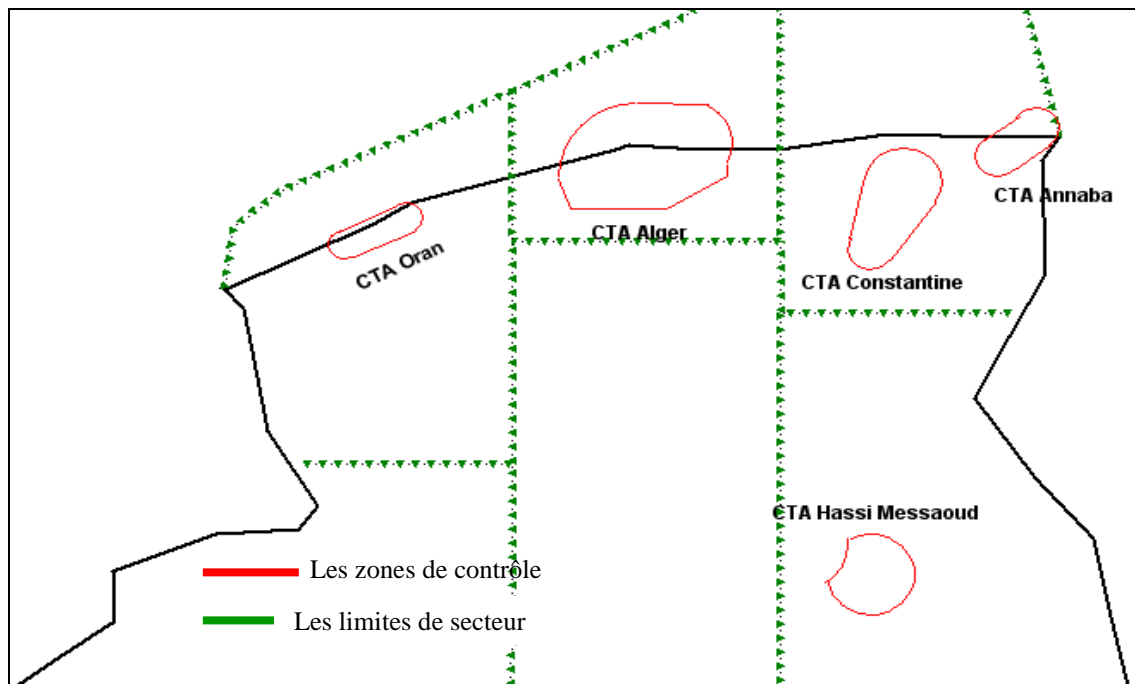
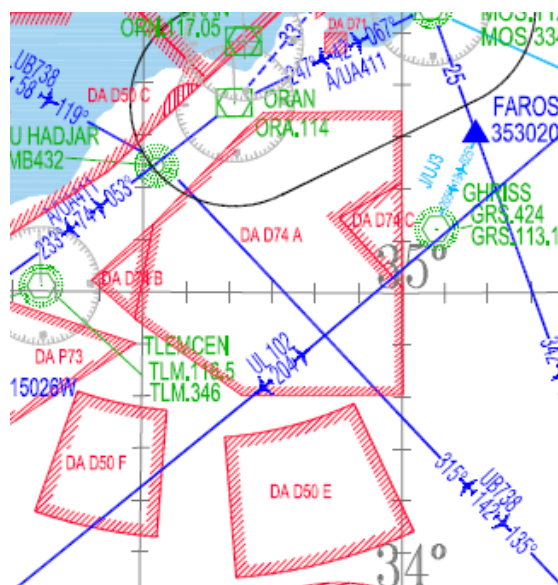


Figure.1.8 : Représentation des zones de contrôle.

d) Les zones à statuts particuliers

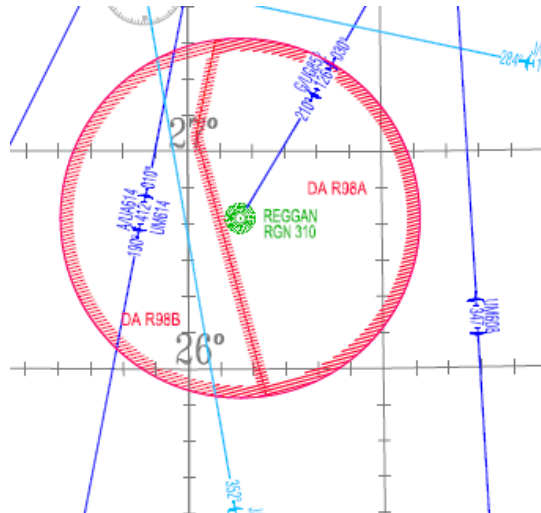
Ce sont des espaces aériens réservés en fonction de leur utilisation spéciale et des besoins de la défense nationale. Il existe pratiquement trois types de zones à statuts particuliers : zones dangereuses, réglementées et interdites.

- **Zone dangereuse (D)** : certaines zones ont un caractère particulièrement dangereux pour la navigation aérienne au vu de l'activité qui s'y déroule. La traversée d'une zone dangereuse réclame une vigilance accrue du pilote et dans certains cas, il est souhaitable de l'éviter lorsqu'elle est active. Les zones dangereuses en espace supérieures ne sont pas gérées de la même façon qu'en espace inférieur, voir la figure (1.9).



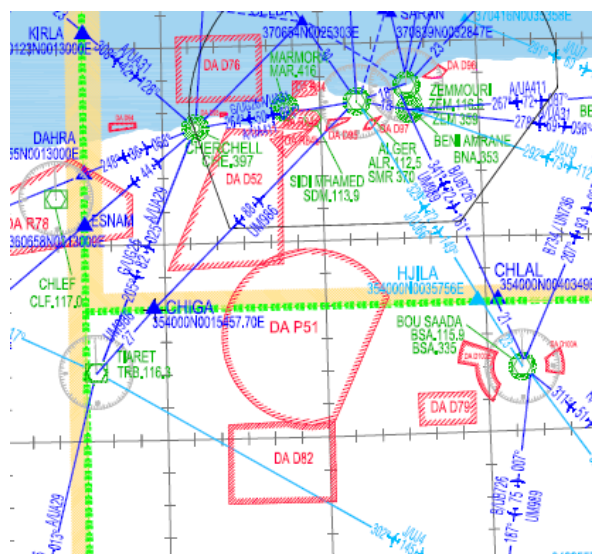
La figure 1.9 : Présente plusieurs zones dangereuses DA Dxx

- **Zones réglementées (R-regular)**: il s'agit d'espace de dimensions définies, au-dessus du territoire ou des eaux territoriales dans les limites duquel le vol des aéronefs est soumis à certaines conditions spécifiques. Ce type de zone est très employé par l'armée de l'air pour définir des zones d'entraînement. Elles sont portées à la connaissance des usagers sur les cartes aéronautiques, voir la figure (1.10).



La figure 1.10 : Présente une zone Règlementé DA R98A

- **Zones interdites (P-Prohibited)** : il s'agit d'espace aérien de dimensions définies au-dessus du territoire ou des eaux territoriales dans les limites duquel le vol des aéronefs est interdit, voir figure (1.11).



La figure1.11 : Présente une zone interdite DA P51

L'établissement d'une zone interdite devrait être soumis à des conditions particulièrement strictes. Car l'usage de la portion d'espace aérien englobée par la zone interdite est comme son nom l'indique absolument interdite aux aéronefs. La pratique générale consiste donc à établir ce type de zone afin de protéger les installations importantes d'un état, les complexes industriels sensibles, etc... Les

1.3.2 Les routes aériennes

Une route aérienne est un itinéraire réservé et prédéfini qui permet de rallier un aéroport depuis un autre et qui peut comporter des étapes ou escales. La route aérienne emprunte des couloirs aériens, qui sont des zones réservées à la circulation des aéronefs. Ces routes sont constituées d'une série de tronçons définis par des points de report appelés balises. Les balises sont souvent des balises radio électroniques. Il existe plusieurs routes aériennes, le choix d'une route courte et facile dépend du type d'aéronef et du type de vol programmé.

On peut citer :

- Route A.T.S ;
- Route R.N.A.V.

a) Les routes A.T.S

Routes destinées à canaliser la circulation aérienne pour permettre d'assurer les services de la circulation aérienne. Cette dénomination A.T.S est utilisée pour désigner à la fois les routes aériennes, les routes contrôlées et non contrôlées, les routes d'arrivée et de départ.

Il y a deux types de route A.T.S :

Les routes A.T.S domestiques

Une route A.T.S domestique est une voie aérienne utilisée par les aéronefs civils entre deux aéroports d'un même pays.

Les routes A.T.S internationales

Les routes A.T.S internationales sont des cheminements utilisés par les aéronefs civils pour la desserte d'un pays ou son transit.

b) Les routes R.N.A.V

Une route R.N.A.V est une voie aérienne utilisée par les aéronefs civils avec une méthode de navigation permettant le vol sur n'importe quelle trajectoire

voulue, dans les limites de la couverture des aides de navigation, des limites des possibilités d'une aide autonome ou grâce à une combinaison de ces deux moyens.

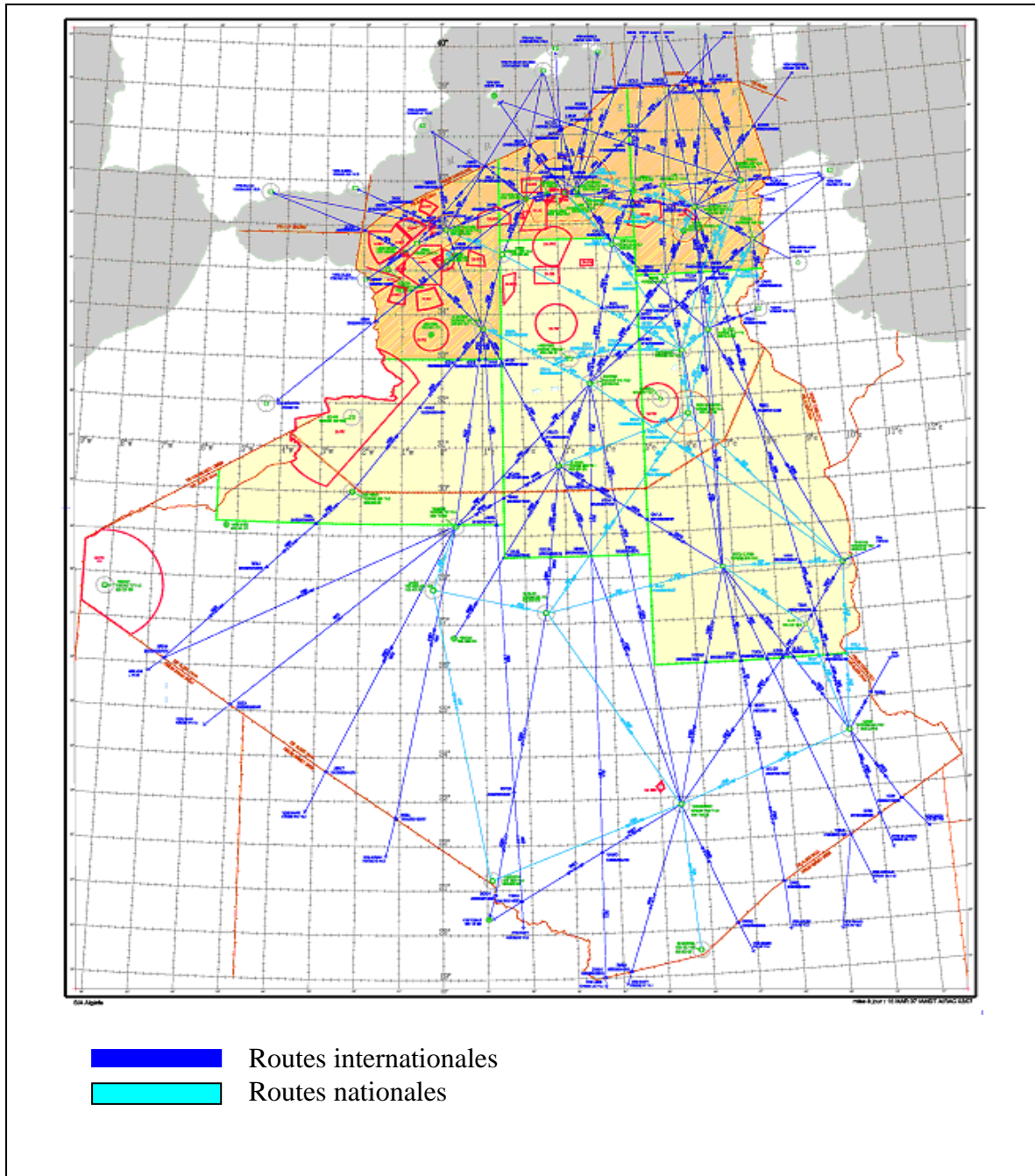


Figure.1.13 : Représentation des routes aériennes en Algérie [15].

1.3.3 Mise en Œuvre du R.V.S.M, R.N.P, R.N.A.V en Algérie

a) Mise en Œuvre du R.V.S.M en Algérie

L'espace aérien algérien est devenu R.V.S.M depuis le **25 septembre 2008 à 00H01 UTC** [16]. Les procédures R.V.S.M en Algérie consistent à garantir un minimum de séparation verticale de 300 mètres (1000 pieds) entre les niveaux de vol FL 290 et FL 410 inclus, désignés Minimum Réduit de Séparation Verticale (R.V.S.M) dans la F.I.R Alger. L'espace aérien R.V.S.M couvre la totalité de la F.I.R Algérie, figure (1.14).

b) Mise en Œuvre du R.N.P en Algérie

- Mise en œuvre de la R.N.P 5 sur la partie nord de la F.I.R (jusqu'au 29N) pour les routes aériennes d'orientation Est-ouest/Ouest Est a été appliquée en 2005.
- Mise en œuvre de la R.N.P 12,6 sur la partie Sud de la F.I.R a été appliquée en 2005, [17].

c) Mise en Œuvre du R.N.A.V en Algérie

Le réseau de routes actuel en Algérie comporte plusieurs routes R.N.A.V, particulièrement, la partie Sud qui est due au manque de disponibilité des moyens de radios navigation d'une part, et leurs implantations qui est rendue difficile par la nature semi-désertique des régions traversées, d'autre part. La navigation R.N.A.V se présente donc comme la meilleure solution pour améliorer et optimiser le réseau de routes.

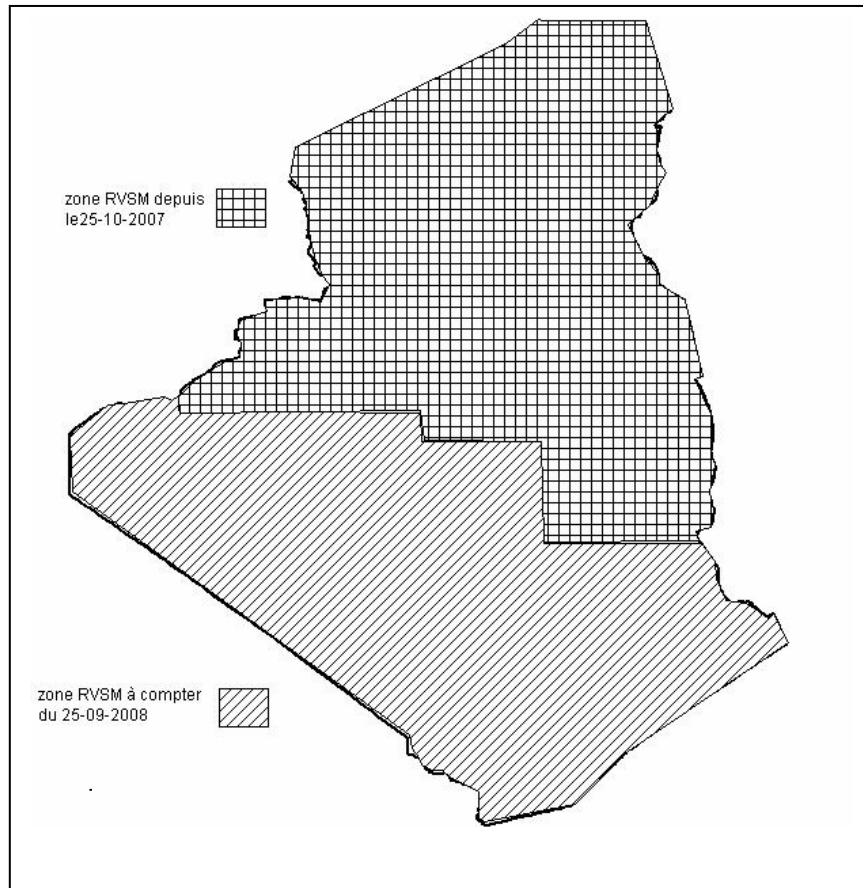


Figure 1.14: Représentation l'espace aérien R.V.S.M en Algérie [16].

1.4 Moyens de Communication, Navigation, Surveillance en Algérie

1.4.1 Communication

a) Couverture VHF/HF

La communication en Algérie est assurée par les liaisons VHF permettant la couverture d'une partie importante de l'espace aérien algérien au-dessus du FL 240. Actuellement, il existe (23) sites radio VHF réparties sur la FIR Alger, avec une couverture double au Nord. Signalons que sur la zone extrême sud, aucune couverture Radio VHF n'est assurée d'où la nécessité d'utiliser la couverture HF. La couverture VHF est actuellement inférieure à 90% de la totalité de la FIR. De nouvelles antennes VHF sont en phase d'installation pour compléter la couverture actuelle pour assurer le contrôle dans l'espace aérien supérieur. Figure (1.15).

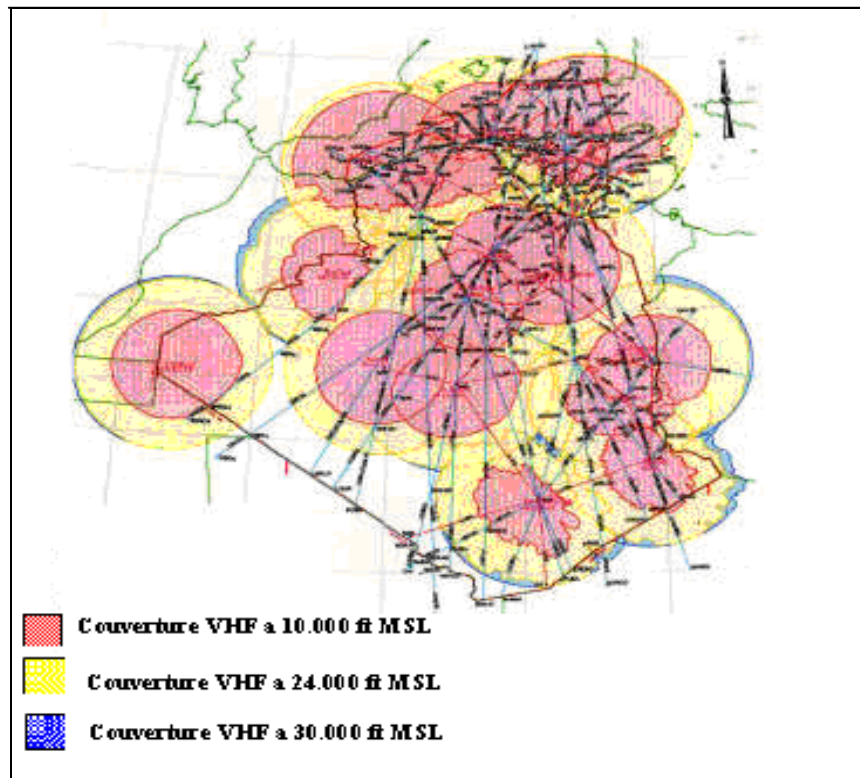


Figure 1.15 : Couverture VHF actuelle [17].

b) C.P.D.L.C (Controller Pilot Data Link Communications):

Le C.P.D.L.C est une application de liaison de données qui permet l'échange direct fondé sur les messages entre le contrôleur et le pilote, au lieu d'une communication vocale. Le CPDLC améliore les capacités de communication dans les zones désertiques où l'utilisation des communications vocales n'est pas considérée comme efficace, en particulier, dans les cas où les contrôleurs et les pilotes doivent s'en remettre à un tiers HF [18].

c) Réseau service fixe de télécommunication aéronautique (R.S.F.T.A)

L'échange des messages tel que les NOTAMS, Plan de vol, METARS, etc.... est assuré par le réseau du service fixe de télécommunication aéronautique (R.S.F.T.A). L'Algérie dispose d'un système de commutation des messages R.S.F.T.A, ce dernier est assuré par le BCT Alger située au siège de l'E.N.N.A de Oued Samar. Les supports de télécommunication en Algérie font partie du réseau

national géré par Algérie Télécom et le réseau V.S.A.T est à la charge de l'E.N.N.A.

1.4.2 Moyens de Radio Navigation:

La navigation aérienne dans la FIR Alger repose sur 36 stations VOR/DME. La plupart des stations VOR/DME sont installées au niveau des aéroports dans le prolongement des axes des pistes, et le reste sur des sites plus éloignés.

Ses stations couvrent la majorité de la FIR Algérienne au FL 100 à l'exception d'une partie à l'extrême sud figure (1.16 et 1.17) et tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Moyens de Radio navigation en Algérie.

N°	Moyens radio navigation	Nombres	Désignation
01	VOR	40	Guidage omnidirectionnel
02	DME	47	Equipement de mesure de distance
03	NDB	34	Balise de navigation
04	ILS	14	Systeme d'atterrissage aux instruments), dont 1 de catégorie 3

1.4.3 Surveillance

a) Couverture Radar

La couverture radar en Algérie concerne la partie nord et les Hauts Plateaux de la région d'information de vol d'Alger. Cinq stations radars secondaires (S.S.R) d'une portée de 450 Km, sont installées à Alger, Oran, Annaba, El Bayadh et El Oued dans le cadre du projet TRAFCA. A noter que la station d'Alger comporte un radar primaire (P.S.R) co-implanté avec le secondaire, voir le tableau (1.5) ci-dessous et la figure (1.19).

Tableau 1.5 : L'emplacement des Radars en Algérie.

Type	Station radar	Site	Date d'installation
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	Février 2001
SSR	Seraidi	Annaba	Décembre 2001
SSR	Murdjado	Oran	Janvier 2001
SSR	Guemmar	El Oued	Avril 2002
SSR	Bouderga	El Bayadh	Mai 2003

Le système de contrôle du trafic aérien (A.T.C) peut utiliser le radar primaire de surveillance et le radar secondaire de surveillance seule ou ensemble pour assurer les services de contrôle de la circulation aérienne.

Fourniture du service Radar

Le système radar décrit ci-dessus est destiné à fournir les services de contrôle, de surveillance et d'information radar de route dans les trois secteurs du nord de la FIR Alger (TMA Centre Alger, TMA Nord Est et TMA ORAN) et le service radar d'approche en zone terminale de l'aérodrome d'Alger, figure (1.18).



Figure 1.18: Radar primaire/secondaire de surveillance

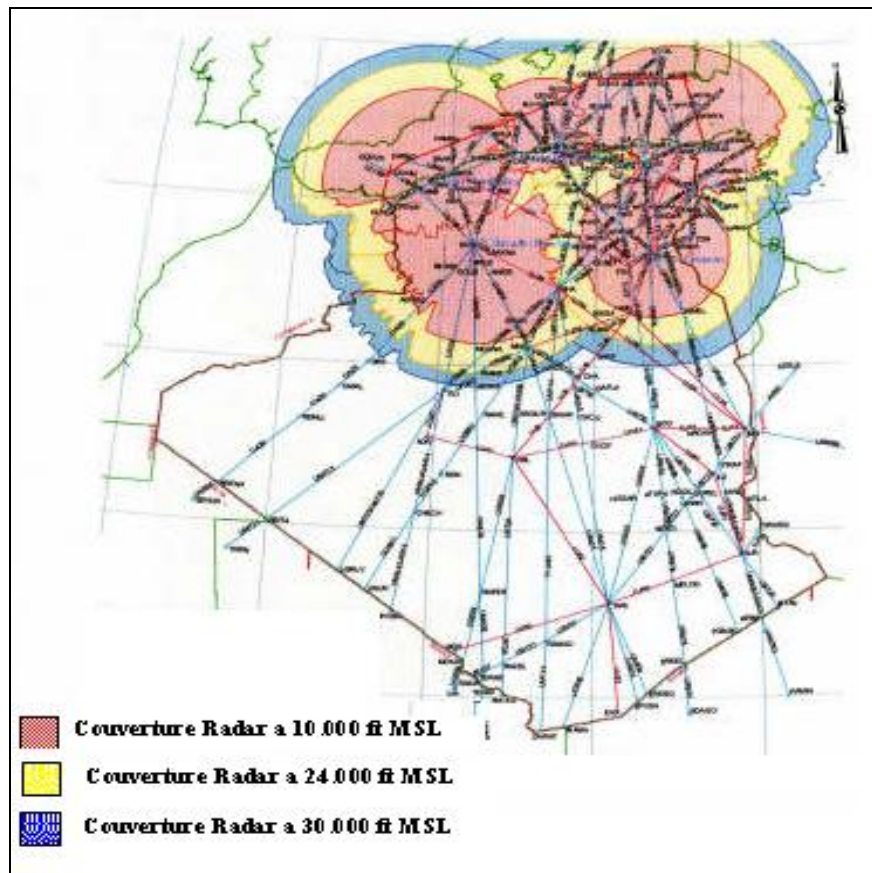


Figure.1.19 : Couverture Radar actuelle en Algérie.

b) ADS/C (Automatic Dependent Surveillance)

La surveillance dépendante automatique ADS/C (Automatic Dependent Surveillance) est une technique qui permet de transmettre des paramètres comme la position et l'identification. Elle a été mise en œuvre dans l'espace aérien algérien le **6 février 2008** à **00h01 UTC** [19].

Les comptes rendus ADS/C donnent des informations qui peuvent être utiles pour une meilleure gestion du trafic aérien.

Elle a pour but :

- ✚ D'accroître le niveau de Sécurité ;
- ✚ D'assurer une efficacité et une capacité élevées.

c) Système TRAFCA (Traitement Automatique des Fonctions de la circulation aérienne)

Dans le monde d'aviation, ces dernières années le trafic aérien a beaucoup augmenté et pour gérer ce trafic en toute sécurité, de nouveaux systèmes de traitement automatisé du trafic aérien en étaient mis en œuvre. Ils ont pour but d'aider le contrôleur aérien à remplir sa mission de contrôle. En Algérie, le système utilisé est appelé TRAFCA [20].

Ce système est constitué de deux parties :

1. Partie SAACTA (Système Algérien Automatisé de Contrôle du Trafic aérien)

Cette partie comprend l'équipement et la mise en œuvre d'un centre de qualification pour les besoins de perfectionnement et de recyclage pour le personnel technique de la navigation aérienne.

2. Partie SYRAL (Système Radar Algérien)

Cette partie comprend principalement la couverture radar de la partie nord et des Hauts Plateaux de la région d'information de vol d'Alger par l'acquisition

et la mise en service de cinq stations radars secondaires, qui sont installées à Alger, Oran, Annaba, El Bayadh et El Oued, figure (1.20).

Les objectifs du projet TRAFCA sont:

- ✚ Améliorer la sécurité de la circulation aérienne;
- ✚ Augmenter la capacité de gestion du trafic aérien;
- ✚ Fournir des outils pour assister le contrôleur et augmenter par la même la capacité d'un secteur;
- ✚ Alléger le volume de travail du contrôleur en prenant en charge les tâches fastidieuses;
- ✚ Assurer l'intégrité des données, prévoir et réguler le trafic aérien;
- ✚ Visualisation intelligente des données de trafic aérien.

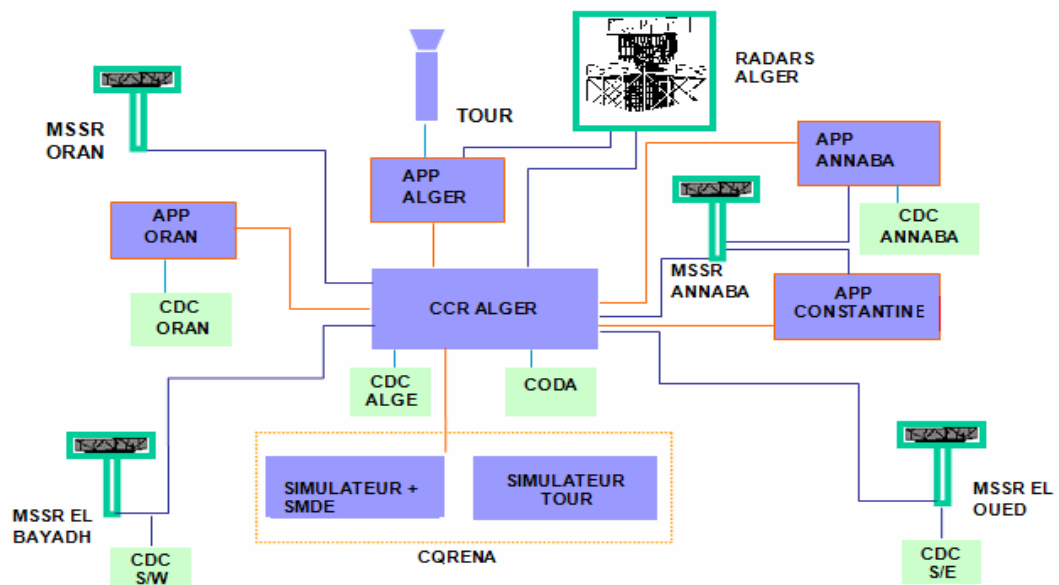


Figure 1.20 : Système TRAFCA [20].

1.5. Analyse du trafic en Algérie

1.5.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons aborder l'aspect statistique du trafic concernant les aéroports algériens et le trafic géré par le CCR d'Alger.

Pour l'analyse du trafic d'aéroport algérien, les statistiques seront basées sur deux types de trafic : trafic commercial qui a son tour est divisé en deux sous types : trafic national, trafic international, et le trafic non commercial qui est lié à l'industrie pétrolière au Sud. La figure suivante (1.21) représente les différents trafics d'un type d'aéroport algérien.

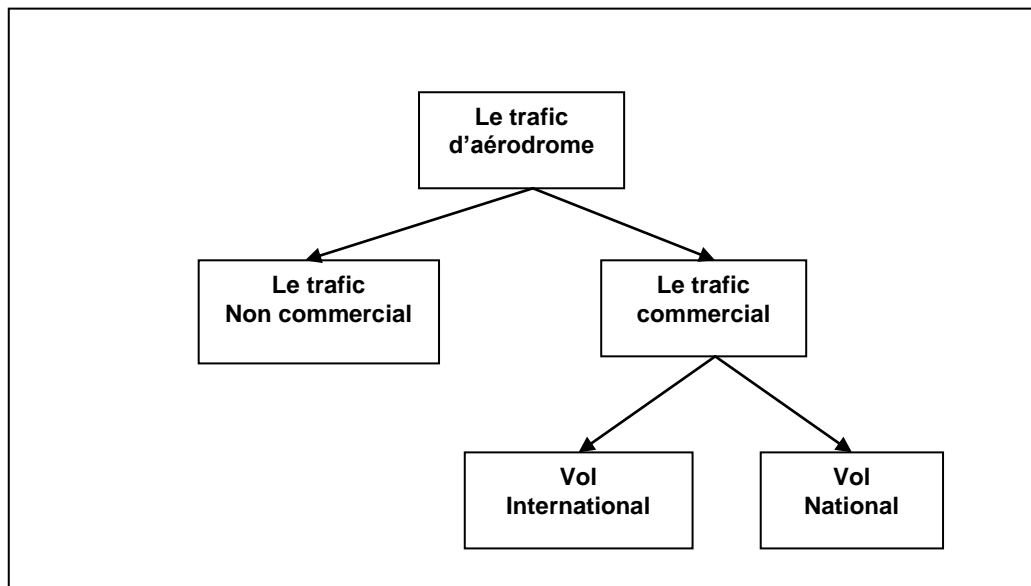


Figure 1.21: L'organigramme de trafic d'aéroport algérien

Par contre, pour l'analyse du trafic géré par le CCR d'Alger, les statistiques sont basées sur trois types de trafic, survols avec Escale qui est divisée en deux sous types, nationaux et internationaux, survols sans Escale et vols spéciaux. La figure (1.22) représente l'organigramme géré par le centre de contrôle régional d'Alger.

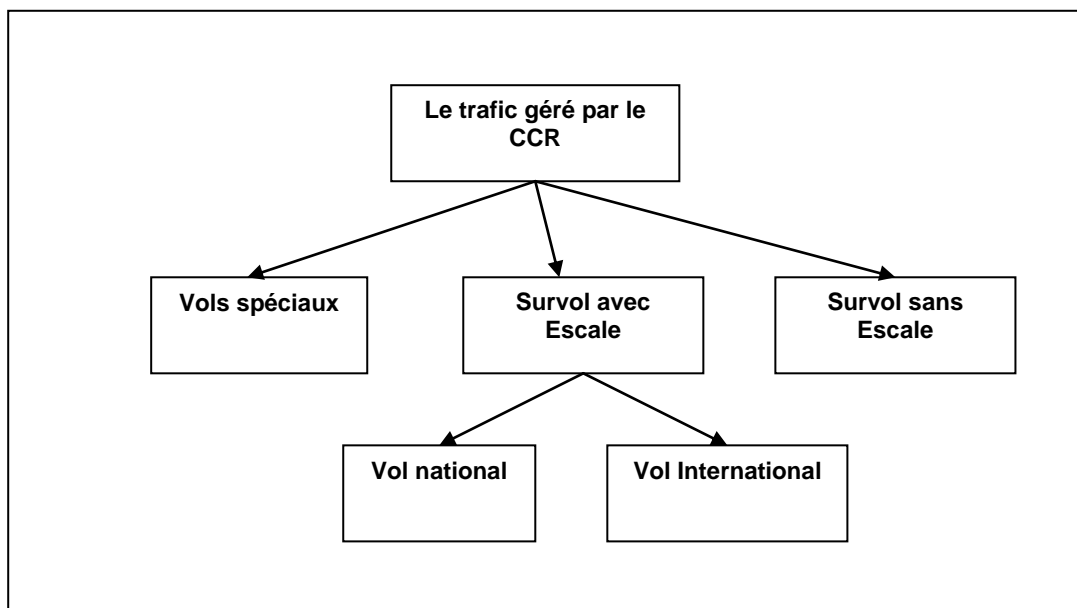


Figure 1.22 : L'organigramme de trafic géré par CCR d'Alger.

Pour la bonne compréhension des différents types de trafics aériens, nous donnons quelques définitions :

- **Mouvements commerciaux** : C'est les Mouvements d'aéronefs appartenant à des compagnies aériennes effectuant le transport des passagers et du fret (régulier, non régulier).
- **Mouvements non commerciaux** : Comprend les mouvements d'aéronefs effectuant des vols d'aéro-clubs, vols privés, de travail et taxi aérien, de compagnies aériennes sans chargement (entraînement du personnel navigant mise en place, essai, etc.), évasant (évacuation sanitaire) nationaux étrangers.
- **Survol avec Escale** : Il s'agit de vol comportant au moins une escale sur le territoire national.
- **Survol sans Escale** : Vols sans atterrissage (transit).
- **Vols spéciaux** : V.I.P, privés, etc.

Aéroport international : Aéroport d'entrée et de sortie destinée au trafic aérien international où s'accomplissent les formalités de douanes, de contrôle des personnes, de santé publique et de contrôle vétérinaire et sanitaire.

1.5.2 Évolution du trafic aéroports (2007-2017)

Le tableau (1.6) représente l'évolution du trafic d'aéroport pendant une fourchette de dix ans allant de 2007 jusqu'au 2017 plusieurs constatations sont à évoquer :

Tableau 1.6 : Représente Evolution du trafic aéroports : (2007-2017) [21].

<i>Années</i>	<i>Commerciaux Nationaux (1)</i>	<i>Commerciaux Internationaux (2)</i>	<i>Total (1)+(2)</i>	<i>VAR EN %</i>	<i>Non Commerciaux</i>	<i>VAR EN %</i>	<i>TOTAL GENERAL</i>	<i>VAR EN %</i>
2007	51 293	38 627	89 920	0,8	60 365	2,8	150 285	1,6
2008	56 772	40 907	97 679	8,6	63 297	4,9	160 976	7,1
2009	65 998	44 791	110 789	13,4	64 016	1,1	174 805	8,6
2010	61 952	49 591	111 543	0,7	63 946	-0,1	175 489	0,4
2011	63 449	51 661	115 110	3,2	64 170	0,4	179 280	2,2
2012	62 081	55 415	117 496	2,1	68 015	6,0	185 511	3,5
2013	64 652	60 893	125 545	6,9	77 642	14,2	203 187	9,5
2014	68 721	67 198	135 919	8,3	71 692	-7,7	207 611	2,2
2015	73 321	69 362	142 683	5,0	73 418	2,4	216 101	4,1
2016	82 719	72942	155 661	9,1	81379	10,8	237 040	9,7
2017	84 460	77 847	162 307	4,3	81 661	0,3	243 968	2,9

1- On constate que le trafic aérien dans son ensemble à évoluer vers une croissance, mais le rythme de cette dernière a changé d'une Année à l'autre. par exemple, pendant l'année 2007 à 2009 et l'une catégorie à l'autre.

- 2- On remarque une flambé du trafic commercial national entre 2008-et 2009 et puis un rythme moins accéléré entre 2009 puis 2013, et puis la croissance a repris un rythme accéléré atteignant 84460 Mvts en 2017.
- 3- On constate que l'évolution du trafic commercial international à évolué d'une façon croissante et régulière avec un pic de 77847 Mvts en 2017.
- 4- On constate que l'évolution du trafic aérien non commercial varié d'une façon croissante mais d'une manière irrégulière (exemple 2013 est de l'ordre de 77642 Mvts et en 2014 était de 71692Mvt).

Commentaire

On constate que le trafic aérien d'aérodrome a connu une évolution considérable pendant la décennie (2007-2017).avec une mutation au cours de période 2013 jusqu'à 2017 dépassant les 200.000Mvt.

Tableau 1.7 Représente Un Récapitulatif de Trafic par Aéroport 2017[21]

Nbr	Aéroports	Trafic Commercial			Trafic Non Commercial			Total général	Part en %
		National	International	Total	National	International	Total		
1	ALGER	26 917	49 191	76 108	16 316	2 448	18 764	94 872	38,9%
2	ORAN	8 654	12 852	21 506	1 194	253	1 447	22 953	9,4%
3	H-MESSAOUD	7 553	437	7 990	14 395	165	14 560	22 550	9,2%
4	CONSTANTINE	7 210	5 303	12 513	1 856	122	1 978	14 491	5,9%
5	BATNA	616	381	997	11 925	9	11 934	12 931	5,3%
6	ANNABA	5 151	2 482	7 633	3 091	60	3 151	10 784	4,4%
7	OUARGLA	2 014	99	2 113	2 392	0	2 392	4 505	1,8%
8	ADRAR	2 599	1	2 600	1 646	256	1 902	4 502	1,8%
9	IN-AMENAS	833	0	833	3 394	67	3 461	4 294	1,8%
10	GHARDAIA	1 781	38	1 819	1 058	1 312	2 370	4 189	1,7%
11	TLEMEN	1 020	1 600	2 620	1 285	18	1 303	3 923	1,6%
12	BEJAIA	1 438	1 996	3 434	271	166	437	3 871	1,6%
13	SETIF	869	2 077	2 946	385	104	489	3 435	1,4%
14	ILLIZI	730	0	730	2 675	4	2 679	3 409	1,4%
15	TAMANRASSET	1 722	220	1 942	961	272	1 233	3 175	1,3%
16	BISKRA	1 987	311	2 298	838	13	851	3 149	1,3%
17	EL-OUED	2 104	92	2 196	937	16	953	3 149	1,3%
18	H-R'MEL	1 633	0	1 633	1 238	0	1 238	2 871	1,2%
19	TIARET	360	12	372	2 437	7	2 444	2 816	1,2%
20	BECHAR	1 429	98	1 527	1 072	0	1 072	2 599	1,1%
21	DJANET	731	0	731	1 656	96	1 752	2 483	1,0%
22	TINDOUF	1 182	50	1 232	962	141	1 103	2 335	1,0%
23	JIJEL	1 372	71	1 443	669	3	672	2 115	0,9%
24	IN SALAH	558	0	558	974	0	974	1 532	0,6%
25	TOUGGOURT	408	0	408	994	0	994	1 402	0,6%
26	TIMIMOUN	1 104	2	1 106	64	2	66	1 172	0,5%
27	TEBESSA	1 004	0	1 004	76	0	76	1 080	0,4%
28	EL-GOLEA	390	0	390	482	28	510	900	0,4%
29	CHLEF	184	520	704	41	0	41	745	0,3%
30	BB MOUKHTAR	378	0	378	208	1	209	587	0,2%
31	LAGHOUAT	360	0	360	10	0	10	370	0,2%
32	BOU-SAADA	0	0	0	284	0	284	284	0,1%
33	MASCARA	0	0	0	240	0	240	240	0,1%
34	EL BAYADH	164	14	178	41	1	42	220	0,1%
35	IN GUEZZAM	1	0	1	22	0	22	23	0,0%
36	MECHERIA	4	0	4	8	0	8	12	0,0%
TOTAL		84 460	77 847	162 307	76 097	5 564	81 661	243 968	100%
PART EN %		35%	32%	67%	31%	2%	33%	100%	

L'aérodrome d'Alger est en première place avec un total général de 94 872 Mvts, l'aérodrome d'Oran vient en deuxième position avec un total de 22 953 Mvts, suivi par l'aérodrome de H. Messaoud avec 22 550 Mvts, puis l'aérodrome de Constantine avec 14 491 Mvts, et en cinquième position on trouve Batna avec 12 931 Mvts, voir le tableau (1.7).

1.5.3. Trafic en route

1.5.3.1. Evolution de Trafic en route 2007-2017

Le tableau 1.8 : Représente l'évolution de Trafic en route 2007-2017 [21].

Années	Survol avec escale				Survol sans escale		Total	
	National	international	TOTAL	VAR EN %	Transit	VAR EN %	Total	VAR EN %
2007	58 836	45 404	104 240		54 268		158 508	
2008	63 513	47 680	111 193	6,7%	57 121	5,3%	168 314	6,2%
2009	66 554	52 194	118 748	6,8%	58 119	1,7%	176 867	5,1%
2010	63 406	57 010	120 416	1,4%	64 620	11,2%	185 036	4,6%
2011	66 256	59 258	125 514	4,2%	68 247	5,6%	193 761	4,7%
2012	69 170	63 057	132 227	5,3%	72 116	5,7%	204 343	5,5%
2013	69 010	67 447	136 457	3,2%	78 909	9,4%	215 366	5,4%
2014	69 247	72 825	142 072	4,1%	83 546	5,9%	225 618	4,8%
2015	73 715	74 767	148 482	4,5%	91 588	9,6%	240 070	6,4%
2016	78 612	78 902	157 514	6,1%	96 925	5,8%	254 439	6,0%
2017	79 284	82 314	161 598	2,6%	99 113	2,3%	260 711	2,5%

• Trafic national :

On constate que l'évolution du trafic national a connu une évolution croissante de 2007 à 2009 qui correspond respectivement à 58836 Mvts et 56554 Mvts et puis une diminution de 63406 Mvt en 2010. Et puis il a repris son augmentation

normale en 2011 et juste après s'installe une stagnation pendant trois ans jusqu'à 2014, et après en 2015 la courbe a repris sa croissance régulière.

• **Trafic international :**

L'évolution de trafic aérien international a connu une nette croissance régulière entre 2007 avec 45404 Mvt et de 82314Mvts en 2017.

• **Le trafic de transit**

Le survol sans escale de ces dernières années a connu une croissance relativement lente, mais constante avec une moyenne annuelle de 6.25%

1.5.3.2. Evolution par secteur 2012-2017

Tableau 1.9 : Représente Evolution du trafic par secteur : (2012-2017) [21].

Trafic secteur	2012	2013	VAR EN %	2014	2015	VAR EN %	2016	2017	VAR EN %
TMA ALGER	107 165	116 880	9,1%	119 111	124 977	4,9%	137 388	140 821	2,5%
TMA EST	96 122	97 347	1,3%	100 704	107 053	6,3%	115 086	120 670	4,9%
TMA OUEST	56 682	63 798	12,6%	66 293	69 868	5,4%	75 470	75 402	-0,1%
SUD/SUD	58 659	62 470	6,5%	66 710	72 609	8,8%	74 511	77 850	4,5%
SUD/EST	62 392	60 787	-2,6%	64 489	72 062	11,7%	73 474	74 295	1,1%
SUD/CENTRE	45 233	49 705	9,9%	51 387	53 624	4,4%	56 416	59 849	6,1%
SUD/OUEST	19 340	20 115	4,0%	21 458	22 324	4,0%	23 364	24 847	6,3%

Conclusion

On constate un déséquilibre entre les différents secteurs de contrôle avec un trafic plus dense de secteur TMA Centre et en 2eme position vient TMA Est. Alors que dans le sud le trafic aérien est moins dense relativement au nord avec un secteur Sud/Sud plus chargé car il présente un vaste espace géographique au sud. et une plateforme pétrolière dans la région, voir le tableau (1.9).

CHAPITRE 2

ETUDE DE CONCEPT CNS-ATM

2.1 Introduction aux systèmes CNS-ATM

2.1.1 Évolution du trafic aérien

Au cours des dernières décennies, la croissance du transport aérien a été plus rapide que celle de la plupart des autres secteurs de l'économie. Entre 2007 et 2017, le trafic de passagers et de marchandises sur les services réguliers a progressé d'un taux moyen annuel de 5.0 et 7.6 % respectivement. Sur cette même période, le nombre de départs d'aéronefs et le nombre de kilomètres parcourus par l'ensemble des aéronefs ont augmenté de 3.7 % et 5.8 % respectivement.

2.1.2 Le comité FANS

En 1983, constatant la croissance régulière de l'aviation civile, les prévisions de croissances du trafic et conscient de ce que de nouvelles technologies apparaissaient à l'horizon, le conseil de l'OACI se pencha à cette époque sur les besoins futurs de la communauté de l'aviation civile. Sa réflexion l'amena à conclure qu'il fallait engager une analyse et une réévaluation approfondie des méthodes et des techniques qui avaient servi l'aviation civile internationale pendant des années. D'autre, voyant que les systèmes et les procédures employées par l'aviation civile avaient atteint leurs limites, le conseil prit une importante décision à un moment clé, celle de créer le comité spécial des futurs systèmes de navigation aérienne (FANS). Le comité FANS fut chargé d'étudier, de reconnaître et d'évaluer de nouvelles techniques, dont l'utilisation des satellites et de faire des recommandations en vue du développement de la navigation aérienne à l'intention de l'aviation civile sur une période de 25 ans.

Le comité FANS constata qu'il était nécessaire de mettre au point des systèmes nouveaux afin de s'affranchir des limites des systèmes classiques et permettre ainsi un développement à l'échelle mondiale. Les futurs systèmes devaient pouvoir évoluer, de façon à répondre davantage aux besoins des usagers, dont la santé économique allait être directement liée à l'efficacité des systèmes. Le comité FANS conclut que la technologie reposant sur les satellites offrait une solution viable pour remédier aux carences des systèmes classiques à base de stations sol, et pour répondre aux futurs besoins de la communauté de l'aviation civile internationale [22].

Le comité FANS jugea en outre que, du fait que ses nombreux éléments sont étroitement liés et interdépendants, l'évolution de l'ATM à l'échelle mondiale faisant appel à ces nouveaux systèmes exigerait une approche multidisciplinaire. Conscient que les nouveaux concepts pourraient un jour soulever des questions de coordination et des questions institutionnelles et se rendant compte qu'il faudrait une planification au niveau mondial, le comité FANS recommanda au conseil de L'OACI, dans son rapport final, de créer un nouveau comité qui donnerait des avis sur le contrôle, la coordination de la mise au point et la planification de la transition à l'échelle mondiale. Ainsi, on pourrait mettre en œuvre de futurs systèmes CNS-ATM de façon rentable et équilibrée dans le monde entier, tout en tenant compte des systèmes de navigation aérienne et des zones géographiques [23].

En juillet 1989, donnant suite aux recommandations du comité FANS, le conseil de l'OACI institua le comité spécial chargé de surveiller et de coordonner le développement du futur système de navigation aérienne et la planification de la transition (FANS phase II). Le comité FANS phase II acheva ses travaux en octobre 1993, il reconnut que la mise en œuvre des technologies connexes et les bénéfices escomptés ne se produiraient pas du jour au lendemain, mais s'étaleraient sur un certain temps, selon les infrastructures aéronautiques dont étaient dotés les divers états et régions et selon des besoins d'ensemble de la communauté aéronautique. Le comité FANS phase II convint en outre que, pour l'essentiel, les technologies auxquelles il songeait devenaient

accessibles et qu'il fallait commencer par rassembler de l'information et lorsque c'était possible, par tirer rapidement parti des technologies disponibles.

2.1.3 La dixième conférence de navigation aérienne

En septembre 1991, 450 représentants de 85 États et de 13 organisations internationales se réunirent au siège de l'OACI, à Montréal, c'est à l'occasion de la dixième conférence de navigation aérienne, pour étudier et adopter le concept d'un futur système de navigation aérienne élaboré par les comités FANS qui répond aux besoins de la communauté de l'aviation civile au-delà du tournant du siècle. Le concept FANS, connu aujourd'hui sous la désignation de systèmes de communications, navigation, et surveillance et de gestion du trafic aérien (CNS-ATM), fait intervenir un ensemble complexe de technologies connexes qui reposent largement sur les satellites. Il s'agit de la vision qu'a élaborée l'OACI avec l'entière coopération de tous les secteurs de la communauté aéronautique pour répondre aux besoins futurs du transport aérien international.

La conférence a produit une série de recommandations acceptées de façon universelle et qui couvre l'éventail complet des activités CNS-ATM.

Cet entérinement des systèmes CNS-ATM à la dixième conférence de navigation aérienne a marqué le début d'une ère nouvelle pour l'aviation civile internationale et il a ouvert la voie à de multiples activités relatives à la planification et à l'implantation des nouveaux systèmes. A la suite de cette conférence, le conseil de l'OACI souligna à nouveau l'importance du rôle des régions et États en matière de planification et de mise en œuvre des systèmes CNS-ATM et en matière de transition vers ces systèmes, il réaffirma aussi la nécessité d'une participation active des bureaux régionaux de l'OACI dans ces domaines.

2.1.4 Planification mondiale

Pour faire progresser la mise en œuvre des systèmes CNS-ATM, il fallait un plan d'action. Le premier pas sur cette voie, fut la rédaction du plan mondial

coordonné aux systèmes CNS-ATM de l'OACI et qui constituait un appendice au rapport de la quatrième réunion du comité spatial chargé de surveiller et de coordonner le développement du futur système de navigation aérienne et la planification de la transition (FANS phase II) [24-25]. En 1996, le conseil de l'OACI jugea que ce plan avait bien joué son rôle et qu'il avait contribué de façon significative à la concrétisation de la version des comités FANS, tout en sensibilisant la communauté internationale aux questions connexes de la mise en œuvre. Il conclut toutefois que les systèmes CNS-ATM avaient acquis une certaine maturité et qu'il fallait donc un plan plus concret qui englobe tous les faits nouveaux et qui soit axé sur la mise en œuvre au niveau régional.

Le conseil demanda par conséquent au secrétariat de l'OACI de revoir le plan mondial et d'en faire un document évolutif, composé d'éléments techniques, opérationnels, économiques, financiers, juridiques et institutionnels offrant des indications pratiques et des conseils aux groupes régionaux et aux états sur les stratégies de mise en œuvre et de financement ainsi que les aspects relatifs à la coopération technique. L'édition révisée du plan mondial couvre donc ces aspects des systèmes CNS-ATM.

2.1.5 Faiblesses des systèmes classiques

Le comité FANS se rendit rapidement compte que pour un dispositif de navigation aérienne mondiale idéal, l'objectif ultime est de fournir un système rationnel et rentable adaptable à tous les types de vols et offrant toute la liberté quadridimensionnelle (espaces et temps). Dans cette optique, il apparut que le dispositif global de navigation qui existait ainsi que ses sous-systèmes souffraient d'un certain nombre de faiblesses d'ordre technique, opérationnel et économique ainsi qu'en matière de procédures et de mise en œuvre. Après des analyses approfondies, le comité FANS a conclu que les insuffisances des systèmes d'alors (entre 1983 à 1988) dans les diverses régions du monde se résumaient essentiellement à trois facteurs, à savoir :

- ✚ Les limites de propagation des systèmes dans le domaine optique;
- ✚ Les difficultés pour diverses raisons, dans la mise en œuvre des systèmes CNS-ATM existants et leurs exploitations régulières dans de vastes parties du monde ;
- ✚ Les limites des communications vocales et le manque de systèmes d'échange de données numériques air-sol pour le bon fonctionnement des systèmes automatisés à bord et au sol.

Les effets de ces limites ne sont pas les mêmes dans toutes les régions du monde, le comité FANS a jugé que presque partout, une ou plusieurs d'entre elles faisaient obstacle au développement de l'ATM, les limites étant inhérentes aux systèmes eux-mêmes. D'autre part, le comité FANS a jugé peu probable que le système ATS mondial de l'époque puisse être sensiblement amélioré. Il fallait donc penser, à de nouvelles approches qui permettent de repousser ces limites en faisant évoluer les systèmes ATS en un système ATM avec des progrès considérables en matière de sécurité, efficacité et de souplesse dans l'ensemble du monde.

2.2 Aperçu sur les systèmes CNS-ATM

2.2.1 Définition

Les systèmes de communication, de navigation et de surveillance qui font appel aux technologies numériques et aux systèmes satellitaires ainsi qu'à divers niveaux d'automatisation sont appliqués aux besoins d'un dispositif de gestion du trafic aérien mondial homogène, voir figure (2.1).

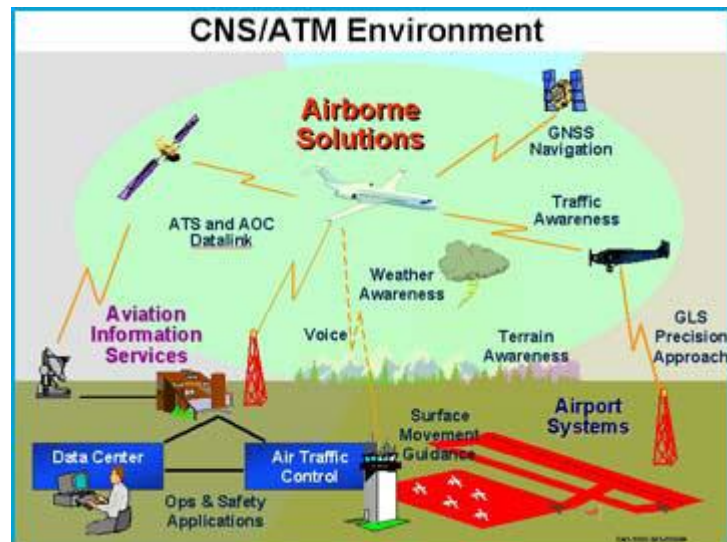


Figure 2.1 : Représente les différentes utilisations du concept CNS-ATM.

2.2.2 Vision stratégique

La mise en œuvre d'un dispositif pour une gestion du trafic aérien mondial homogène permet aux exploitants d'aéronefs de respecter les heures de départ et d'arrivée prévues et de suivre avec un minimum de contraintes les profils des vols qu'ils préfèrent, sans compromettre les niveaux de sécurité convenus [25].

2.2.3 Missions de la mise en œuvre

C'est de mettre en place un réseau de service de navigation aérienne homogène et coordonnée à l'échelle de la planète pour absorber la croissance mondiale du trafic aérien, tout en :[26].

- Rehaussant le niveau de sécurité actuel ;
- Rehaussant le niveau de régularité actuel ;
- Améliorant l'efficacité globale des opérations dans l'espace aérien et aux aéroports, de façon à accroître la capacité ;
- Augmentant les possibilités pour les usages de suivre les horaires et les profils de vol qu'ils préfèrent ;
- Réduisant au minimum les différences d'équipements de bord nécessaires entre les régions.

2.3 Systèmes de communication

2.3.1 Le rôle

L'élément de communication des systèmes CNS-ATM permet l'échange de données et de messages aéronautique entre les usages et/ou les systèmes automatisés aéronautiques. Les systèmes de communication servent aussi à appuyer certaines fonctions de la navigation et de surveillance.

2.3.2 Services de communication envisagés :

Il y a essentiellement deux catégories de communications aéronautiques :

- Les communications liées à la sécurité qui exigent une haute intégrité et une réponse rapide :
 - ✓ Communications des services de la circulation aérienne (ATSC) entre organes ATS et un aéronef dans le cadre du contrôle de la circulation aérienne (ATC), informations de vol, alertes, etc.
 - ✓ Communications du contrôle d'exploitation aéronautique (AOC) des exploitants d'aéronefs sur la sécurité, la régularité et l'efficacité des vols.
- Les communications sans rapport avec la sécurité :
 - ✓ Communications administratives aéronautiques (AAC) des membres du personnel ou d'organismes de l'aviation sur des questions d'ordres administratif ou privé ;
 - ✓ Communications aéronautiques des passagers (APC).

En général, les systèmes de communication CNS-ATM peuvent prendre en charge les deux catégories décrites ci-dessus. Cependant, les communications intéressant la sécurité aérienne ont toujours la priorité.

2.3.3 Principales caractéristiques des nouveaux systèmes de communication

Il y a un certain nombre de différences fondamentales entre les systèmes de communication aéronautiques classiques et les nouveaux systèmes

de communications CNS-ATM. Ci-joint, quelques-unes des principales caractéristiques propres aux nouveaux systèmes :

- ✓ La plupart des communications de routine sont assurées par l'échange des données ;
- ✓ Les communications vocales sont principalement utilisées dans les situations :
 - Autres que de routine et dans les situations d'urgence;
- ✓ L'accent est mis sur une connectivité et une exploitation mondiales ;

2.3.4 Communication Air-Sol

La plupart des communications air-sol régulières se font par échange de données numériques, le plus souvent : à l'aide d'un menu affiché sur un écran, l'utilisateur choisit le message approprié parmi un ensemble préétabli, ajoute les éléments nécessaires (ou un texte en style libre), puis le transmet. Certains transferts de données s'effectuent entre les systèmes automatiques embarqués et au sol sans nécessiter d'intervention manuelle, ce qui réduit considérablement le volume des communications vocales. Par conséquent, la charge de travail des pilotes et des contrôleurs est réduite. En revanche, dans les régions encombrées, les communications vocales resteront probablement le moyen d'échange de prédilection [27]. Idem dans les situations d'urgence où elles restent le principal moyen de communication air-sol utilisé.

Les messages air-sol empruntent une des liaisons radio suivantes :

- ✓ SMAS- Satellites de communication géostationnaires conçus expressément pour les communications mobiles. Ils offrent une couverture étendue/quasi mondiale ainsi que des canaux voix et données de grande qualité. Le SMAS convient particulièrement aux aéronefs qui volent dans les espaces aériens océaniques et les espaces aériens continentaux éloignés ;
- ✓ VHF (analogique) – les radios VHF analogiques existantes offrent une excellente fiabilité opérationnelle ; elles continueront d'être utilisées pour les

communications vocales dans les régions terminales encombrées ainsi que pour les communications générales autres que de routine dans les zones de couverture correspondantes. Mais à court ou à moyen terme, il pourrait y avoir saturation de la bande VHF attribuée aux communications aéronautiques dans certaines parties du monde. Pour y faire face, des mesures ont été prises afin de réduire de 25 kHz à 8.33 kHz l'espacement entre canaux, là où cela est nécessaire, et d'augmenter ainsi le nombre de canaux disponibles. De plus, on travaille actuellement à l'élaboration de normes relatives à une radio numérique à accès multiple par répartition dans le temps qui devrait permettre de résoudre à moyen terme le problème de l'encombrement du spectre des fréquences et d'améliorer les services air-sol ;

➤ HF (analogique)- les radiocommunications par bande HF permettent les échanges par-delà l'horizon, mais leurs fiabilités est limitées en raison principalement de la nature variable des caractéristiques de propagation des ondes. On prévoit que l'emploi accru du SMAS dans les régions océaniques ou éloignées entraînera une atténuation de l'encombrement des canaux HF et, éventuellement, une diminution de l'emploi du ban HF pour les communications de routine. Mais tant qu'une nouvelle constellation de satellites utilisable en aviation et couvrant la totalité du globe n'aura pas été mise en place, la HF demeurera le seul moyen de communication disponible pour les vols dans les régions polaires ;

✓ **Liaison numérique VHF (VDL) mode 1** : C'est vers la fin des années 1970 que les exploitants d'aéronefs ont commencé à utiliser la radio VHF analogique pour échanger des données. Les radios VHF de bords existantes ont servi au transfert des données AOC et AAC entre les aéronefs et leurs exploitants au moyen de stations sol et de réseaux d'interconnexion spéciaux. Le système connu sous le nom d'ACARS (système embarqué de communication, d'adressage et de compte rendu) a considérablement évolué et pris de l'ampleur.

Aujourd'hui, plusieurs grands transpondeurs aériens l'utilisent pour leurs communications AOC et AAC et dans une mesure limitée pour les communications ATSC non sensibles au facteur temps. L'ACARS n'a été soumis

à aucun processus de normalisation OACI. Par contre, la VDL mode 1 a été expressément conçue pour permettre l'emploi de la radio ainsi que du plan et de l'équipement de modulation ACARS. Le débit de données de la VDL en mode 1 est de 2400 bauds. Le mode 1 peut être considéré comme une étape vers le mode 2.

✓ **VDL mode 2** : Ce mode a été normalisé par l'OACI, exploite des techniques radio-numériques. Le débit de données nominal de 31.5 k bit/s est compatible avec l'espacement de 25 kHz des canaux. La VDL mode 2 est capable de prendre en charge les suites de protocoles de différentes applications opérationnelles, ce qui permet une utilisation beaucoup plus efficace du canal VHF ;

✓ **VDL mode 3** : Ce mode, que l'OACI est en train de normaliser, utilise une technique d'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT). L'AMRT fait appel à des processus radio numériques capables d'intégrer les systèmes de communication de données, l'utilisation du spectre VHF est améliorée par la fourniture de quatre canaux radio distincts sur une même porteuse (espacement de 25 kHz) ;

✓ **VDL mode 4** : Ce mode est fondé sur la technique dite de l'accès multiple par répartition dans le temps autogéré (STDMA), qui permet des capacités de liaison de données en navigation en plus des fonctions de communication de données ;

✓ **Liaison de données SSR mode S** – La liaison de données en mode S du SSR permet une capacité de surveillance et une liaison de données air-sol qui convient en particulier pour une messagerie de données limitée dans les régions à forte densité.

Elle peut en outre, fonctionner dans un environnement mixte de transpondeurs d'aéronef présentant des niveaux différents de capacité de liaison de données ;

✓ **Liaison de données HF** – Des études ont démontré qu'on peut utiliser la liaison de données HF pour les communications ATSC. Vu que les anomalies de

propagation affectent rarement l'ensemble des fréquences de la bande HF en tous lieux, grâce à un réseau soigneusement disposé de stations sol bien interconnecté et à un ensemble approprié de fréquences communes, il est possible, quels que soient le moment et le lieu, de trouver la fréquence qui convient le mieux pour transmettre des données. La liaison de données HF peut compléter le SMAS dans les régions océaniques ou éloignées et constitue un moyen primaire dans les régions polaires.

Les liaisons de données SMAS, VDL, SSR mode S et HF exploitent des techniques de transmission de données différentes, mais en tant que réseaux individuels, elles utilisent toutes le même protocole d'accès de réseau, qui est conforme au modèle de référence de systèmes ouverts (150) de l'organisation internationale de normalisation (ISO). On peut donc, les connecter à d'autres réseaux sol de façon à en relier l'extrémité aéronefs à n'importe quel système sol en utilisant des services et des protocoles d'interface communs également fondés sur le modèle 050 de l'ISO. Le service de communication qui assure l'interopérabilité des sous-réseaux des données sol, air- sol et avioniques pour les applications aéronautiques spécifiées est l'ATN. Les liaisons de données air-sol mentionnées ci-dessus sont compatibles avec l'ATN, elles peuvent donc en constituer des sous-réseaux [28].

Dans l'environnement ATN, les sous-réseaux sont reliés entre eux par des routeurs ATN qui choisissent le meilleur itinéraire à utiliser pour acheminer chaque message de données. La sélection de liaison de données air- sol se fait donc souvent de façon transparente pour l'utilisateur d'extrémité.

Les liaisons radio utilisées pour communiquer avec les aéronefs en vol sont d'une extrême importance pour la sécurité, la régularité et l'exploitation économique des vols. Il importe donc de mettre en place les arrangements techniques et institutionnels nécessaires pour :

- Veiller à ce que les services aéronautiques disposent d'un spectre radioélectrique (RF) suffisant, en tenant compte des niveaux actuels et prévus du trafic ;

- Prévenir de brouillage RF (RFI) dans les fréquences, les bandes et les services ainsi que chez les usagers des systèmes de radiocommunication aéronautiques ;
- Autoriser la fourniture de service de communication par des prestataires commerciaux.

2.3.5 Communication Sol-Sol

On prévoit que la plupart des communications de routine entre les usagers et les systèmes aéronautiques au sol se feront par échange de données. Les échanges entre des entités telles que les centres météorologiques, les bureaux NOTAM, les bandes de données aéronautiques, les organes ATS, etc., pourront prendre une des formes suivantes :

- ✓ Message de texte en style libre ;
- ✓ Message de données préétablies (auxquels un certain nombre d'éléments seront ajoutés manuellement) ;
- ✓ Échanges automatiques de données entre systèmes informatisés.

Une variété de réseaux au sol mis en œuvre par les états, par des groupes d'états ou par des fournisseurs commerciaux qui continueront d'offrir des services de communication de données aux usagers aéronautiques.

Toutefois, seuls des réseaux à commutation de paquets qui sont compatibles avec le modèle de référence OSI de l'ISO seront capables d'utiliser les services d'interconnexion des réseaux ATN. Avec la mise en œuvre progressive de l'ATN, l'emploi du réseau du service fixe des télécommunications aéronautiques (RSFTA) diminuera. Pendant la période de transition, il sera cependant possible de relier des terminaux du RSFTA à l'ATN grâce à des passerelles spéciales.

Avoir le choix entre plusieurs types de systèmes de communication offre des avantages sur le plan de la mise en œuvre, mais complique la planification régionale de système de navigation aérienne, surtout lorsqu'il s'agit d'harmoniser et de synchroniser des FIR voisins du point de vue des communications.

Une façon de régler ce problème consiste à abandonner la spécification de systèmes individuels et à traduire tous les besoins opérationnels pertinents propres à un espace aérien et un scénario donné en une série de paramètres de performance de communication. Ainsi l'expression « performance de communication requise (RCP) » désigne un ensemble de critères de communication bien quantifiés à respecter (capacité, disponibilité, taux d'erreur, temps d'acheminement). Une fois les RCP spécifiées pour un scénario opérationnel dans des systèmes qui satisfont aux critères établis, il peut être considéré alors comme étant acceptable pour l'exploitation.

2.3.6 Questions générales relatives à la transition

Les lignes directrices relatives à la transition vers les systèmes futurs poussent les usagers à se doter rapidement de l'équipement nécessaire pour tirer parti dès que possible des systèmes [29-30]. On ne pourra éviter une période de transition au cours de laquelle, à bord comme au sol, il faudra utiliser deux types d'équipement pour assurer la fiabilité et la disponibilité du nouveau système, mais les lignes directrices visent à limiter cette période au minimum.

2.4 Systèmes de navigation

2.4.1 L'objectif

L'élément navigation de systèmes CNS-ATM a pour objet d'assurer une capacité de détermination précise, fiable et fluide de la position des aéronefs, à l'échelle mondiale, grâce à l'introduction de la navigation aéronautiques par satellite, comme elle est bien présentée dans la figure (2.2).

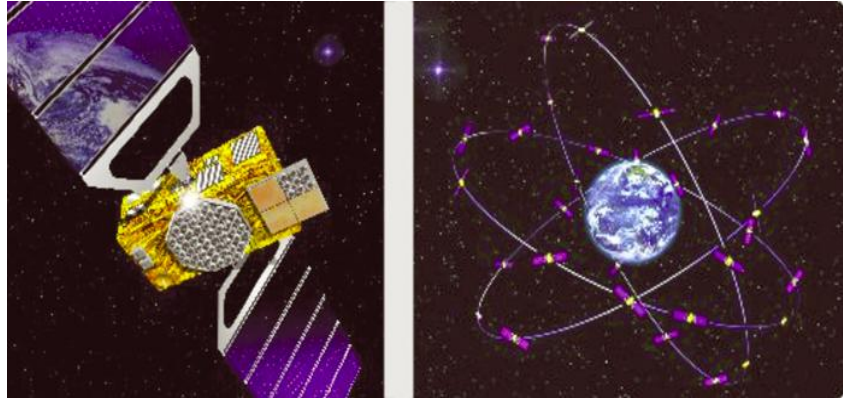


Figure.2.2 : Représentation de la navigation par satellite.

2.4.2 Qualités de navigation requise (RNP)

Les aéronefs modernes sont de plus en plus équipés pour la RNAV, laquelle facilite la mise en place d'un réseau de routes souple. De plus en ayant recours au concept de RNP, on peut éviter d'avoir à choisir entre des réseaux concurrents. Cependant, il demeure nécessaire d'assurer une normalisation internationale des techniques de navigation qui sont largement utilisées à l'échelle internationale. La RNP est l'énoncé de la précision de qualité de navigation à l'intérieur d'un espace aérien défini, compte tenu de la combinaison de l'erreur de capteur de navigation, de l'erreur de réception embarquée, de l'erreur d'affichage et de l'erreur technique de vol.

Les types de RNP pour les opérations en route sont identifiés à l'aide d'une seule valeur de précision, définie comme étant la précision minimale de navigation requise pour un niveau de confinement spécifié.

Les types de RNP pour les opérations d'approche, d'atterrissage et de départ sont définis du point de vue de précision, de l'intégrité, de la continuité et de la disponibilité de navigation requise. Bien que certains types de RNP prévoient une spécification de précision dans le plan latéral seulement (comme pour les phases en route). D'autres types prévoient des spécifications pour les plans latéral et vertical. Les types similaires à une spécification en route sont prévus pour les opérations telles que des approches classiques ou des départs. La plupart des types de RNP pour les opérations d'approche

et d'atterrissage exigent un confinement dans le plan vertical, fondé sur des renseignements produits par le système de navigation.

2.4.3 Systèmes de navigation par satellite (GNSS)

Le GNSS est un système mondial de détermination de la position et de l'heure, il se compose d'une ou plusieurs constellations de satellites, de récepteurs embarqués et d'un contrôle de l'intégrité du système, renforcé selon les besoins afin d'appuyer la RNP pour la phase effective d'exploitation. Les systèmes de navigation par satellite actuellement en exploitation sont le GPS (système mondial de localisation) des États-Unis et le GLONASS (système mondial de satellites de navigation) de la Fédération de Russie. Ces deux systèmes ont été présentés à l'OACI comme moyens d'appui au développement évolutif du GNSS [31.32]. En 1944, le conseil de l'OACI a accepté

la proposition des États-Unis pour le GPS et en 1996, il a accepté l'offre de la Fédération de Russie concernant le GLONASS (figure 2.3).

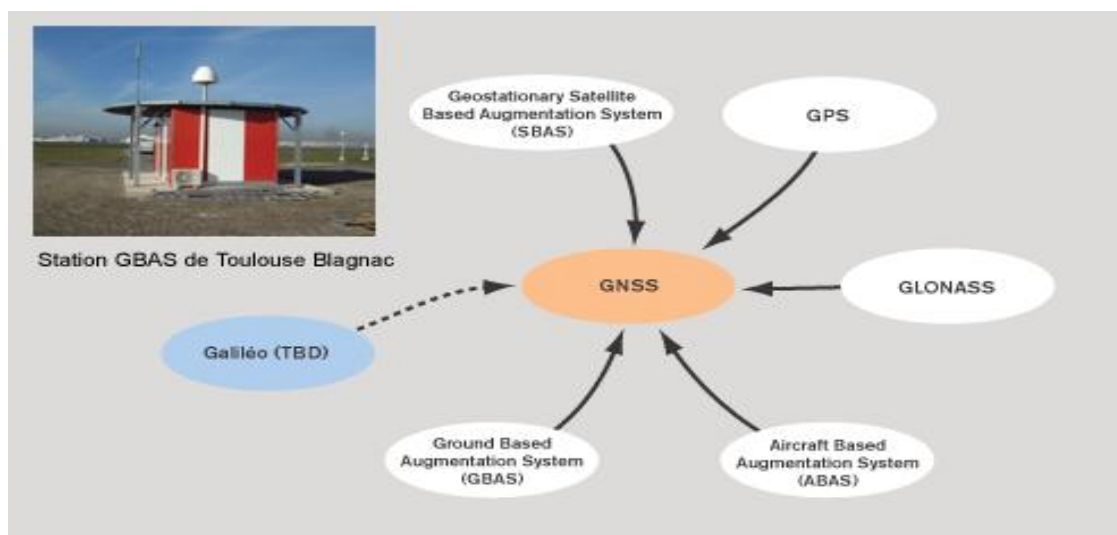


Figure.2.3 : Représentation des systèmes de navigation par satellite (GNSS).

Le secteur spatial GPS est composé de 24 satellites sur six plans d'orbites. Les satellites évoluent sur des orbites quasi circulaires à 20 200 km (10 900 NM),

indiquées à 55° par rapport à l'équateur et chaque satellite effectue une révolution en 12 heures approximativement.

Le secteur spatial GLONASS comporte 24 satellites opérationnels et plusieurs autres de rechange. Les satellites GLONASS évoluent à une altitude de 19 100 km et ont une durée de révolution de 11 heures 15 minutes. Huit satellites sont placés à distance égale sur chacune des trois phases d'orbite, l'inclinaison est de 64.8° et l'espacement de 120° .

2.4.4 Renforcements du GNSS

Pour surmonter les limites inhérentes aux systèmes et répondre aux besoins en matière de performances (précision, intégrité, disponibilité et continuité de service) pour toutes les phases de vol, le GPS et GLONASS ont besoin de divers degrés de renforcement. Ces derniers sont classés en trois grandes catégories : sur aéronefs, au sol et sur satellite.

Renforcements sur aéronefs

L'un des types de systèmes de renforcement embarqué (ABAS) est appelé contrôle autonome de l'intégrité par le récepteur (RMM) et peut être utilisé, s'il y a plus de quatre satellites en visibilité directe disposés selon une géométrie adéquate. Si l'on dispose de cinq satellites en visibilité, cinq positions indépendantes peuvent être calculées. Par contre, si ces positions ne concordent pas, on peut en déduire qu'un ou plusieurs des satellites fournissent des renseignements inexacts. Dans le cas, où l'on dispose de six satellites ou plus en visibilité, on peut calculer un plus grand nombre de positions indépendantes et un récepteur peut alors être en mesure d'identifier un satellite défaillant et l'exclure des calculs pour la détermination des positions.

D'autres renforcements sur les aéronefs peuvent être aussi mis en œuvre : on parle habituellement de contrôle autonome de l'intégrité par aéronefs (AAIM). Par exemple, un système de navigation par inertie peut aider le GNSS durant de courtes périodes, lorsque les antennes de navigation par satellite sont masquées par l'aéronef à l'occasion de manœuvres, ou durant les périodes

où le nombre de satellites en visibilité est insuffisant. Les techniques de renforcement particulièrement utilisées pour améliorer la disponibilité de la fonction navigation, comprennent aussi l'aide altimétrique, des sources d'indication de l'heure plus précises ou certaines combinaisons de données de capteur réunies à l'aide de techniques de filtrage.

✚ Renforcement au sol

Pour les systèmes de renforcement à base de stations sol (GBAS) (on parle aussi de renforcement à couverture locale). Un moniteur est placé à l'aéroport où l'on souhaite effectuer des opérations de précisions, ou à proximité, les signaux sont envoyés directement aux aéronefs qui se trouvent à proximité (environ 37 km, soit 20 NM) [33] Ces signaux fournissent des rectifications pour augmenter la précision de la position localement, ainsi que des renseignements sur l'intégrité des satellites. Cette capacité exige des liaisons de données entre surface et aéronef.

✚ Renforcement sur satellite

Il n'est pas possible en pratique d'assurer une couverture à l'aide des systèmes au sol pour toutes les phases de vol. L'une des manières d'assurer une couverture de renforcement sur de vastes régions consiste à utiliser des satellites pour transmettre des renseignements de renforcement. C'est ce que l'on appelle le système de renforcement satellite (SBAS), voir figure (2.4).



Figure.2.4 : Représente le système de renforcement du GNSS.

La fourniture d'un renforcement satellitaire par des satellites géostationnaires présente certaines limites qui font que l'on ne peut en attendre un soutien pour toutes les phases de vol, notamment pour les approches de précisions et les atterrissages de plus hautes catégories. Habituellement, ces satellites évoluent sur une orbite équatoriale, leurs signaux ne sont pas reçus dans les régions polaires et peuvent être masqués par la structure des aéronefs ou le relief. On en déduit que d'autres orbites de satellites de renforcement GNSS et/ou des renforcements au sol doivent être envisagés pour combler ces failles.

2.4.5 Avionique

Les récepteurs GPS ou GLONASS simples qui n'ont pas de capacité RAIM (ou d'autres formes de contrôle d'intégrité) ne peuvent généralement pas répondre aux besoins dans toutes les phases de vol. Des systèmes à capteurs multiples, utilisant le GNSS comme l'un des capteurs, devraient entrer en service prochainement. Ces systèmes de navigation présentent généralement de meilleurs niveaux de performances que les capteurs distincts ou les systèmes autonomes. Les aéronefs qui utilisent des systèmes de navigation à capteurs multiples, tels que les systèmes intégrés GNSS/ IRS ou GNSS/IRS/FMS, peuvent être certifiés comme répondant à des niveaux de RNP qui ne sont pas obtenus grâce au seul emploi du GPS ou du GLONASS pour l'exploitation dans une phase particulière de vol.

2.4.6 Systèmes coordonnés WGS-84

Le succès de la mise en œuvre mondiale de la navigation par satellite dépend de l'existence d'une base de données de coordonnées et de procédures d'une très haute qualité. Il est possible d'obtenir une navigation précise par satellite que lorsque les coordonnées obtenues du sol, les coordonnées calculées et les coordonnées obtenues des systèmes satellites ont le même système de référence géodésique.

Pour appuyer une technologie satellitaire en pleine évolution, l'OACI a adopté le WGS-84 comme système de référence géodésique commun pour l'aviation civile, en fixant au 1 janvier 1998 la date d'application [34].

La mise en œuvre du WGS-84 prévoit entre autres l'adaptation des coordonnées et des systèmes de référence existant au WGS-84.

2.4.7 Introduction progressive du système GNSS

La mise en œuvre du GNSS s'effectue de façon progressive, permettant ainsi d'apporter au système des améliorations graduelles. Les applications à court terme du GNSS doivent permettre l'introduction rapide de la navigation en route par satellite, en utilisant les systèmes satellitaires existants (GPS et GLONASS) et essentiellement des renforcements sur aéronefs [35].

Les applications à moyen terme feront appel aux systèmes existants de navigation par satellite, complétés à l'aide de tout renforcement ou toute combinaison de :

- ✓ GNSS comme moyen supplémentaire doit être utilisé en conjonction avec un système unique de navigation. Il doit répondre aux exigences en matière de précision et d'intégrité pour une opération ou une phase de vol données. Les systèmes uniques de navigation qui appuient une opération ou une phase de vol donnée doivent être embarqués et peuvent être contrôlés par vérification croisée.
- ✓ GNSS comme moyen primaire doit répondre aux exigences en matière de précision et d'intégrité, mais n'a pas besoin de répondre intégralement aux exigences de disponibilité et de continuité de service pour une opération ou une phase de vol donnée. La sécurité est assurée en limitant les opérations à des périodes spécifiques et en appliquant des restrictions appropriées en matière de procédures. Il n'est pas nécessaire de prévoir à bord un système unique de navigation pour appuyer le GNSS.
- ✓ GNSS comme moyen unique doit permettre aux aéronefs de répondre, pour une opération ou phase de vol donnée, aux quatre exigences que sont

la précision, l'intégrité, la disponibilité et la continuité du service. Cet objectif peut être réalisé à l'aide d'une installation autonome ou d'une installation à capteurs multiples.

2.5 Systèmes de surveillance actuels

Les systèmes de surveillance utilisés actuellement peuvent être divisés en deux types : **i)** les systèmes de surveillance dépendants et **ii)** les systèmes de surveillance indépendants. Dans les systèmes de surveillance dépendants, la position de l'aéronef est déterminée à bord puis transmise à l'ATC. Les comptes rendus des positions vocaux actuels constituent un système de surveillance dépendant dans lequel la position de l'aéronef est déterminée à partir de l'équipement de navigation de bord puis communiquée par le pilote à l'ATC sur une liaison radiotéléphonique. La surveillance indépendante est un système qui mesure la position de l'aéronef à partir du sol. La surveillance actuelle est basée sur les comptes rendus de position vocaux ou sur le radar (PSR ou SSR), qui mesure la distance et l'azimut de l'aéronef depuis la station au sol.

2.5.1 Comptes rendus de position

La surveillance par comptes rendus de position vocaux est principalement utilisée dans l'espace aérien océanique et pour le contrôle d'aérodrome et le contrôle région à l'extérieur de la zone de couverture radar. Les pilotes rendent compte de leur position par radio VHF ou HF.

2.5.2 Radar primaire de surveillance (PSR)

Le système PSR au sol donne des informations sur le relèvement et la distance de l'aéronef. Il ne requiert aucun emport d'équipement par aéronef et peut détecter presque n'importe quelle cible en mouvement. L'utilisation croissante de systèmes de surveillance plus perfectionnés a pour effet de réduire l'emploi du PSR dans la gestion du trafic aérien international. Les radars primaires sont actuellement employés pour la détection des mouvements à la surface et des phénomènes météorologiques. Les radars d'approche de

précision (PAR) sont des radars primaires utilisés pour les approches effectuées selon des procédures précises auxquelles sont assujettis le pilote et le contrôleur; l'emploi des PAR dans les applications civiles diminue toutefois rapidement.

2.5.3 Radar secondaire de surveillance (SSR)

Le SSR interroge le transpondeur installé à bord de l'aéronef. En **mode A** le transpondeur fournit des informations d'identification ainsi que le relèvement et la distance de l'aéronef, et en **mode C** il indique l'altitude pression. Le SSR actuel est largement utilisé dans de nombreuses parties du monde où les systèmes de surveillance terrestres en visibilité directe sont appropriés. Le recours aux techniques monopulse (y compris les antennes à grande ouverture verticale) et à d'autres techniques de traitement avancées améliore la précision, la résolution et la qualité globale des données de distance et d'azimut. L'emploi du **mode S** est une technique qui utilise une adresse unique (l'adresse 24 bits) pour chaque aéronef, il rend le SSR encore plus utile pour la surveillance. Le SSR permet l'interrogation sélective des aéronefs équipés de transpondeurs mode S et élimine ainsi le chevauchement des réponses [36-37]. Il fournit également une liaison de données bidirectionnelle entre les stations mode S au sol et les transpondeurs mode S. Le SSR en mode S est l'outil de surveillance approprié dans les régions à forte densité de circulation. L'interconnexion des stations sol en groupes permet d'obtenir un système de surveillance et de communication plus performant.

2.5.4 Surveillance dépendante automatique (ADS)

La mise en œuvre de liaisons de données Air-Sol et de systèmes de navigation embarqués précis et fiables offre la possibilité d'assurer des services de surveillance dans les régions qui en sont dépourvues dans l'infrastructure actuelle, en particulier dans la région océanique et dans d'autres régions où il est difficile, peu économique ou carrément impossible de mettre en œuvre les systèmes actuels. L'ADS est une application destinée aux services ATS : les aéronefs transmettent automatiquement, sur une liaison de données, des données obtenues à l'aide des systèmes embarqués de navigation. Ces

données comprennent au minimum la position de l'aéronef en quatre dimensions, ainsi que des données complémentaires, le cas échéant.

Le système ATC automatique utilise les données ADS pour afficher l'information à l'écran du contrôleur. En plus, de fournir des données de position dans les régions dépourvues de couverture radar, l'ADS est utile dans d'autres régions, notamment les régions à forte densité de circulation, où elle peut compléter le radar secondaire de surveillance ou remplacer en cas de panne et réduire de ce fait la nécessité du radar primaire.

a) ADS en mode diffusion (ADS-B)

L'ADS-B est une extension de la technique ADS permettant de diffuser des données de position à plusieurs aéronefs ou organes ATM. Les aéronefs et les véhicules au sol munis de l'ADS-B diffusent périodiquement leur position et d'autres données pertinentes tirées de l'équipement de bord. Tout secteur usager, à bord ou au sol, situé dans la zone de couverture de l'émetteur peut traiter l'information. L'ADS-B n'est actuellement définie que pour les opérations en visibilité directe (diffusion sur les liaisons numériques VHF ou par squatter long SSR mode S). Il est également envisagé que l'ADS-B soit appliqué à la circulation à la surface, constituant ainsi une technique de remplacement pour les radars de surface comme les radars de surveillance des mouvements de surface [38-40], voir figure (2.5).

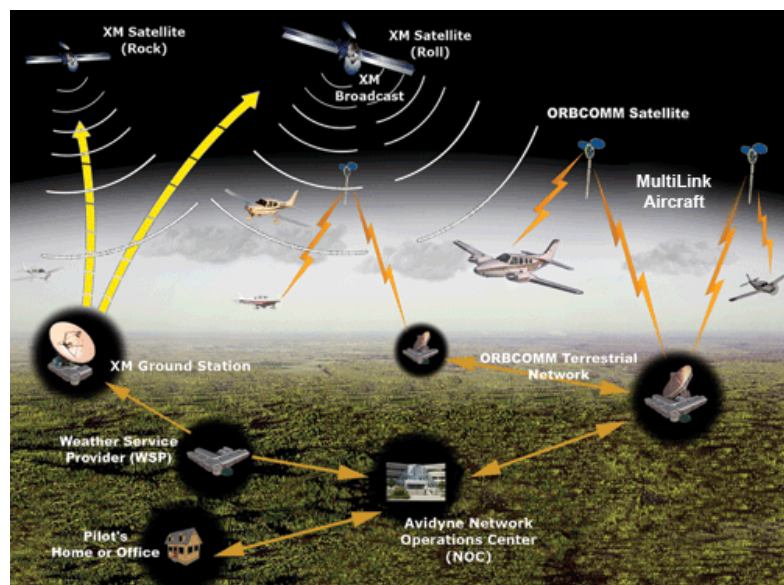


Figure.2.5 : Représentation de système ADS-B.

b) Surveillance automatique dépendante en mode contrats (ADS-C)

Avec l'ADS-C (Automatic Dependant Surveillance - Contract), l'avion utilise les systèmes de navigation satellitaires ou inertiels pour automatiquement déterminer et transmettre au centre responsable sa position et d'autres informations.

Les informations transmises via l'ADS-C peuvent être :

- la position de l'avion ;
- sa route prévue ;
- sa vitesse (sol ou air) ;
- des données météorologiques (direction et vitesse du vent, température...).

Les informations de l'ADS-C sont transmises via des communications point à point, par VHF ou par satellite. Les systèmes sol et embarqués négocient les conditions suivant lesquelles ces transmissions s'effectuent (périodiques, sur événement, à la demande, ou sur urgence).

L'ADS-C est typiquement utilisé dans les zones désertiques ou océaniques où il n'y a pas de couverture radar.

Les avantages de l'ADS-C sont :

- l'utilisation pour la surveillance des zones sans couverture radar ;
- la transmission de l'information route « prévue » ;
- la liaison de données air/sol (comme pour le Mode S et l'ADS-B).

Les inconvénients de l'ADS-C sont :

- il dépend entièrement de l'avion et de la véracité des données qu'il transmet.

2.5.5 Aperçu des options techniques

La mise en œuvre de l'ADS exige :

- ✓ L'horodatage des messages exact à une seconde près par rapport au temps universel coordonné (UTC) ;
- ✓ Une liaison de données air-sol ;
- ✓ Une infrastructure au sol pour communiquer les informations à l'ATC ;
- ✓ Des procédures appropriées des services de la circulation aérienne.

L'ADS exige une liaison de données air-sol bidirectionnelle tandis que l'ASD-B ne requiert que des liaisons unidirectionnelles puisque l'information est diffusée. Il est en outre fortement recommandé que l'ADS et l'ADS-B soient synchronisées sur une heure déterminée, par exemple l'heure de GNSS.

2.5.6 Besoins ATM en matière de surveillance

Les besoins ATM en matière de surveillance varient selon l'espace aérien et selon la densité et la complexité de la circulation aérienne. Ils peuvent être définis comme suit : [41].

- Les systèmes de surveillance actuels doivent transmettre des comptes rendus actualisés de la position de l'aéronef de manière à garantir la séparation :
 - ✓ Dans l'espace aérien océanique et à faible densité de circulation, y compris les régions isolées, une cadence d'actualisation de 12 secondes est appropriée ;
 - ✓ Dans les environnements à forte densité de circulation en route et en région terminale, une cadence d'actualisation de 4 secondes convient mieux aux besoins ;
- La précision du système de surveillance doit assurer les minimums de séparation dans un espace aérien défini ;
 - ✓ Le système de surveillance doit permettre à l'ATM d'offrir à l'utilisateur un choix de trajectoire de vol en route et de prendre complètement en charge les procédures d'urgences ;

- ✓ Le système de surveillance doit appuyer les opérations de recherche et de sauvetage.

2.5.7 Performances de surveillance requises (RSP)

L'émergence de plusieurs types de systèmes et de procédures de surveillance pour appuyer les fonctions ATM, en plus des moyens de surveillance existante, fait craindre que le système de navigation aérienne actuel ne devienne trop complexe. Il est vrai que l'idéal serait de n'avoir qu'un seul système capable de répondre à tous les besoins de surveillance pour toutes les phases de vol dans tous les types d'espaces aériens. D'un point de vue, coût-efficacité, il est nécessaire d'avoir des systèmes de surveillance de caractéristiques est de capacité différentes pour faire face à des conditions de trafic qui varient considérablement d'une région à faible densité de circulation aérienne à une région terminale à forte densité de circulation.

Jusqu'à ce qu'il y a un système de surveillance capable de répondre à tous les besoins, la communauté aéronautique doit examiner toutes les possibilités. Même si la diversité des options de surveillance assouplit le processus de planification, elle complique par contre, l'harmonisation des fonctions de surveillance [42].

L'expression « performances de surveillance requise (RSP) désigne donc un ensemble de paramètres de performance de surveillance bien quantifiée comme : la capacité, la disponibilité, la précision, la cadence d'actualisation, etc. une fois les RSP définies pour un scénario opérationnel dans un espace aérien donné, tout système ou toute combinaison de systèmes de surveillance qui satisfait aux paramètres fixés peut être jugé opérationnellement acceptable.

2.5.8 Tendances futures système de surveillance

L'ADS-B peut être utilisée comme complément du SSR (couverture complémentaire) ou même le remplacer dans les régions à densité de circulation faible à moyenne. Si les aéronefs sont convenablement équipés, les données fournies par l'ADS-B peuvent également servir de base à affichage d'informations de trafic dans le poste de pilotage (CDTI) et il est prévu d'incorporer cette fonction

à l'ACAS III. L'ACAS assure la surveillance en vol et l'évitement des abordages. Les systèmes de surveillance en vol peuvent offrir, en plus des évitements des abordages. On étudie actuellement les possibilités des surveillances en vol tout en veillant à maintenir l'intégrité de la fonction d'évitement des abordages [43].

Au 31 décembre 1996, quelque 20 000 avions étaient équipés de transpondeurs mode S et 10 000 d'entre eux étaient aussi munis de l'ACAS. Depuis, le nombre d'avions ainsi équipés a augmenté suite à l'obligation d'embarquer l'ACAS et les transpondeurs SSR signalant l'altitude-pression.

2.5.9 Questions générales relatives à la transition

Les lignes directrices relatives à la transition aux futurs systèmes incitent les usagers à se doter rapidement de l'équipement nécessaire pour bénéficier le plus tôt possible des avantages des nouveaux systèmes. On ne pourra, bien sûr, éviter une période de transition au cours de laquelle, à bord comme au sol, deux types d'équipement seront nécessaires pour assurer la fiabilité et la disponibilité du nouveau système, mais les lignes directrices visent à limiter cette période au minimum. Les régions, les usagers, fournisseurs de services et les fabricants dans la mise au point et le développement des systèmes CNS-ATM ainsi que dans la planification de leur mise en œuvre.

2.6 Aspects économiques des systèmes CNS-ATM

2.6.1 Introduction :

Actuellement, les difficultés que les États doivent surmonter pour la mise en œuvre des systèmes CNS/ATM sont d'ordre organisationnel et financier. Il existe déjà un certain nombre d'éléments indicatifs de politique dans ces deux secteurs. De plus, la plupart des indications pratiques de base concernant les possibilités en matière d'organisation, les analyses coûts avantages, le contrôle financier, le recouvrement des coûts et le financement ont déjà été élaborés, mais il faudra les réviser et les enrichir au besoin. Aussi, même si les analyses coûts avantages mettent en évidence la viabilité économique des systèmes

CNS/ATM [44]. Les États et les autres prestataires de services doivent établir de solides bilans de rentabilité afin de convaincre les organismes de financement d'investir dans ces systèmes.

Il est donc clair que l'OACI doit faire davantage pour aider un grand nombre d'États à mettre en œuvre les éléments indicatifs diffusés, d'une part, et à élaborer des bilans de rentabilité, d'autre part, car l'organisation inadéquate de l'exploitation des services de navigation aérienne et le manque de procédures de gestion financière éprouvée minent la confiance du monde financier, qui pourrait fournir aux États le financement requis pour mettre en œuvre des éléments de systèmes CNS/ATM.

Sauf quelques rares exceptions, la mise en œuvre et l'exploitation des principaux éléments de systèmes CNS/ATM exigent une coopération internationale, en raison de l'importance des investissements concernés et de la capacité des systèmes. Cependant, de nombreuses régions ont besoin d'assistance pour entreprendre des initiatives coopératives de ce type, ou encore d'autres initiatives coopératives ou conjointes qui peuvent apporter d'énormes avantages aux États.

2.6.2 Politique de l'OACI

Du 11 au 15 mai 1998, l'OACI a tenu à Rio de Janeiro la Conférence mondiale sur la mise en œuvre des systèmes CNS/ATM en même temps qu'une exposition technologique. La conférence devait servir de catalyseur pour une participation régionale et nationale hâtive et élargie à la mise sur pied des systèmes CNS/ATM. L'OACI y avait convié des partenaires intéressés par la mise en œuvre des systèmes CNS/ATM à l'échelle mondiale. On y a traité de certains aspects du financement et de la gestion de la mise en œuvre des systèmes CNS/ATM, de la coopération technique, de questions juridiques et de formation.

Le résumé qui suit fait ressortir les notions de coûts et d'avantages pour les fournisseurs comme pour les utilisateurs et comprend une comparaison

de différentes options de mise en œuvre ainsi que quelques évaluations de bilans de rentabilité qui ont été présentées.

2.7 les avantages des nouveaux systèmes

2.7.1 Les avantages pour les compagnies aériennes

Les avantages des systèmes CNS-ATM se traduisent par des communications rapides et fiables entre des éléments au sol et embarqués. Les systèmes de navigation plus précis et plus fiables permettent en outre aux aéronefs de naviguer dans tous les types d'espace aérien et de voler plus près les uns des autres.

Ce que les compagnies aériennes escomptent des systèmes CNS-ATM, ce sont des normes de séparation réduite dans l'espace aérien océanique, un plus grand accès aux régions isolées, la mise en place progressive d'une séparation verticale de 1000 ft au-dessus de 29000 ft, des possibilités d'établissement plus dynamique des routes, des acheminements plus directs ainsi qu'un rehaussement général de la sécurité [45].

2.7.2 Avantage pour les états qui fournissent l'infrastructure de navigation aérienne

Pour ce qui est des états qui fournissent et assurent le fonctionnement d'importantes infrastructures au sol, on escompte une réduction des frais de fonctionnement d'entretien des installations, à mesure que les systèmes sol traditionnel soient dépassés et feront de plus en plus place à la technologie des satellites [45-46]. Ces états bénéficieront en outre de l'amélioration de la sécurité.

Le CNS-ATM fournit aux états en développement une occasion tout à fait opportune de renforcer leur infrastructure de façon à faire face au surcroît de trafic moyennant un investissement minimal. Nombre de ces états disposent d'un vaste espace aérien qui n'est pas utilisable, surtout à cause des dépenses que représentent l'achat, le fonctionnement et l'entretien des infrastructures au sol

nécessaires. Les systèmes CNS-ATM leur apporteront la possibilité de moderniser leurs infrastructures à moindres frais, y compris pour les approches classiques pour les approches de précisions.

2.7.3 Aviation générale

Les appareils de l'aviation générale et les aéronefs à vocation utilitaire pourront accéder de plus en plus facilement à une avionique qui leur permettra d'évoluer dans des conditions de vol qui leur seraient normalement interdites ainsi que de décollage et d'atterrir dans des aéroports qu'il ne pourraient normalement pas utiliser à cause des coûts et des autres impératifs que cela suppose. De plus, la mise en œuvre des systèmes CNS-ATM ouvrira à la plupart des appareils de l'aviation générale de nombreuses zones isolées qui leur sont actuellement inaccessibles parce qu'ils ne peuvent pas y assurer leurs communications ou leur navigation dans de bonnes conditions de sécurité.

2.8 Gestion du trafic aérien (ATM)

ATM est le regroupement de fonctions en suspension dans l'air et au sol fonctions requises pour assurer le mouvement sûr et efficace des aéronefs durant toutes les phases de fonctionnement. ATM est aussi utilisé pour décrire l'espace aérien et de gestion du trafic aérien des activités qui sont menées conjointement par les autorités aéronautiques à la planification et l'organisation pour l'utilisation efficace de l'espace aérien et ses mouvements au sein de leurs régions de la responsabilité. Le concept opérationnel d'ATM doit avoir une portée visionnaire et de renvoyer à la notion d'endurance de vol, le partage et la séparation d'assurance de la conscience de la situation dans les cockpits.

L'objectif général de l'ATM est de permettre aux exploitants d'aéronefs de respecter les heures prévues de départ et d'arrivée et de suivre les profils de vol préféré avec un minimum de limitations et sans mettre en péril niveau convenu de sécurité.[47] ATM se compose d'un air et une composante sol, à la fois étroitement intégrée par le biais procédures bien définies et des interfaces.

Le composant sol est composé de gestion de l'espace aérien (ASM), le trafic aérien de mesure du débit (ATFM) et services de la circulation aérienne (ATS).

2.8.1 Gestion de l'espace aérien (ASM)

Son but est de maximiser l'utilisation de l'espace aérien disponible au sein d'une structure. Dans la conception de l'avenir, la structure de l'espace aérien, ses frontières et ses divisions ne doivent pas empêcher l'utilisation efficace de traitement automatisé de détection des conflits et la résolution technique ou l'utilisation du matériel avionique avancée. Le but de diviser l'espace aérien dans un secteur est de développer une configuration optimale, combinée avec l'utilisation d'autres méthodes appropriées pour renforcer les capacités ATC [48]. Lors de l'utilisation d'un l'espace aérien, une étroite coordination et la supervision sont indispensables afin de répondre aux contrastes et des exigences légitimes de tous les utilisateurs et de réduire toute restriction sur les opérations.

2.8.2 Débit de la circulation aérienne de mesure (ATFM)

Bien que l'ATM est conçu pour accueillir le maximum de la demande de trafic et peut être élargi pour répondre aux prévisions de croissance, il ne faut pas oublier qu'il n'est pas possible de répondre immédiatement à cette demande exacerbée ; pour cette raison, l'ATM a coordonné un sous-système appelé ATFM.

La fonction ATFM permet de trouver un équilibre entre la demande de trafic et la capacité ATC. La tâche de l'ATFM se concentre sur une idée générale de la circulation et sur la stratégie de planification nécessaire pour assurer l'utilisation efficace de l'aéroport et dans certains espaces aériens, car ils sont susceptibles de devenir des "goulets d'étranglement". Les unités ATS doivent fournir l'ATFM d'informations sur la capacité de gestion du trafic. L'ATFM doit également avoir accès à la base de données de vol des compagnies aériennes pour obtenir des informations [49].

Des bases de données communes sont nécessaires pour fournir un service cohérent ATFM. Enfin, l'ATFM unités doit prévoir pour l'introduction et le démarrage de systèmes automatisés.

Conclusion

+ Gestion du trafic aérien :

- Amélioration de la sécurité ;
- Accroissement de la capacité du système : utilisation optimale de la capacité aéroportuaire ;
- Réduction des retards ;
- Réduction des frais d'exploitation ;
- Utilisation plus efficace de l'espace aérien ; plus grande souplesse dans la réduction des séparations ;
- Planification plus dynamique des vols ; meilleure prise en compte des profils de vol optimaux ;
- Réduction de la charge de travail des contrôleurs / amélioration de la productivité ;

+ Communication :

- Liaisons air-sol plus directes et plus efficaces ;
- Amélioration du traitement des données ;
- Réduction de l'encombrement des canaux ;
- Diminution du nombre d'erreurs dans les communications ;
- Interopérabilité entre les applications ;
- Réduction de la charge de travail ;

+ Navigation :

- Services de navigation en tout temps avec un niveau élevé d'intégrité et de fiabilité à l'échelle mondiale ;
- Amélioration de la précision de la navigation quadridimensionnelle ;
- Réduction des coûts grâce à la réduction du nombre d'aides de la navigation au sol ;
- Meilleure utilisation des aéroports et des pistes ;
- Possibilités d'approches classiques et d'approches de précisions aux aéroports actuellement non équipés ;
- Réduction de la charge de travail des pilotes.

Surveillance :

- Réduction des erreurs dans les comptes rendus de position ;
- Surveillance dans l'espace aérien sans couverture radar ;
- Réduction des coûts ;
- Meilleure réactivité du contrôleur aux changements de profil de vol ;
- Contrôle de conformité ;
- Meilleure assistance en cas d'urgence.

Avantages indirects :

Outre ces avantages directs, on compte aussi de nombreux avantages indirects, notamment :

- Abaissement des tarifs ;
- Gains de temps pour les passagers ;
- Transfert de compétences technologiques ;
- Gains de productivité et restructuration de l'industrie ;
- Augmentation des possibilités d'échanges commerciaux.

CHAPITRE 3

LES SYSTEMES DE SURVEILLANCE RADARS DU TRAFIC AERIEN

3.1 Introduction

Le terme radar est issu de l'acronyme anglais Radio Detection And Ranging. Initialement destiné à des applications militaires, le système radar a connu un essor rapide durant la Seconde Guerre mondiale. Aujourd'hui, les systèmes radars sont aussi très largement répandus dans des applications civiles telles que la surveillance du trafic aérien, la météorologie ou encore la sécurité automobile. Le radar est donc aujourd'hui un système indispensable et très largement utilisé pour surveiller un territoire ou pour éviter des collisions.

Utilisé dans un cadre militaire, les spécifications essentielles du radar sont liées à la détection la plus précise possible des cibles de plus en plus furtives dans des environnements brouillés ce qui nécessite, une maîtrise parfaite de l'ensemble du système que constitue un radar tant au niveau matériel des chaînes d'émission et de réception qu'au niveau logiciel pour le traitement des données [50].

3.2 Principes généraux des radars

De nombreux systèmes radars existent selon le type d'applications civiles ou militaires visées. Cette section donne une brève présentation du principe de fonctionnement d'un radar impulsionnel cohérent qui sera notre système de référence dans le contexte de cette étude.

3.2.1 .Principe du radar :

Définition du radar :

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

couverture pour en extraire des informations comme *la position, la vitesse, la forme*.

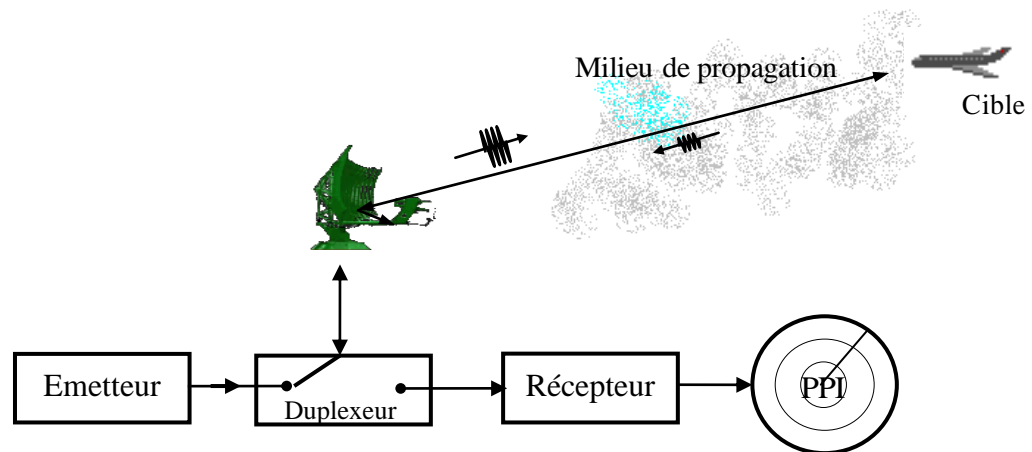
Cible

Au sens large du terme, une cible (target en Anglais) est tout objet qui interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de l'énergie vers le radar.

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

Le principe du radar :

Le schéma ci-dessous illustre le principe de fonctionnement du radar primaire. L'antenne du radar illumine la cible avec des signaux micro-ondes, qui sont alors réfléchis puis interceptés 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.



Chemin émission : émetteur - duplexeur - antenne - onde - cible

Chemin réception : cible - onde - antenne - duplexeur - récepteur – écran

Figure.3.1 : Représente les deux chemins émission-réception du radar

Chaque cible réfléchit le signal en le dispersant dans un grand nombre de directions. Le signal réfléchi est aussi appelé « scattering » (diffusion). « Backscatter » (rétrodiffusion) est le terme désignant la partie du signal réfléchi diffusée dans la direction opposée à celle des ondes incidentes (émises).

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. L'écran type PPI permet de visualiser un vecteur dont l'origine est la position actuelle du radar et la direction l'axe de l'antenne. Ce vecteur fait le tour de l'écran à la vitesse de rotation de l'antenne, et la position de l'axe de l'antenne au moment où un écho est détecté correspond donc à la direction dans laquelle se trouve cet écho.

3.2.2 Classification des radars :

Selon l'information recherchée, les radars possèdent plusieurs technologies. Différentes classifications sont utilisées en fonction de certains critères comme le : type de cible (primaire, secondaire), objectif (surveillance, poursuite,...), position relative de l'émetteur et du récepteur (monostatique, bistatique), type de signal (radar à impulsions, radar à onde continue), la résolution (radars conventionnels, radars haute résolution), etc.

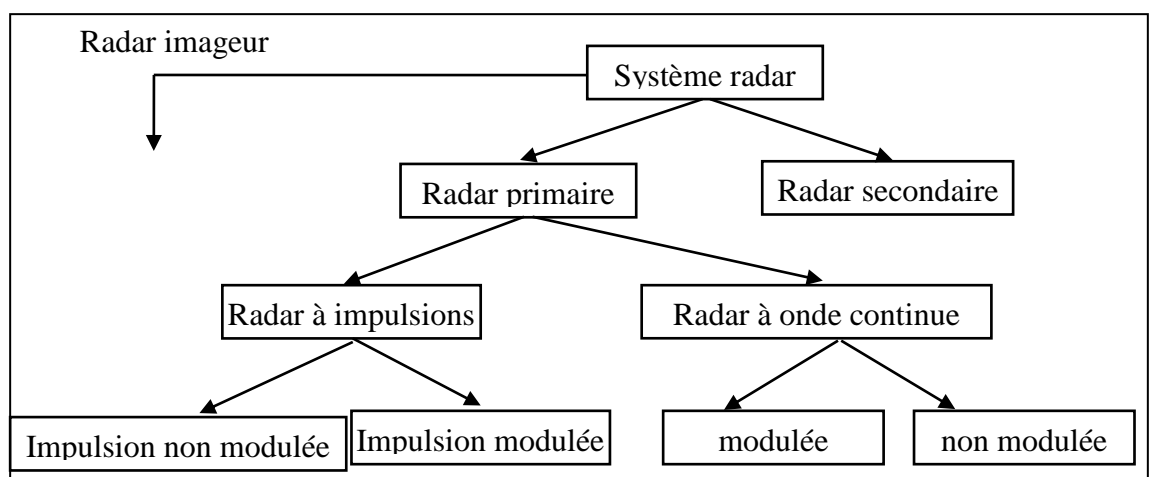


Figure.3. 2 : les classifications du système radar

3.2-2-1 Radar imageur

Un radar imageur forme une image de l'objet ou du secteur observé. Des radars imageurs ont été utilisés pour tracer des cartes la terre, d'autres planètes, astéroïdes.

3.2.2.2 Radar primaire

Un radar primaire [50,51] émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés. Contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchi de son propre signal. Les radars primaires peuvent être de type deux dimensions (2D) donnant des mesures de distance et d'azimut ou trois dimensions (3D), une mesure complémentaire en angle de site (angle d'élévation dans le plan vertical) est alors disponible.

Pour les radars 2D, l'absence de toute mesure d'angle de site ne permet pas de discrimination en altitude. Ainsi, un avion comme un écho au sol ou un obstacle au sol dans le même azimut et à la même distance seront vus sans distinction. Sa fréquence varie entre 2.7 GHz et 3 GHz.

On distingue deux types de radars primaires :

- **A)- Radars à impulsions** : les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance, chaque impulsion est suivie d'un temps de silence plus long que l'impulsion elle-même, temps durant lequel les échos de cette impulsion peuvent être reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. La direction, la distance et parfois, si cela est nécessaire la hauteur ou l'altitude de la cible peuvent être déterminées à partir des mesures de la position de l'antenne et du temps de propagation de l'impulsion émise, la figure (3.3).

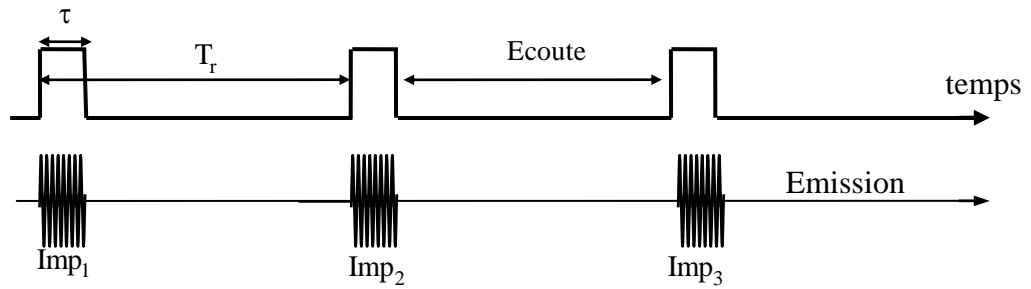


Figure.3. 3 : Représente les caractéristiques des signaux émis

B)- Radars à onde continue : les radars à onde continue génèrent un signal hyperfréquence continue. Le signal réfléchi est reçu et traité, mais le récepteur (qui dispose de sa propre antenne) n'est pas tenu d'être au même emplacement que l'émetteur. Tout émetteur de station radio civile peut être simultanément utilisé comme un émetteur radar, pour peu qu'un récepteur relié à distance puisse comparer les temps de propagation du signal direct et du signal réfléchi. Des essais ont montré que la localisation d'un avion est possible par la comparaison et le traitement des signaux provenant de trois différentes stations émettrices de télévision.

3.2.2.3 Radar secondaire :

Avec ces radars, l'avion doit être équipé d'un transpondeur (transmetteur répondeur) qui répond à l'interrogation du radar en générant un signal codé. Cette réponse peut contenir beaucoup plus d'informations que celles qu'un radar primaire qui peut collecter (par exemple : l'altitude, un code d'identification, ou encore un rapport de problème à bord comme une panne totale des radiocommunications).

A)- Les radars secondaires de surveillance SSR en Route

En radar secondaire, l'absence de toute discrimination en angle de site a des conséquences négatives. Il ne peut exister d'échos de sol en surveillance coopérative, cependant tous les paramètres et réglages adaptés à une zone de détection difficile dans un site particulier seront appliqués de fait, sans limitation

d'altitude, au trafic de survol. L'architecture de la liaison est en deux trajets simples, distincts, le bilan de puissance de chacun est en $1/R^2$.

La séparation en deux liaisons a favorisé le choix de deux fréquences différentes: 1030 Mhz pour la liaison montante et 1090 MHz pour la liaison descendante. La polarisation est verticale. La dernière génération de radars secondaires, dite en « Mode S », engage des transactions plus performantes avec les transpondeurs.

Pour l'aviation civile, le radar secondaire est utilisé pour la détection en route. Il est associé à l'exploitation radar primaire pour le contrôle d'approche et d'aérodrome, la portée est de 200 NM.

B)- Radar secondaire d'atterrissage de précision

Exclusion jusqu'à 20 km dans un angle de 20° de part et d'autre de l'axe de piste. Cet effet est beaucoup plus rare en radar primaire, car le bilan de puissance est très limité et deux réflexions supplémentaires dégraderaient irrémédiablement le signal. La conséquence est la formation de faux échos dans la direction des obstacles.

3.2.3 Comparaison entre radar secondaire et primaire :

Ces deux systèmes ont les avantages et les inconvénients des principes de fonctionnement qu'ils utilisent. Grâce au radar primaire, on obtient des informations fiables sur la direction, la hauteur et la distance de la cible.

Le radar secondaire lui apporte des informations supplémentaires telles l'identification ou encore l'altitude. Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique). En effet, la puissance émise est un paramètre de l'équation du radar qui doit tenir compte du trajet de l'onde aller et retour dans le cas du radar primaire, mais uniquement d'un 'aller simple' dans le cas du radar secondaire.

- **Radar à onde continue non modulée**

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

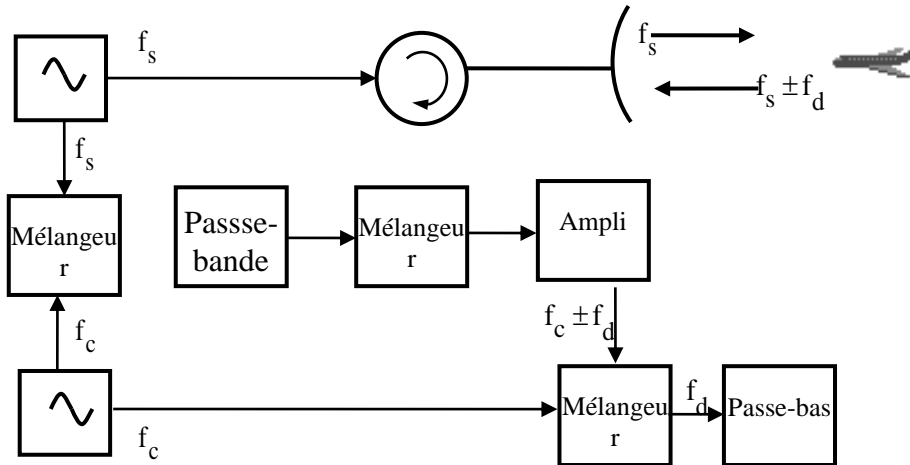


Figure.3. 4 : Radar à onde continue.

- **Radar à onde continue modulée**

Le radar émet de façon continue un signal modulé en fréquence. Ce type de radar permet la mesure du temps de propagation en continu. Il est utilisé pour la mesure en continu des petites distances (altimètres par exemple).

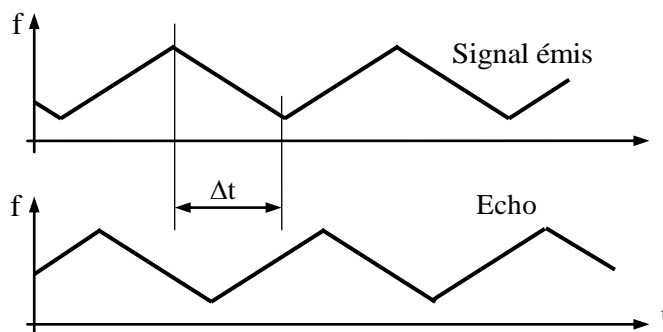


Figure.3. 5 : Modulation FM et mesure de distance.

- **Radar bistatique**

Un radar bistatique comporte des sites d'émission et de réception éloignés (par une distance considérable qui peut être considérable). Ils sont utilisés dans le domaine militaire et en météorologie.

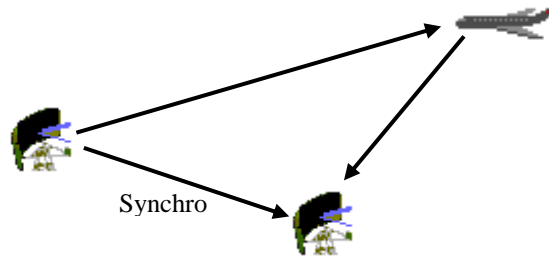


Figure.3. 6 : Représente un système radar bistatique.

3.2.4. Principe de fonctionnement d'un radar à impulsions

▪ A) Mesure de la distance

La distance est calculée à partir du temps de transit (aller et retour) d'une brève impulsion radioélectrique émise et de sa vitesse de propagation c . La distance de l'écho (calculée par le radar) est la distance en ligne droite entre l'antenne du radar et la cible [52,53].

Le temps Δt mesuré par le radar est le temps nécessaire à l'impulsion pour aller de l'antenne à la cible, puis de la cible vers l'antenne après réflexion. Chaque impulsion revenant au radar parcourt deux fois la distance radar-cible. La formule permettant de calculer cette distance est la suivante :

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3.1)[52]$$

Avec $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Remarque : A $\Delta t = 1\mu\text{s}$ correspond une distance de 150m

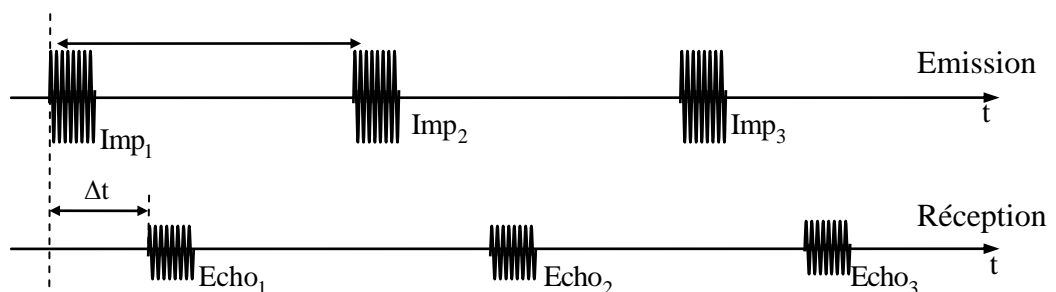


Figure1.7 : Représente les Signaux émis et reçus du radar.

Distances ambiguës

L'horloge du radar est remise à zéro à chaque fois qu'une nouvelle impulsion est émise, afin de s'assurer que la mesure de la distance s'effectue bien à partir de la dernière impulsion. Les échos reçus dans un délai supérieur à la période de répétition des impulsions T_r génèrent des erreurs de calcul de la distance (échos de $n^{\text{ième}}$ balayage) ; on parle alors d'*ambiguïté* en distance.

Les échos revenant au radar au-delà de T_r se traduisent par une ambiguïté distance (erreur de visualisation) alors que ceux qui reviennent dans un délai inférieur à T_r sont affichés à la distance correcte (non ambiguë).

La distance maximum sans ambiguïté pour un radar donné peut être déterminée par la formule :

$$R_u = \frac{c \cdot T_r}{2} = \frac{c}{2f_r} \quad (3.2) [52]$$

$$\text{Exemple : } f_r = 600\text{Hz} \rightarrow R_u = \frac{3 \cdot 10^8}{(2)(600)} = 250\text{Km}$$

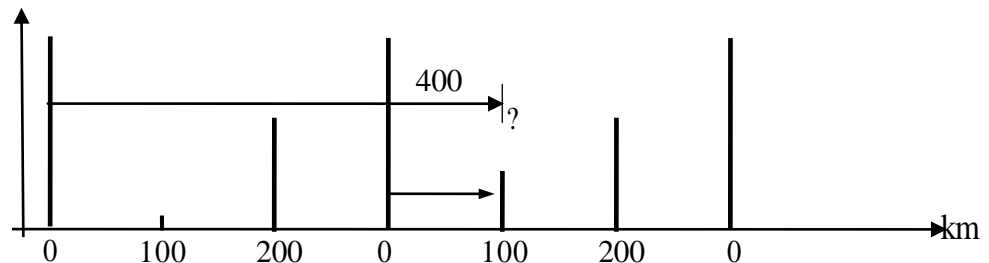


Figure.3. 8 : Représente un écho de second balayage à la distance réelle de 400 km.

En modulant T_r (stagger en Anglais), la visualisation ambiguë apparaît comme un amas de points puisque le temps de réception change entre chaque impulsion émise. Un traitement du signal informatisé permet de calculer la distance correcte.

Distances aveugles

Un radar à impulsions monostatique utilise la même antenne à l'émission et à la réception. Pendant le temps d'émission, le radar ne peut pas recevoir : la réception est coupée. La distance minimum R_{\min} (distance aveugle) est la distance minimum à laquelle doit se trouver une cible pour pouvoir être détectée. Pour cela, il est nécessaire que l'impulsion émise quitte entièrement l'antenne et que le radar remette en fonction son récepteur (TMES = temps de mise en service du récepteur). Ainsi donc, le temps de transmission doit être le plus court possible si l'on veut détecter des objets très proches.

$$R_{\min} = \frac{c(\tau + \text{TMES})}{2} \quad (\text{m}) \quad (3.3) \quad [52]$$

B) Mesure de la direction

L'angle entre la direction du nord et celle de la cible (azimut) est déterminé grâce à la directivité de l'antenne. La directivité est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction particulière. En mesurant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer non seulement l'azimut, mais aussi le site de la cible (donc son altitude). La précision de la mesure de ces angles dépend de la directivité de l'antenne. Pour une fréquence émise donnée (ou une longueur d'onde définie), la directivité d'une antenne est fonction de ses dimensions propres.

La transmission rapide et précise de l'information de direction de la cible (azimut) entre la plaque tournante supportant l'antenne et le scope radar peut être assurée par: des servosystèmes (anciens équipements) un comptage d'impulsions d'horloge azimut.

Les nouveaux radars balayent leur secteur de recherche sans mouvements mécaniques, ou avec des mouvements minimums. Ces radars mettent en œuvre un balayage électronique en azimut et/ou en élévation (antenne réseau à commande de phase).

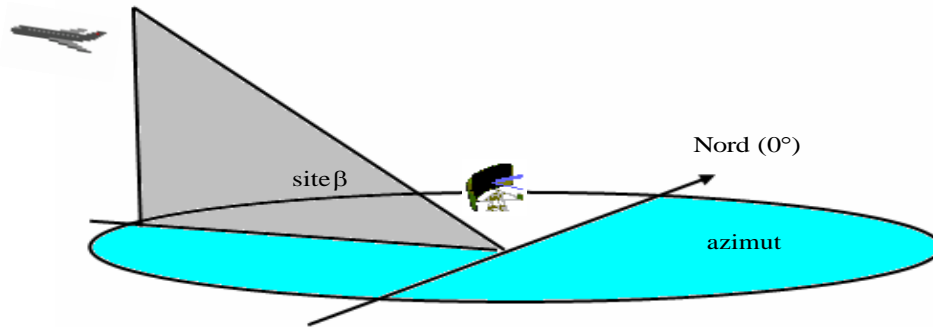


Figure.3. 9 : Représente l'azimut et l'angle de site β de la cible

La hauteur H d'une cible par rapport à la surface du globe terrestre est appelée altitude. L'altitude peut être calculée à partir des mesures de distance R et de l'angle de site β , en tenant compte de :

- La réfraction des ondes qui se produit à chaque fois qu'elles atteignent une couche de l'atmosphère de différente densité ;
- La courbure de la surface de la Terre.

Ces deux facteurs sont compensés dans les systèmes radars qui calculent l'altitude grâce à l'utilisation de formules plus ou moins complexes :

$$R(\beta) = R_T \left\{ -\sin(\beta) + \sqrt{\sin^2(\beta) + 2\frac{H}{R_T}} \right\} \quad (3.4) [53]$$

Avec :

$$R_T = \frac{4}{3} 6370 \text{ km} \cong 8500 \text{ km} \quad R_T = \frac{4}{3} 6370 \text{ Km} \cong 8500 \text{ Km}$$

Équation obtenue en écrivant :

$$(R_T + H)^2 = R^2 + R_T^2 - 2RR_T \cos\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.5) [53]$$

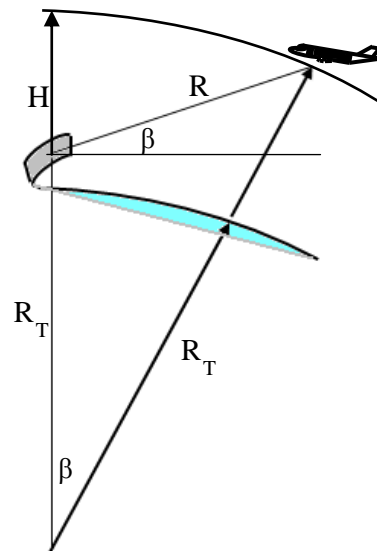


Figure.3.10 : Représente le calcul de la distance R et d'angle de site β

▪ C)- Mesure de la vitesse radiale

Les radars utilisent la fréquence Doppler pour extraire l'information sur la vitesse radiale des cibles. Le phénomène Doppler décrit la variation (positive ou négative) de la fréquence réfléchiée provoquée par le mouvement de la cible par rapport à la fréquence émise.

L'écart de fréquence entre la fréquence émise et la fréquence réfléchiée est appelé fréquence Doppler f_d . Il est relié à la vitesse radiale v_r par la relation suivante: [54]

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (3.6) [54]$$

Résolution en distance

La résolution en distance ΔR est la capacité d'un système radar à distinguer deux ou plusieurs cibles situées dans la même direction, mais à des distances différentes. La qualité de la résolution dépend de la largeur de bande Δf de l'impulsion émise[54]

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f} \quad (3.7) [54]$$

Avec

$$\Delta f = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df}{|S(f)|_{\max}^2} \quad \text{et } S(f) \text{ spectre du signal } s(t) \text{ (impulsion modulée)}$$

Dans le cas d'une impulsion non modulée :

$$\Delta f = \frac{1}{\tau}, \text{ d'où } \Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (3.8) [54]$$

Exemple

$$\tau = 3\mu\text{s} \rightarrow \Delta R = (3)(150) = 450 \text{ m}$$

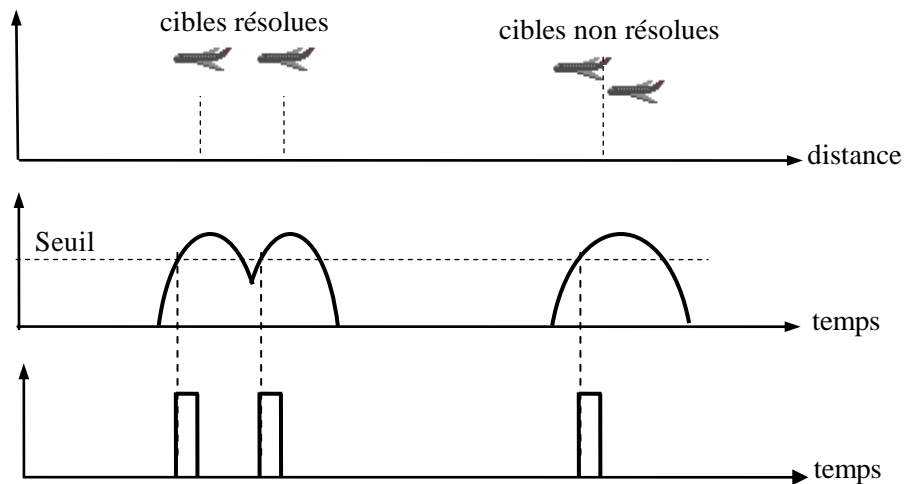


Figure.3.11 : Représente la résolution en distance

Résolution angulaire

La résolution angulaire est l'écart angulaire minimum qui permet au radar de distinguer deux cibles identiques se présentant à la même distance. La résolution angulaire d'un radar est déterminée par la largeur de son lobe d'antenne, elle-même définie d'après son angle à -3 dB (largeur du lobe à mi-puissance). Les points du diagramme de rayonnement de l'antenne qui reçoivent la moitié de la puissance émise (c'est-à-dire la largeur du lobe à -3 dB) sont considérés comme les limites du lobe lorsque l'on calcul la résolution angulaire : deux cibles identiques, à la même distance sont de fait vu par un radar à des

azimuts différents lorsqu'elles sont espacées angulairement d'une valeur supérieure à la largeur du lobe à -3 dB. [54].

La résolution angulaire rapportée à une distance R entre deux cibles peut être calculée par la formule suivante :

$$\Delta_{az} = 2R \sin\left(\frac{\theta_{-3dB}}{2}\right) \text{ (m)} \quad (3.9) [54]$$

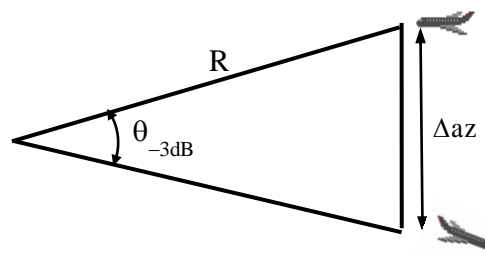


Figure.3.12 : Représente la résolution angulaire [54]

Cellule de résolution

Les résolutions en distance et en angulaire conduisent à la notion de *cellule de résolution* : il est impossible de distinguer deux cibles l'une de l'autre se trouvant à l'intérieur d'une même cellule de résolution.

On considère généralement que le volume de la cellule est fixé par les angles d'ouverture en azimut et en site du lobe d'antenne et par la résolution en distance ΔR .

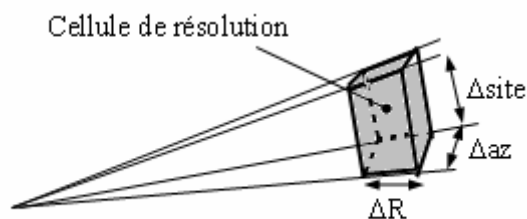


Figure.3.13 : Représente la cellule de résolution [54]

Résolution en vitesse

C'est la vitesse minimale séparant deux cibles de même amplitude situées à la même distance pouvant être séparées. Cette résolution est liée à la durée T_m de la mesure.

Résolution en fréquence

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_m} \quad (3.10) [54]$$

Résolution en vitesse

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2T_m} \quad (3.11) [54]$$

3.3 Équation de radar

3.3.1 Introduction

L'équation du radar traduit l'influence de phénomènes physiques sur : la puissance rayonnée, la propagation de l'onde jusqu'à la réception du signal réfléchi (écho). L'équation du radar permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar [55].

Nous supposons que les ondes électromagnétiques se propagent dans des conditions idéales, sans subir une quelconque perturbation.

3.3.2 Établissement de l'équation du radar en espace libre

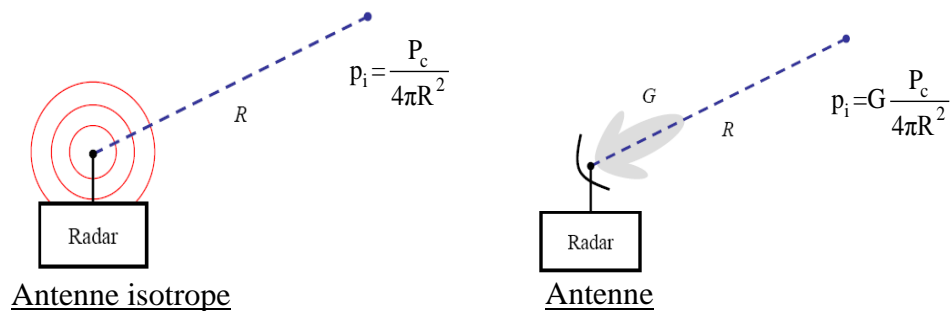
On considère un radar monostatique doté d'une antenne directive utilisée en émission et en réception de gain max G et de surface équivalente. A_e

Lorsque l'énergie haute fréquence est rayonnée à partir d'une antenne isotrope, elle se propage de façon uniforme dans toutes les directions. Les zones d'égale densité de puissance forment donc des surfaces sphériques concentriques autour de l'antenne. Lorsque le rayon de la sphère augmente, une même quantité

d'énergie est diffusée sur une plus surface sphérique. Cela revient à dire que la densité de puissance, dans une direction donnée, diminue lorsque la distance de l'émetteur augmente [56].

La formule suivante permet de calculer la densité de puissance rayonnée par l'antenne à la distance R du radar pour une puissance crête P_c émise :

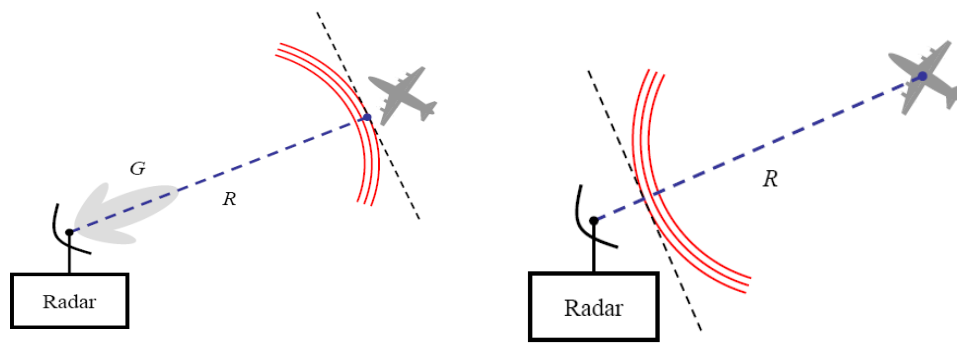
$$p_i = G \frac{P_c}{4\pi R^2} \text{ (W / m}^2\text{)} \quad (3.12) \text{ [56].}$$



La détection d'une cible ne dépend pas uniquement de la densité de puissance à sa position. Elle dépend également de la partie de l'énergie réfléchiée par la cible qui est renvoyée vers l'antenne du radar. Afin de déterminer la valeur de cette puissance réfléchiée utile, il est nécessaire de définir une surface équivalente radar de la cible SER (RCS en Anglais) notée σ .

Cette valeur difficile à appréhender dépend de plusieurs paramètres. Dans un premier temps, il est relativement logique de considérer que plus la surface éclairée par le signal est grande, plus la puissance réfléchiée est importante. Au-delà des considérations de taille, la capacité d'un objet à réfléchir les ondes dépend de sa forme, de la composition de sa surface et de la nature des matériaux utilisés. La puissance totale reçue par la cible est :

$$P_{cib} = p_i \cdot \sigma = \frac{P_c}{4\pi R^2} G \sigma \text{ (W)} \quad (3.13) \text{ [56].}$$



La cible se comporte comme un émetteur qui réémet omnidirectionnellement la puissance. P_{cid} [57].

La densité de puissance atteignant le radar s'écrit donc :

$$P_r = \frac{P_{cib}}{4\pi R^2} = \frac{\sigma G P_c}{4\pi R^2} (W / m^2) \quad (3.14) [57].$$

La puissance totale captée par le radar qui dépend de la surface équivalente A_e du radar est :

$$P_r = p_r \cdot A_e = \left(\frac{\sigma G P_c}{(4\pi R^2)^2} \right) \left(\frac{G \lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} (W) \quad (3.15) [57].$$

D'où la distance :

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_r}} (W) \quad (3.16) [57].$$

Soit $P_{r \min}$ la puissance minimum du signal autorisant sa détection par le radar. Tout signal de puissance inférieur ne peut être exploité puisqu'il est noyé dans le bruit du récepteur. Ce signal de puissance minimum $S_{\min} = P_{r \min}$ est donc celui qui permet au radar d'atteindre sa portée maximum de détection R_{\max} on a : [58].

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}}} (W) \quad (3.17) [58].$$

3.3.3 Influence des pertes sur la portée

Lors de l'élaboration de l'équation du radar, on a considéré des conditions de propagations idéales, libres de toute perturbation. Cependant, dans la pratique la propagation est affectée par de nombreuses pertes qui peuvent considérablement réduire l'efficacité du radar.

On introduit une pondération par un facteur de pertes L_s ($L > 1$) dans l'équation de la portée pour tenir compte de ces pertes :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi) L_s^3 S_{\min}}} (W) \quad (3.18) [58].$$

Ce facteur regroupe les pertes suivantes:

- Atténuations internes dans les circuits de l'émetteur et du récepteur. Typiquement, elles sont de l'ordre de 1 à 2 dB ;
- Pertes dues aux fluctuations de la surface équivalente :
- Pertes dues au faisceau :

Dans l'équation du radar, on suppose que le gain de l'antenne est constant. Or, ce gain varie pendant le balayage dont il faut tenir compte. Une bonne approximation du gain de l'antenne est donnée par la forme gaussienne:

$$G(\theta) = e^{-\frac{2,77\theta^2}{\theta_{3dB}^2}} \quad (3.19) [58].$$

Cette perte est de l'ordre de 1,5 dB.

3.3.4 Discussion de l'équation du radar

L'équation donnant la portée d'un radar à impulsions dans le cas du traitement d'une réponse est la suivante :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{(P_c \tau) \cdot G^2 \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 1,2 \cdot kFT_0 \cdot L_S (S/N)_1}} \quad (3.20)[58]$$

Cette équation entraîne plusieurs remarques :

- La portée du radar est proportionnelle à l'énergie du signal émis
 $E = P_c \tau$;
- Elle est proportionnelle à la surface équivalente σ de la cible.

La portée dépend de la longueur d'onde de différentes manières :

- $R_{\max} = K \sqrt{A_e / \lambda} \Rightarrow$ à surface d'antenne constante, la portée varie comme $1/\sqrt{\lambda}$;
- $R_{\max} = K \sqrt{G \lambda} \Rightarrow$ à gain constant, la portée croît comme $\sqrt{\lambda}$.

D'autres paramètres comme les pertes atmosphériques, les puissances réalisables, la surface équivalente des cibles dépendent aussi de la longueur d'onde.

3.4 Applications des radars

3.4.1 Radar de surveillance

Les radars couramment employés pour la surveillance aérienne et maritime comportent une antenne tournante. Le signal reçu est affiché souvent en coordonnées polaires sur un écran d'oscilloscope. On y voit directement, comme sur une carte de géographie, les obstacles et les aéronefs. Des écrans à rémanence permettent de distinguer les objets en mouvement des échos fixes.



Figure 3.15 : Écran radar (photo prise à la station radar d'El-Oued)

Les radars de surveillance [59] sont universellement utilisés dans l'aviation, la navigation et la surveillance de territoires. Il faut citer notamment une série de radars de grande puissance et donc de grande portée. Les systèmes les plus perfectionnés disposent d'antennes à réseau [60], formées d'éléments rayonnants fixes. Le faisceau est pointé par contrôle électronique au moyen de déphaseurs. Un balayage plus rapide que par des moyens mécaniques est ainsi obtenu, assurant une détection en un temps de l'ordre de la milliseconde.

3.4.2 Altimètre

Les altimètres classiques sont en fait des baromètres. Connaissant la pression locale et la pression au niveau de la mer, on peut déterminer l'altitude où l'on se trouve. A bord d'un avion, cette information n'est pas toujours suffisante, car des avions se sont écrasés contre des montagnes, alors qu'ils volaient à la bonne altitude, mais au-dessus de la mauvaise topographie, à cause des effets de dérive. L'altimètre à radar [61] détermine directement l'altitude par rapport au sol: il complète l'information donnée par l'instrument classique. Les modules lunaires de la mission Apollo ont dû utiliser des altimètres à radar pour se poser en douceur sur la Lune.

3.4.3 Mesure de niveau

L'emploi de radars est particulièrement intéressant dans des environnements hostiles, poussiéreux, où ni les méthodes mécaniques (contact) ni les méthodes optiques (laser) ne sont satisfaisantes. Des appareils utilisant le principe du radar permettent d'obtenir une précision de l'ordre du centimètre; ils sont utilisés entre autres pour mesurer le niveau de métal en fusion dans des hauts fourneaux, celui de liquides corrosifs, de minerais dans des mines.

3.5 Perturbations à l'exploitation radar primaire

3.5.1 Masque

C'est l'effet classique de perte de détection derrière l'obstacle dû au masque physique à la propagation des OEM. Cet effet est en réalité plus complexe à cause du phénomène de diffraction qui induit une courbure des trajets de propagation sur les bords et autorise une certaine visibilité (dégradée) derrière l'obstacle même.

Les conséquences sont celui d'un affaiblissement des signaux en limite du volume masqué, allant jusqu'à la perte complète au centre de ce volume, derrière l'obstacle même. La configuration de l'obstacle (au sol, d'extension en angle de site limitée) confine les difficultés aux altitudes faibles, sauf configurations particulières dues au relief, cette situation peut se rencontrer pour tout type d'obstacle, l'originalité est ici la hauteur et la finesse des structures étudiées qui favorisent l'effet de diffraction.

La configuration d'obstacles multiples, si elle est compacte, étend le masque à la dimension maximale du groupement vu du radar (extension azimutale) [62].

3.5.2 Fausses alarmes (faux échos)

Plusieurs situations peuvent être à l'origine de la création de faux échos. Il peut s'agir de la réflexion du signal radar incident sur les surfaces de l'obstacle (fixes ou mobiles).

Il peut s'agir, beaucoup plus rarement, de la réflexion d'un signal à destination ou en provenance d'une cible utile. C'est un «trajet multiple» sur lequel les mesures de distance et d'azimut seront fausses.

La génération de faux échos par réflexion sur les parties fixes de la structure est une situation classique d'échos fixes, mais ici à très fortes surfaces équivalentes (SER surfaces équivalentes radar de 100 à 1000 m²). Ces échos sont normalement éliminés par mesure de fréquence Doppler nulle.

La difficulté est ici d'un risque de saturation du récepteur qui s'observerait particulièrement en zone proche et/ou avec des gains d'antenne élevés

3.6 Étude de radar de surveillance

Un radar de surveillance (primaire, de veille ou panoramique) est constitué :

- D'un émetteur, chargé de générer les impulsions de fortes puissances envoyées à l'antenne ;
- D'un circulateur, permettant d'orienter les impulsions d'émission vers l'antenne et de diriger les échos reçus vers le récepteur ;
- D'un récepteur, chargé d'amplifier les échos HF reçus puis de les démoduler ;
- D'un extracteur, chargé de faire le tri entre échos utiles et échos parasites ;
- D'un système de traitement de données, chargé de déterminer les fausses informations, de calculer les coordonnées du plot radar et d'assurer la poursuite locale (figure 3.16).

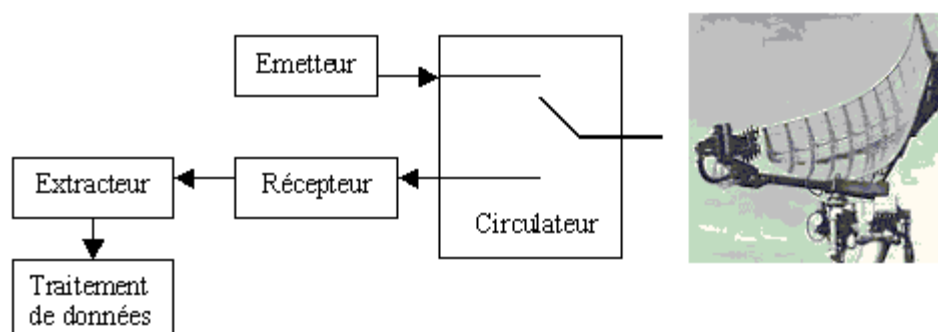


Figure.3.16 : Représente la composition d'un radar de surveillance

L'antenne est un réflecteur parabolique tronqué dont la courbure permet de focaliser le rayonnement électromagnétique. L'ouverture dans le plan horizontal de l'ordre de 2° .[63].

Le fait que la partie inférieure de la parabole soit tronquée dans son développement vertical a l'effet inverse. Elle ouvre le faisceau dans le plan vertical jusqu'à environ 45° , lui permettant ainsi d'éclairer une large tranche de ciel avec l'existence d'un cône mort. (Voir figure 3.17). Une motorisation et un joint tournant assurent la rotation de l'antenne à la vitesse angulaire d'une dizaine de tours/mn.

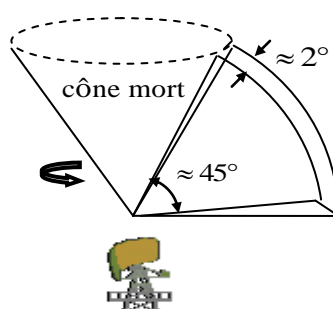


Figure.3.17 :Représente le cône mort

3.6-1 Antenne à diagramme en cosécante carrée

Les radars de surveillance utilisent des antennes en cosécante carrée qui ont la particularité de conserver une puissance constante à l'entrée du récepteur lorsque la cible se déplace à une altitude constante à l'intérieur du faisceau. En pratique, l'antenne peut être réalisée par une déformation d'un réflecteur parabolique

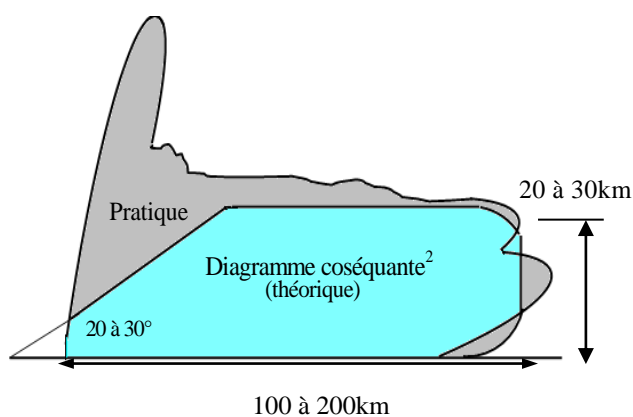


Figure.3.18 : le diagramme d'antenne en cosécante carrée

3.6-2 Choix de la fréquence

Parce qu'elle est moins sensible aux atténuations atmosphériques, la bande L s'impose pour la détection longue portée jusqu'à 200Nm. La bande S est, elle, réservée aux radars d'approche.

La taille des équipements chargés de convertir l'énergie électrique en rayonnement radar (antenne, joint tournant, guide d'onde) est d'autant plus réduite que la longueur d'onde est courte.

Ainsi, un radar bande L devra être équipé d'un réflecteur (capteur) de 45m² alors que son équivalent bande S utilisera un réflecteur de 15m². Ce facteur 1/3 se retrouve évidemment sur la masse des antennes motorisées : 6,5 tonnes en bande L contre 2,5 tonnes en bande S.

D'autre part, les réflexions parasites du faisceau sur le sol modifient le diagramme de rayonnement des antennes. Pour minimiser cet effet de sol, la tour supportant l'antenne doit avoir une hauteur $H \geq 100\lambda$, soit 23 m en bande L contre 10m seulement en bande S.

3.6.3 Tracé de la couverture du radar

La couverture radar en site d'un radar de surveillance est la surface limitée par la ligne de puissance minimale détectable dans des conditions de Pfa, Pd et de cible (σ) données.

$$\begin{cases} R_{\max} = K\sqrt{G(\beta_0)} \\ R(\beta) = K\sqrt{G(\beta)} \end{cases} \longrightarrow R(\beta) = R_{\max} \sqrt{\frac{G(\beta)}{G(\beta_0)}} \quad (3.21)[58]$$

$G(\beta)$ est le diagramme gain de l'antenne en fonction du site β , donné par le constructeur.

R_{\max} est la portée max dans la direction du gain max G calculée à l'aide de l'équation du radar en fonction des probabilités Pfa et Pd et de la surface effective de la cible σ .

$R(\beta)$ est la distance maximale détectable par le radar dans la direction du site β dans les mêmes conditions de Pfa et Pd et σ .

La couverture $R(\beta)$ est tracée sur une grille spéciale radar (distance, site et altitude) qui tient compte de la courbure des rayons lumineux.

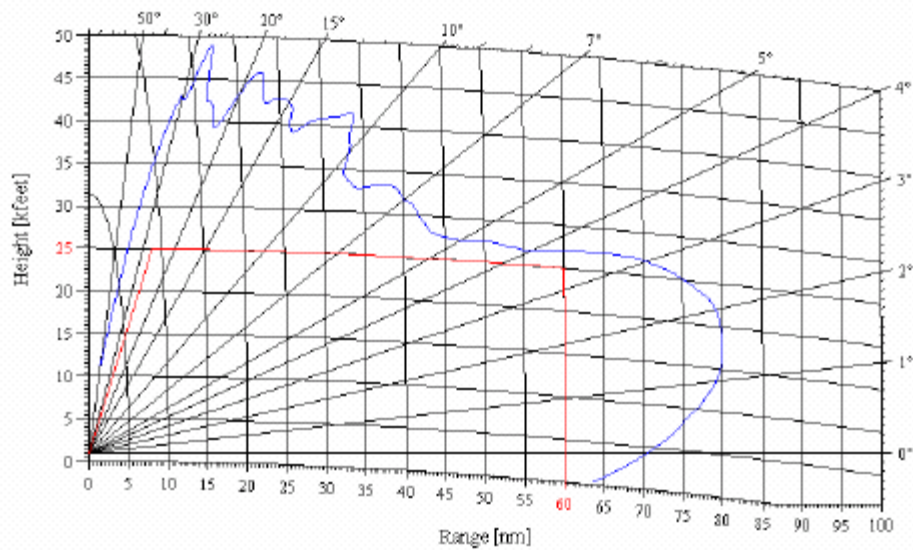


Figure.3.19 : Représente la couverture en site en espace libre.

En raison des interférences des ondes directes et des ondes réfléchies par le sol, il y a une déformation du diagramme qui présente des minimums et des maximums dont le nombre dépend de la hauteur de l'antenne par rapport au sol.

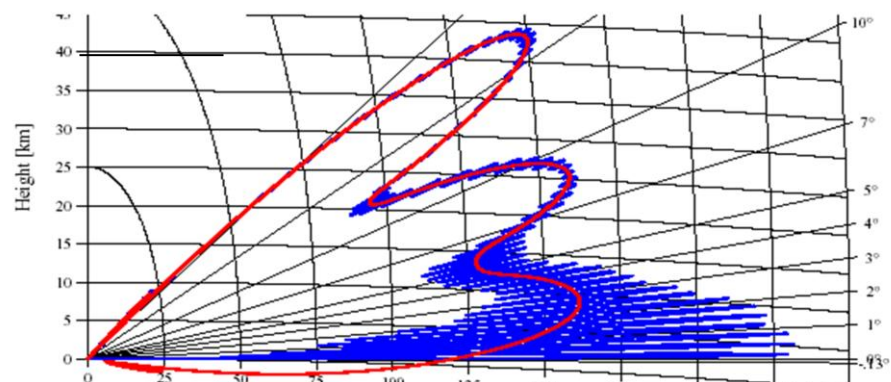


Figure.3.20 Représente la Couverture en présence du sol

3.7 Composition d'une station radar

En dehors du matériel électronique composant le radar, il y a toute la partie génie civil qui compte beaucoup dans l'ensemble de la station [64].

- **La tour radar**

Afin de diminuer les problèmes dus à la proximité du sol (réflexion des ondes), le choix d'une tour de 30 m a été retenu pour les stations radars algériennes. Ce paramètre n'est cependant pas figé et pourra être modifié en fonction des sites d'installation.

- **Localisation des équipements**

Il a été décidé, afin de diminuer les pertes énergétiques, d'installer les équipements radar dans un local technique situé immédiatement sous l'antenne qui est actionnée par un moteur électrique puissant.



Figure 3.21 : Moteur tournant l'antenne (photo prise à la station radar d'El-Oued).

- **Le radôme**

La fonction du radôme est de protéger l'antenne d'une station implantée dans un site aux conditions climatiques difficiles. Sa structure devra résister à des vents allant jusqu'à 240 Km/h.

3.8 RADAR MODE "S"

3.8.1 Généralités

Nous venons de voir que, grâce au radar mono impulsion, des améliorations très importantes nous permettent d'une part, de traiter certains cas de chevauchement et d'autre part, de réduire la fréquence de répétition et d'augmenter la précision en azimut.

Seulement, dans les zones à trafic dense, il existe encore de nombreux problèmes dus aux cas de chevauchement non résolus ainsi qu'à la limitation due au nombre de codes qu'il est possible d'allouer (4096 codes ne sont pas suffisants dans certains cas).

Une autre technique visant l'amélioration du radar secondaire est aujourd'hui en cours de normalisation à l'OACI, il s'agit du radar mode "S" [65] (SELECTIF). Le mode S a été conçu pour être entièrement compatible avec le radar secondaire actuel et de plus, il utilise la technique de mesure de l'azimut par mono impulsion.

Le mode S permet de résoudre complètement les problèmes de chevauchement et de répondre aux besoins opérationnels nouveaux par sa capacité à fournir une liaison de données entre l'avion et le sol (généralement appelée data-link).

Avec le mode S, chaque avion équipé d'un transpondeur spécial "mode S", peut être interrogé séparément des autres avions qui sont également dans le faisceau de l'antenne. Ceci est réalisé en affectant à chaque avion une adresse unique. Cette adresse est composée de 24 bits ; ainsi 16 millions d'adresses sont disponibles dans le monde.

Chaque interrogation mode S contient l'adresse de l'aéronef auquel, elle est destinée. Recevant une telle interrogation, un transpondeur mode S compare l'adresse reçue à sa propre adresse et répond à l'interrogation si les deux adresses correspondent ; sinon, il ignore l'interrogation.

1. Avantages attendus

- La mise en œuvre de ce principe élimine tout Garbling ;
- Il est possible d'envisager un allongement des transactions entre le radar et le transpondeur; ceci permettra d'introduire de véritables fonctions de "liaisons de données".
- L'identification sera directe et sans ambiguïté avec la possibilité d'affichage direct d'informations sur l'écran du contrôleur : indicatif avion ou numéro de vol.
- De plus, les informations classiques (altitude et distance) pourront se faire sur un seul échange ce qui entraîne une forte réduction de l'encombrement électromagnétique.

2. Contraintes liées au mode S

- Il faut d'abord prévoir une phase d'acquisition entre le radar et le transpondeur.
- Il faut assurer la compatibilité radar secondaire mode S de façon à faciliter l'évolution en ménageant les problèmes techniques et économiques des états (installation progressive des stations radars mode S) et des compagnies (installation des transpondeurs mode S).

3.8.2 Structure des signaux

La figure ci-dessous présente la structure générale d'un signal d'interrogation pour le radar mode s.

Intermode "appel général" :

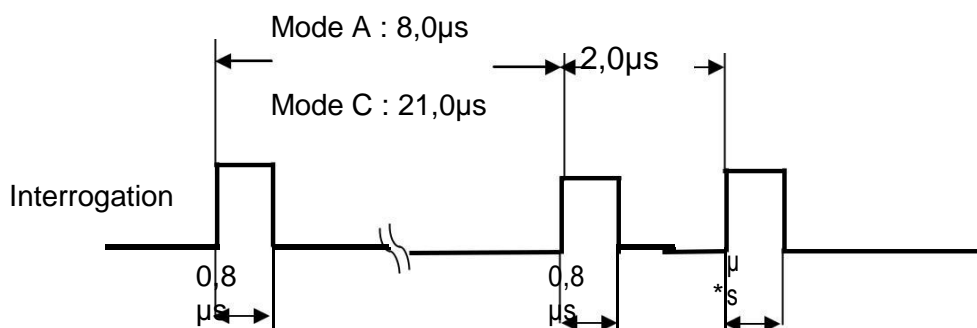


Figure 3.22 : Interrogation mode S

- Appel général modes A/C/S : 1.6 μ s
- Appel général modes A/C seulement : 0,8 μ s

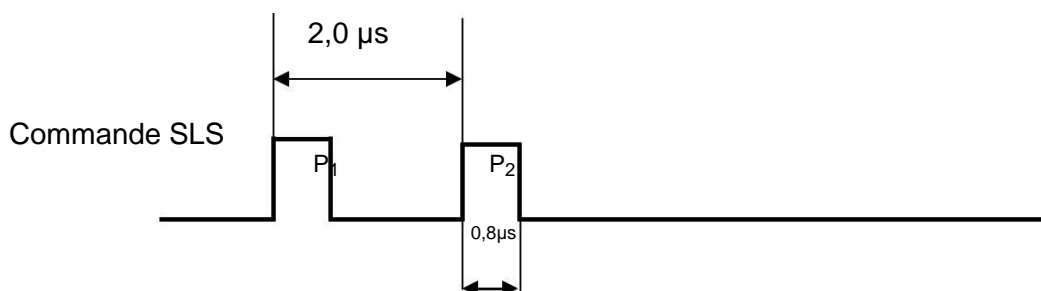


Figure 3.23: Commande SLS.

3.9 Le transpondeur

3.9.1 Définition

Le transpondeur [66] est un système de bord qui permet aux organismes de contrôle de la circulation aérienne équipés d'un radar secondaire SSR, parfois associé à un radar primaire classique, de contrôler l'évolution et la vitesse des aéronefs.

3.9.2 Mode de fonctionnement :

La réponse décodée apparaît sur l'écran radar au sol sous la forme d'un écho comprenant les 4 chiffres affichés par le pilote à la demande du contrôleur (4 séries de 8 chiffres allant de 0 à 7 soit 4096 codes possibles).

Dans le mode C (avec alticodeur), une information d'altitude-pression apparaît également.

Par exemple : Le chiffre 200 représente le niveau de vol de l'avion ou FL pour Flight Level (également appelé altitude-pression correspondant à un altimètre calé à 1013.25 hPa en centaine de pieds (ft) soit ici 20000 ft). Le symbole suivant indique l'évolution de l'avion (flèche vers le haut: en montée, trait horizontal: stable, flèche vers le bas : en descente). Le dernier chiffre indique la vitesse sol de l'avion en dizaine de noeuds (kt) soit ici 220 kt. La position de l'avion est représentée par le cercle le plus large, si une couverture radar primaire existe, une croix est apparue dans ce cercle.



Figure 3.24 : Le transpondeur (www.radartutorial.eu)

3.9.3 Rôle du transpondeur

Le contrôleur peut, par superposition de cartes sur son scope, donner au pilote toutes les informations de position par rapport à une balise ou un terrain, par exemple. Il faut également savoir que les avions de ligne sont équipés de système TCAS (Traffic alert Collision Avoidance System) : les transpondeurs s'interrogent entre eux et donnent des alertes ou des résolutions au pilote équipé de ce système pour éviter un trafic inconnu, à condition que ce dernier ait branché son transpondeur en mode C.

Parmi les autres missions du transpondeur, on peut distinguer aussi :

- Reçoit une interrogation émise par le radar au sol ;
- Décode l'interrogation ;
- Répond avec les informations demandées.

Évolution du transpondeur

- 1^{er} type de transpondeurs sont ATCRBS

Transpondeurs mode S, car S - sélective, car le système s'adresse à un certain transpondeur.

Fonctionnement du transpondeur ATCRBS

Il permet :

- Communication entre la station et le transpondeur se fait par modulation d'amplitude Réponse du transpondeur
- Débute 3 μ s après réception de l'impulsion P3 par F1.

- Le transpondeur répond en codant ses informations par modulation d'amplitude.

Séquence de réponse d'un transpondeur ATCRBS

- La réponse débute avec F1, toutes les 1.45 μ s, code binaire constituant la réponse qui est émise.
- 13 pulses plus tard, la réponse est complète, la séquence de réponse se conclut par un pulse de fin de transmission F2 qui permet à la station au sol de valider la réponse.
- On aurait 13 pulses pour transmettre l'identité de l'avion ou l'altitude, mais 12 pulses sont utilisées pour coder l'information en binaire.

Identification

- 12 bits (pulses) de données binaires vont transmettre 4096 valeurs possibles, ceci est insuffisant pour que chaque avion ait un code unique.
- Les codes sont recyclés, à chaque nouveau vol, l'avion reçoit un nouveau code d'identité appelé « squawk » assigné par le contrôle du trafic aérien.

3.9.4 Conclusion

Il est possible d'affirmer que le radar mono-impulsion améliore considérablement la détection des avions, mais il ne résout quand même pas tous les cas d'enchevêtrement des réponses.

Actuellement en Algérie, suite au choix du radar mono-impulsion pour assurer la couverture du territoire, les stations radars primaires sont utilisées pour les zones terminales des grands aéroports (Alger).

De plus, la précision des mesures mono-impulsion permet d'envisager la réduction des minimas de séparation radar entre deux avions ; ils sont de 10 NM et passeront à 5 NM lorsque la couverture radar mono-impulsion sera terminée.

CHAPITRE 4

SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de simulation de la couverture radar de l'espace Algérien en tenant compte :

- Des cinq stations déjà existantes ;
- Deux autres stations que nous proposons (Akfadou et Chréa).

Les moyens de simulations utilisés pour la visualisation de l'effet topographique sur la couverture radar idéale sont (la radio mobile et une application développée sous DELPHI).

4.2.L'étude des couvertures radar

Le travail présenté traite la couverture radar pour les besoins de la surveillance du trafic aérien en Algérie pour avoir une meilleure intégration du concept CNS/ATM. Pour une couverture totale de l'espace aérien Nord Algérien, nous proposons une étude de simulation d'implantation de nouvelles stations radars sur les sites de CHREA (36° 25' 32"N-002° 52' 36" E) et AKFADOU (36° 04' 36" N-004° 37' 15"E).

4.3. Les spécifications techniques et les données réelles

Le système automatique algérien de contrôle du trafic aérien (SAACTA) [67] est composé de cinq (05) stations radars, un système de traitement de données radar (RTP & MTP) et un système de traitement de données pour plan de vol (FDP) voir (tableau 4.1et figure 4.1.).

Tableau 4. 1 : Stations radars actuelles et leur site d'implantation.

Type	Station radar	Site	Les coordonnées (La latitude et longitude)	Date d'installation
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	(36°40' 34.10"N 003° 10' 40.04" E)	Février 2001
SSR	Seraïdi	Annaba	(36° 54' 43.40"N 007° 41' 07.10" E)	Décembre 2001
SSR	Murdjadjo	Oran	(35° 41' 46.88"N 000° 46' 16.20" W)	Janvier 2001
SSR	Guemmar	El Oued	(33° 31' 03.99" N 006° 45' 52.16" E)	Avril 2002
SSR	Bouderga	El Bayadh	(33° 37' 37.36"N 001° 03' 51.20" E)	Mai 2003

Pour assurer un meilleur service de la circulation aérienne. Le système de contrôle du trafic aérien (ATC) peut utiliser indépendamment le radar primaire de surveillance et/ou le radar secondaire de surveillance.

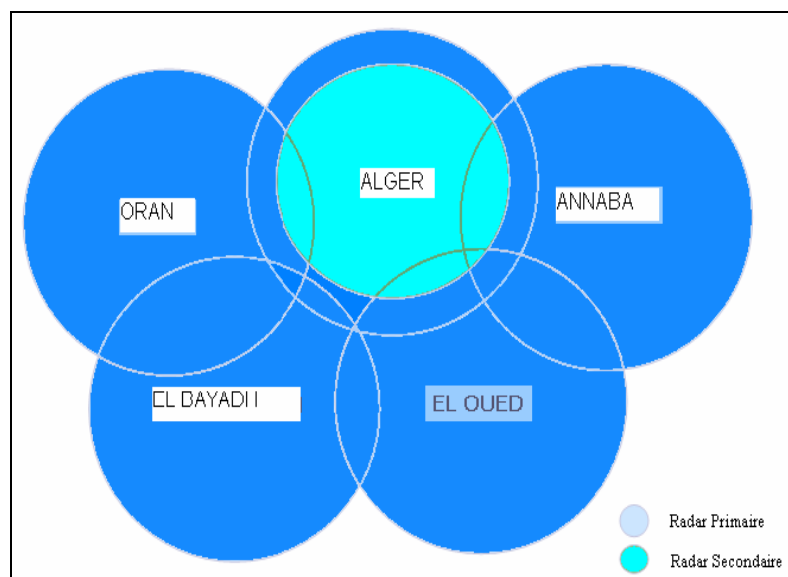


Figure 4.1 : Couverture des cinq sites radar

Chacune de ces stations incluent un radar de surveillance secondaire mono pulsation (MSSR), tandis que le radar du secteur central (station radar d'Alger) inclut en plus un radar d'approche primaire (PSR).

D'autre part, chaque station radar inclut un serveur pour l'entretien (ordinateur de maintenance) du radar (RMM), un processeur de la tête radar (RHP) pour la visualisation des données radar (plots radar) et la transition de ces derniers au CCR et un système de contrôle local et de visualisation (CMS). Les données radar de chaque station sont envoyées à la fois, au centre de contrôle régional (CCR) et à l'approche de l'aéroport de la région, figure (4.2).

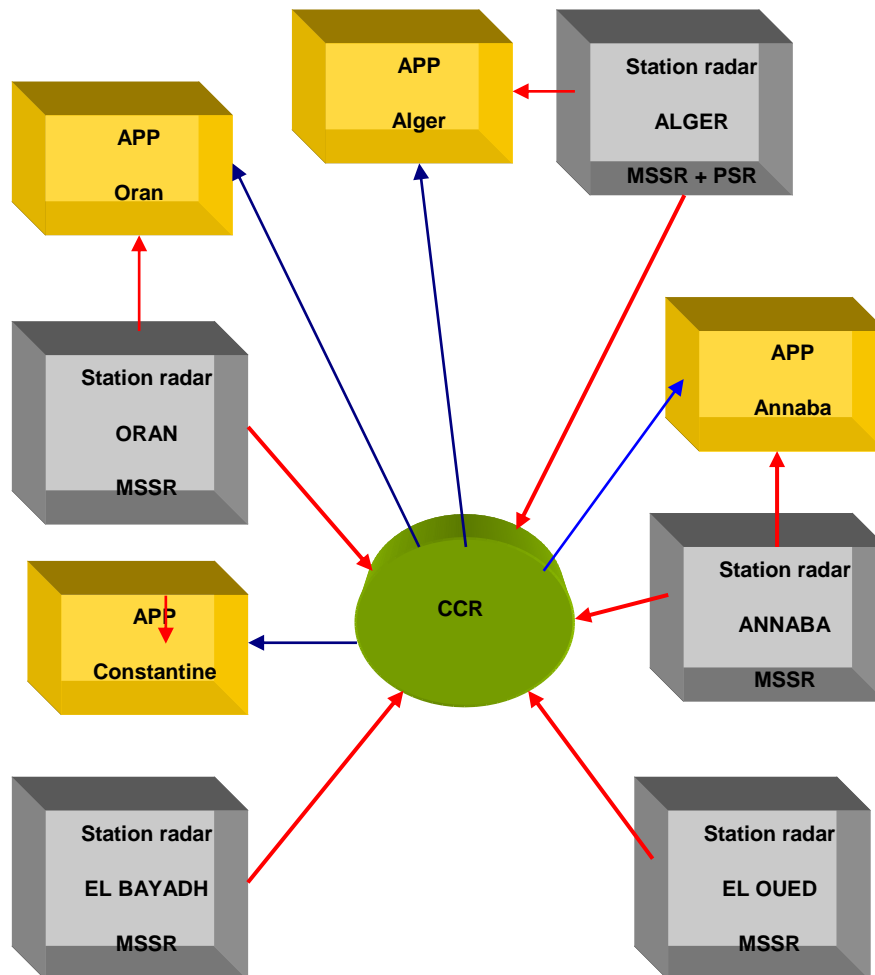


Figure 4.2 : Les stations radars reliées au CCR en Algérie

4.3.1 Le centre de contrôle régional CCR (figure 4.3)

Il est partagé en deux grandes salles, la salle technique et la salle d'exploitation.

- La salle technique regroupe :

Une partie du système, où elle reçoit les données radar SSACTA des cinq stations radars sur dix modems SA ACTA, deux modems pour chaque station. Au niveau de cette partie, les données radar reçoivent un deuxième traitement pour être dirigées finalement vers la salle d'exploitation [68].

- Une AMS, où elle reçoit les données radar AMS des cinq stations, sur dix modems AMS, deux modems pour chaque station et chaque modem est associé à une carte ayant une entrée modem et de deux sorties dirigées vers les CWP de la salle d'exploitation et le RCMS de la salle technique.
- Le RCMS pour le contrôle des états des cinq stations.

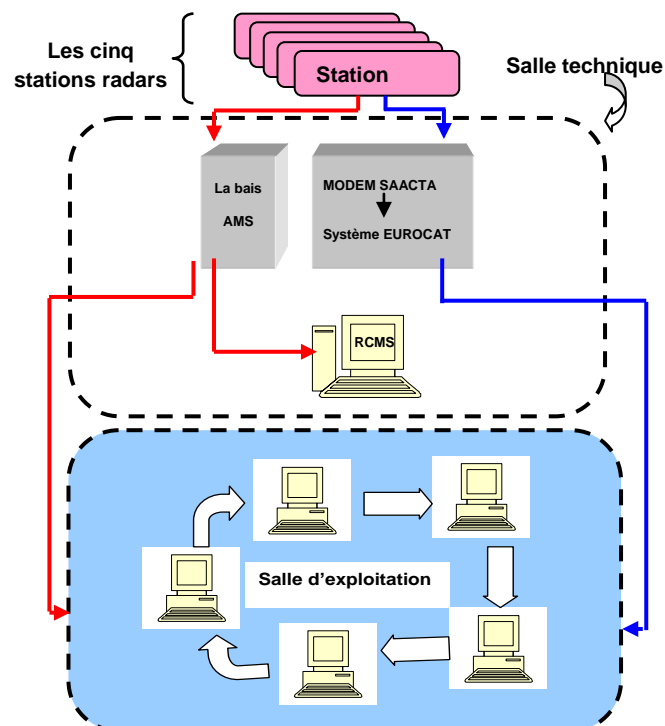


Figure 4.3 : Le centre de contrôle régional CCR.

4.3.2 La station radar d'Alger :

La station radar centrale d'Alger est équipée (figure.4.4) :

- Un système de radar de surveillance secondaire mono pulsation (MSSR) avec une portée maximale de 250 NM.
- Un système de radar de surveillance primaire (PSR) avec une portée de 80 NM.
- Un groupe d'antenne (MSSR et PSR) avec un joint tournant ;
- Deux processeurs de tête de radar (RHP) (en redondance) ;
- Un serveur de maintenance radar (RMM) ;
- Double transpondeur de test de MSSR ;
- Un système de contrôle et de visualisation local (LCMS) ;
- Deux groupes pour l'alimentation auxiliaire automatique ;
- Un système de climatisation ;
- Un système anti- incendie.

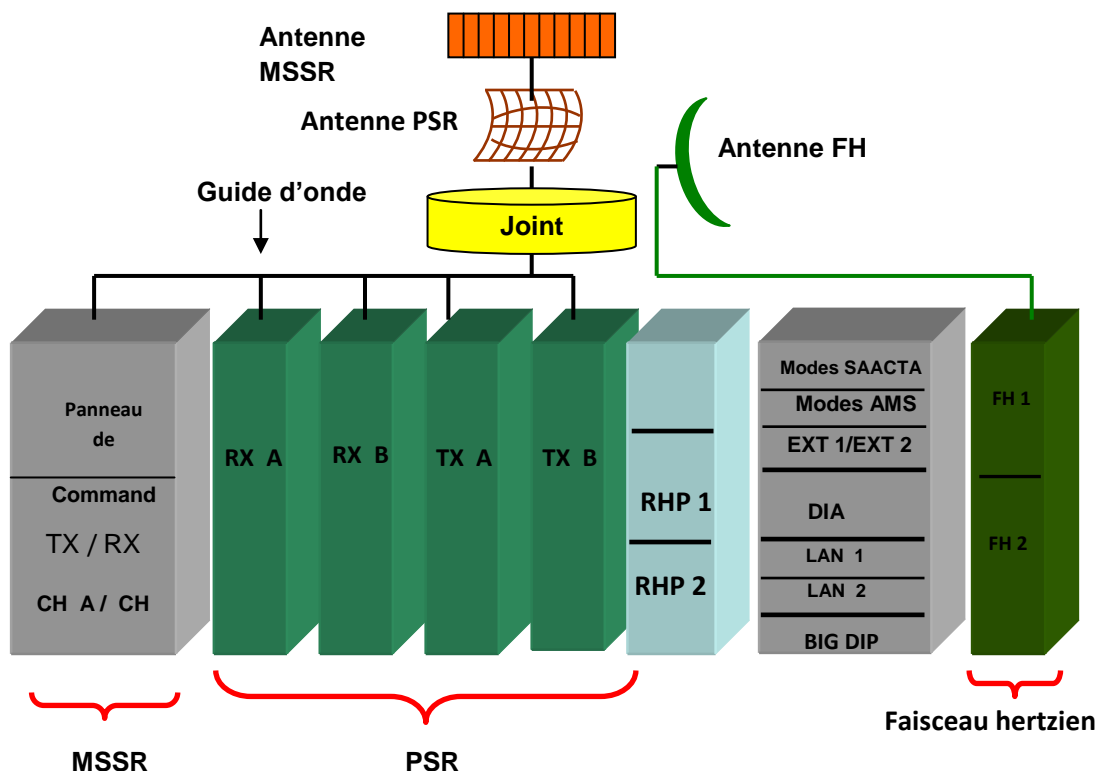


Figure 4.4 : Présentation de la station radar d'Alger.

4.3.3 Le flux d'information au niveau de la station

Les données transmises parmi les différentes composantes de système sont :

- Les données fondamentales que sont les plots (les données de l'avion détecté par le PSR et le MSSR sont envoyées au processeur de la tête de radar (RHP) à travers un réseau local LAN).
- Le RHP manie les plots du PSR et du MSSR, ils sont combinés pour créer des tracks locales pour un traitement mono radar.
- Les données locales sont transmises au centre de traitement et de visualisations (CCR et l'APP) à travers des moyens de transmissions (les lignes téléphoniques, le faisceau hertzien et fibre optique) .

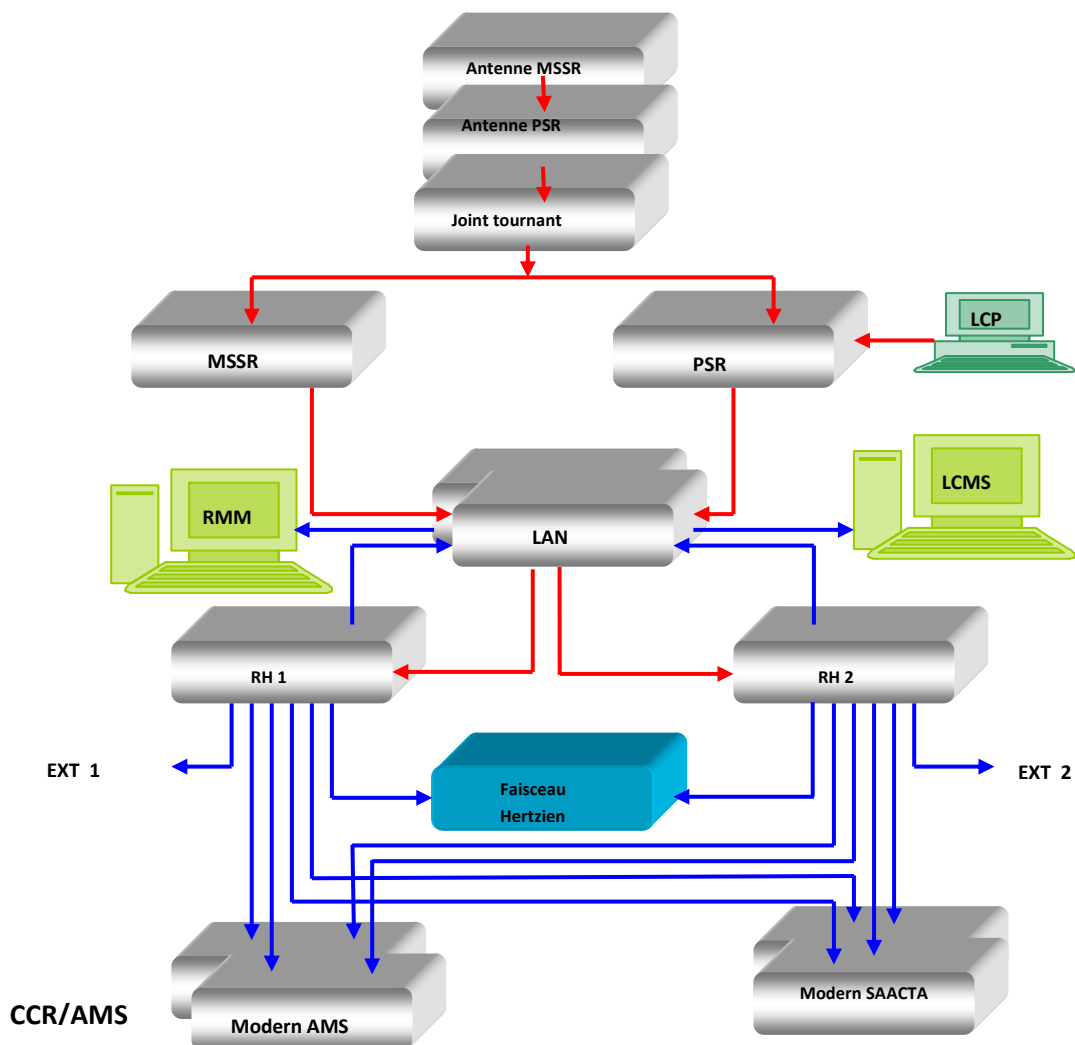


Figure 4.5 : Flux d'information dans la station d'Alger

Pour notre simulation, nous avons utilisé un simulateur Radio-Mobile VE2DBE [65] avec les caractéristiques d'un radar secondaire (SSR). Notre étude s'est portée sur les deux sites cités précédemment à savoir ceux d'AKFADOU ($36^{\circ} 04' 36''$ N- $004^{\circ} 37' 15''$ E) et CHREA ($36^{\circ} 25' 32''$ N- $002^{\circ} 52' 36''$ E). Ces derniers couvrent la région de Boussaâda.

4.4. Élaboration des couvertures radar

4.4.1 Élaboration des couvertures radar via le logiciel Radio Mobile

Nous résumons ci-dessous, les étapes nécessaires pour l'élaboration des couvertures radar du Nord algérien à l'aide du logiciel Radio Mobile. Ce logiciel est gratuit (freeware). Il est reconnu par la communauté scientifique des télécommunications (V2EB) [69].

1°) On lance d'abord le logiciel Radio mobile (Radio Mobile.exe) ;

2°) On choisit la région ou le site pour lequel on doit faire une étude de déploiement des moyens de surveillance, le radar dans notre cas d'étude. On rappelle que ce dernier moyen de surveillance du trafic aérien fait partie du déploiement du concept CNS / ATM en Algérie.

3°) On fait apparaître la grille d'altitude pour ainsi connaître les élévations de chaque point de la région d'étude, voir figure (4.6) ci-dessous :

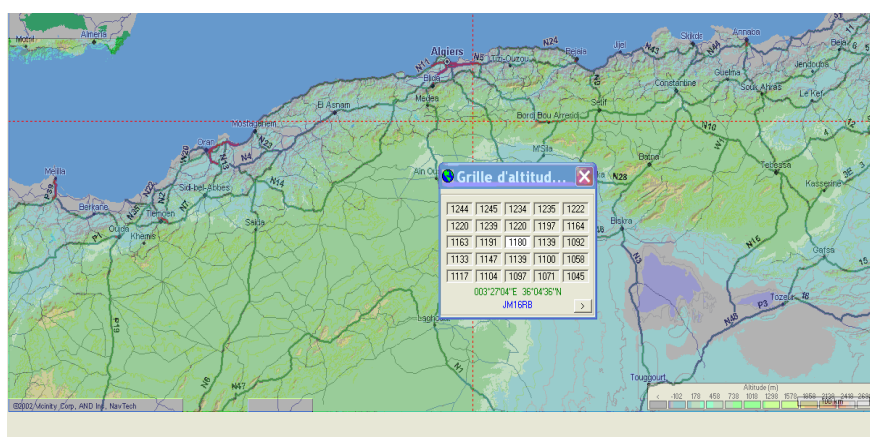


Figure 4.6 : Acquisition de la grille des altitudes sous Radio mobile pour le Nord algérien [69]

Une fois que la région est sélectionnée, on peut lire les coordonnées de chaque point. Autrement dit les latitudes et les longitudes sur n'importe quels points de la région choisie précédemment. De plus, peut lire aussi l'élévation de dernier point par rapport au niveau moyen de la mer.

4°) On introduit les propriétés de la station radar à installer (figure 4.7) :

- Le nom de la station en question.
- L'altitude de la station
- Pour la positionnement de la station, il peut s'effectuer par deux manières différentes soit par la position du curseur ou par la méthode classique, à savoir : l'introduction des coordonnées géodésiques de cette position.
- Choisir : la couleur, le fond et le symbole de la station comme indiqué dans la fenêtre ci-dessous (figure 4.7).

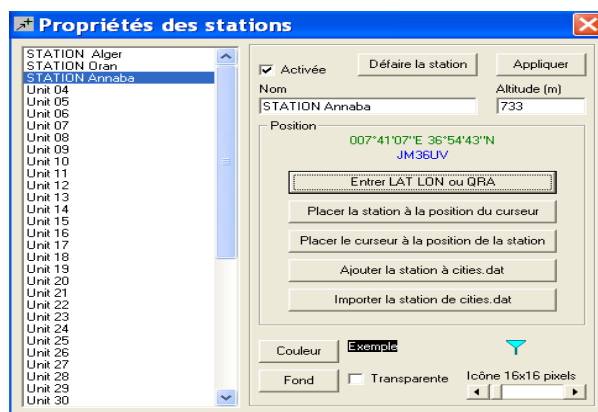


Figure 4.7: Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio Mobile [69]

5°) Une fois l'étape de la mise en œuvre des paramètres des stations est terminée, on procède au traçage des couvertures radar des stations déjà précitées.

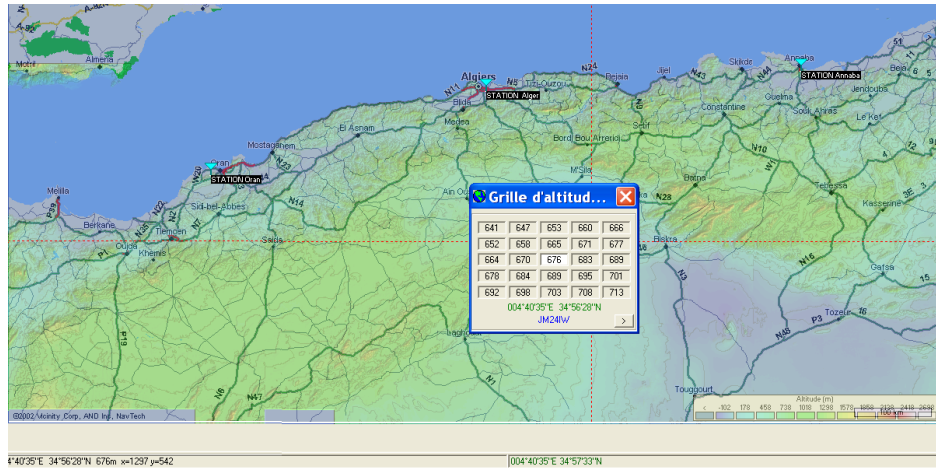


Figure 4.8 : Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio Mobile[69]

La figure 4.8 précédente représente, le positionnement des stations radars concernées à savoir Oran, Alger et Annaba avec leur base de données topographique.

Pour les étapes de traçage des couvertures radar, on procède comme suit (figure 4.9) :

- 1°) On sélectionne la station radar concernée ;
- 2°) On Introduit la hauteur du senseur et de la cible par rapport au sol (en m) ;
- 3°) On Donne la valeur du pas de balayage de l'antenne radar, c'est-à-dire l'angle d'azimut en degré (°) ;
- 4°) On choisi la valeur de la portée de l'antenne radar en Kilomètres (Km);
- 5°) On Choisi la couleur de la surface de couverture.

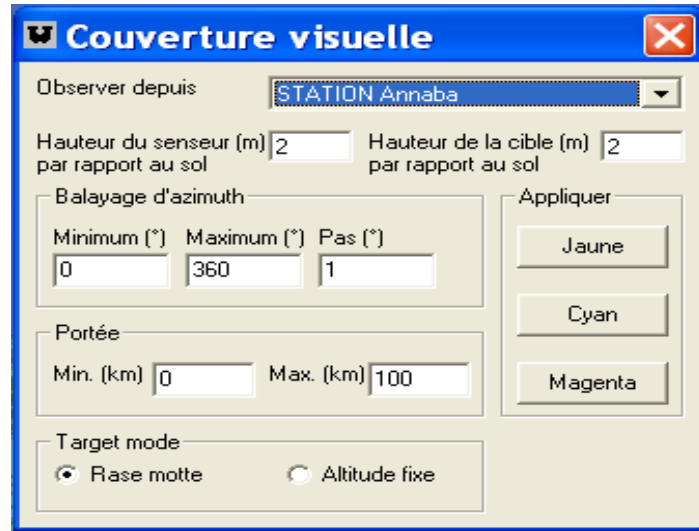


Figure 4.9 : L'élaboration des couvertures radar[69]

La figure ci-dessous représente la simulation des couvertures radar secondaire des régions d'Alger, Oran et Annaba pour un FL 100. On remarque l'absence de couverture radar des régions d'Ain-oussara, Boussaâda et Biskra. Ces dernières ont une portée de 150 NM. [70]

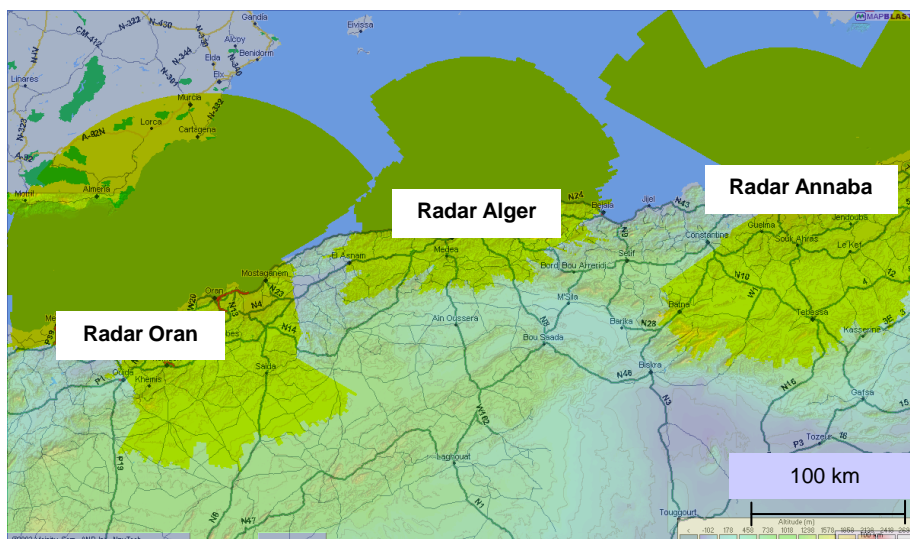


Figure 4.10 : Élaboration des couvertures radar d'Alger, d'Oran et d'Annaba pour FL 100. [70]

La comparaison entre la couverture radar existante [70] et celle élaborée par le logiciel radio mobile pour le niveau de vol FL 100 montre la présence d'un trou de couverture (voir figure 4.10).

Les figures (4.11 et 4.12) montrent séparément l'implantation des radars d'Akfadou et de Chréa. Vu le relief important de la région d'akfadou, nous remarquons une dégradation importante de la couverture radar du côté sud. A la différence de cette dernière, celle de Chréa présente un rayonnement radar homogène mer-terre en plus de la couverture de la région de Boussaâda qui est l'objet de notre étude.

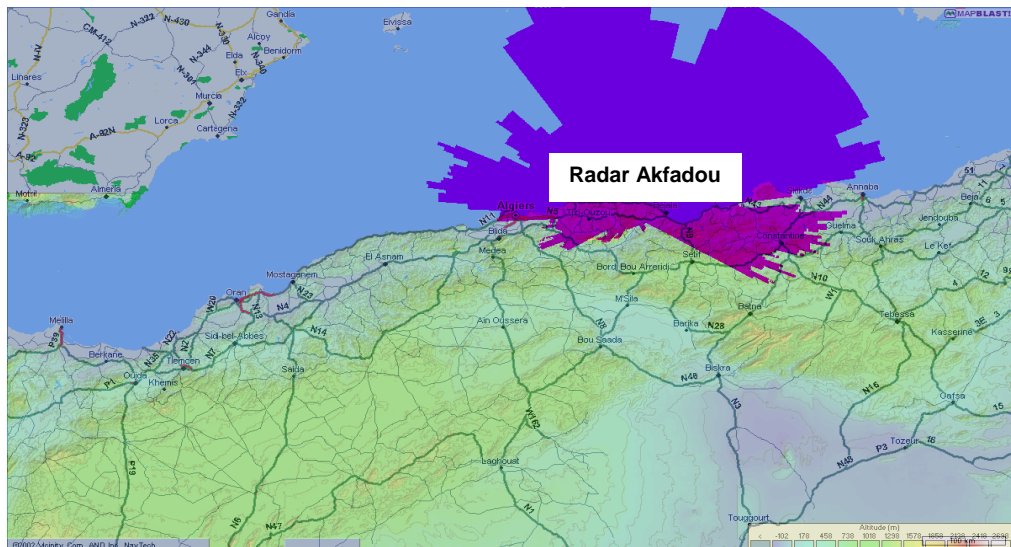


Figure 4.11 : Représente la couverture radar à FL100 pour le site AKFADOU[70].

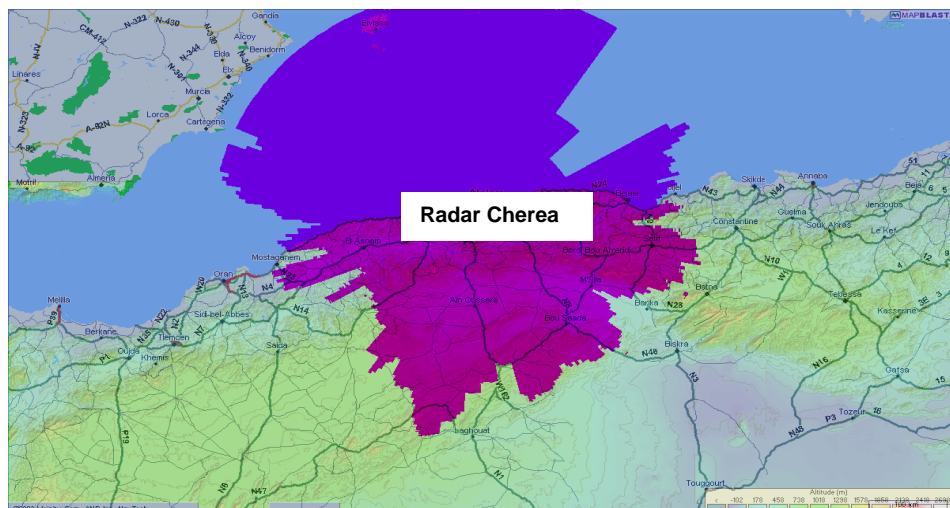


Figure 4.12 : Représente la couverture radar à FL100 pour le site CHREA. [70]

Sur la figure ci-dessous, nous avons reporté les diagrammes de couverture des radars déjà existants (voir tableau.4.1), en plus de la nouvelle station que

nous proposons (Chr ea). Nous remarquons que l'apport de ladite station offre une couverture globale du nord de l'espace aérien algérien.

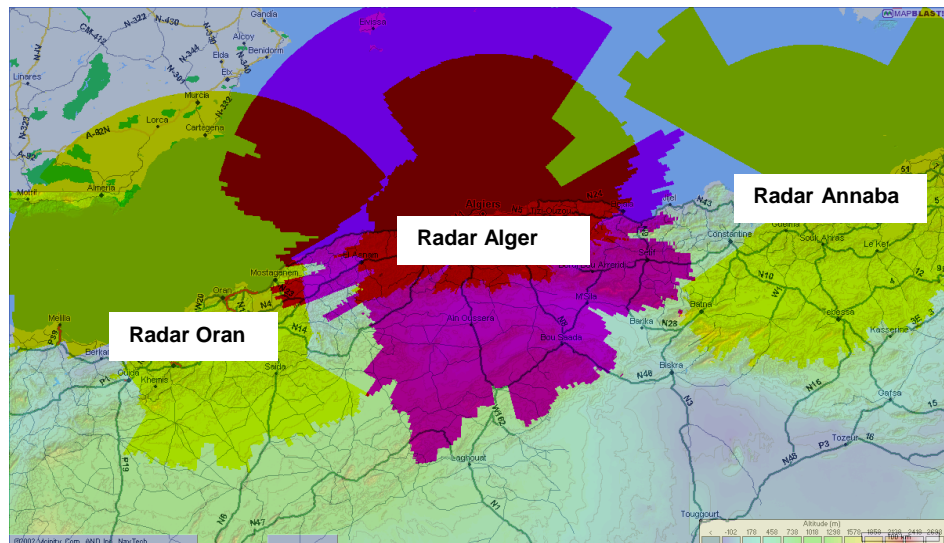


Figure.4.13 : Repr ente la couverture radar à FL100 pour le site proposé à CHREA. [70]

A noter, que les performances d'une couverture radar sont étroitement liées à la topographie des zones où se trouvent les radars implantés.

4.4.2.  laboration des bases de données topographiques

L'élaboration d'une base de données topographique commence par la délimitation de la surface concernée en collectant ces données topographiques (latitude et longitude). La seconde étape, consiste à répertorier l'ensemble des points dominants. Dans ce paragraphe on s'interessera aux reliefs existant dans notre pays.

Le relief de l'Algérie est constitué de trois grands ensembles: le Tell au Nord, les hauts plateaux et l'Atlas saharien au centre et le Sahara au Sud, figure (4.14).

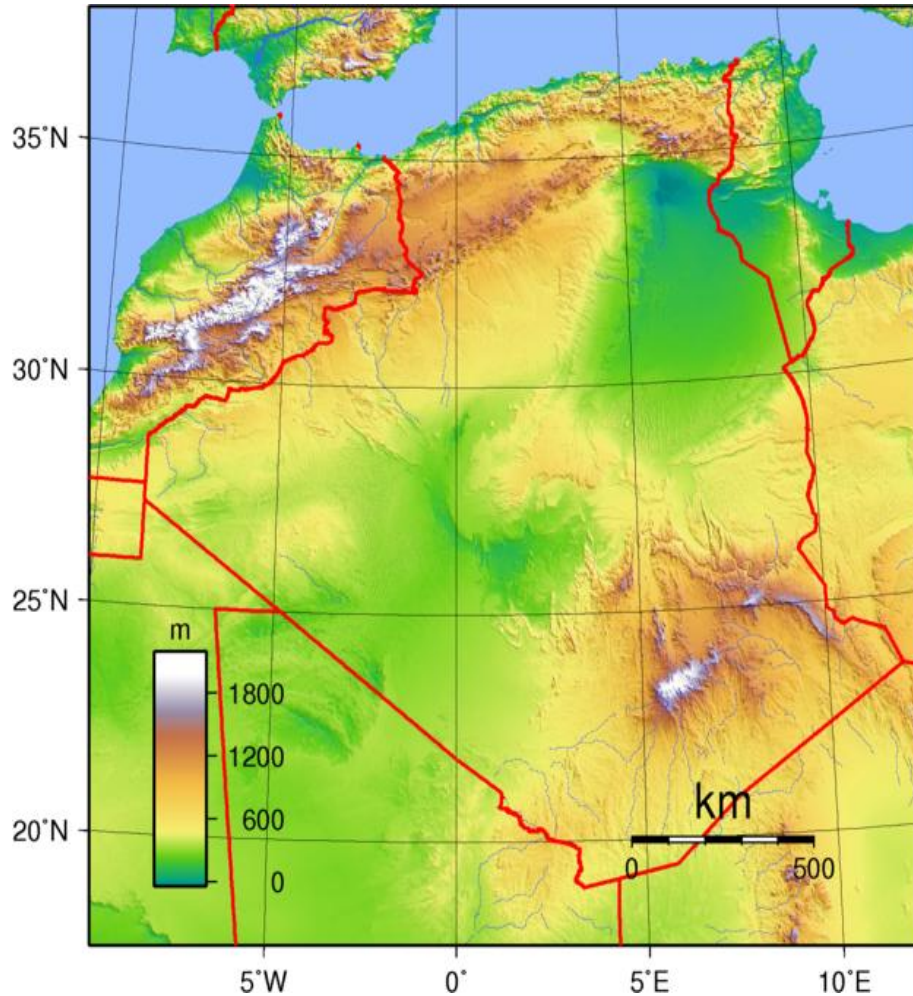


Figure 4.14 : Les différents reliefs de l'Algérie.

A) Le Tell : c'est une étroite bande côtière de 1 200 km de long et de 100 à 200 km de large. Elle est délimitée au Sud par une chaîne de montagnes, plus ou moins parallèle au littoral, et qui s'étend de la région de Tlemcen à l'Ouest, à la frontière tunisienne à l'Est. Cet ensemble est constitué de plaines fertiles où se concentre la majorité de la population algérienne, de vallées et d'une succession de monts (l'Atlas tellien) qui dépassent régulièrement les 2 000 m à l'Est, notamment en Kabylie où les sommets du massif du Djurdjura sont recouverts de neige en hiver.



Figure 4.15 : Le tell algérien

B) Les hauts plateaux et l'Atlas saharien : après avoir franchi l'Atlas tellien, on entre dans un grand ensemble de plaines et de hauts plateaux semi-arides qui courent en diagonale depuis la frontière marocaine jusqu'au nord-est de l'Algérie. Les étés y sont lourds et secs et les hivers très froids et humides. Le terrain est creusé par de nombreuses dépressions, les chotts qui se transforment en lacs salés après la saison des pluies. La végétation est assez pauvre et clairsemée. Elle se limite aux touffes d'herbe (très utiles pour les troupeaux de moutons), ainsi qu'à l'alfa une plante graminacée qui sert à la fabrication de cordes, couffins, tapis, etc. Ces steppes sont délimitées au Sud par une barrière montagneuse (l'Atlas saharien) qui n'est en fait que le prolongement en Algérie du Haut Atlas marocain.



Figure 4.16 : L'atlas Saharien Algérien

C) Le Sahara : il couvre environ 85 % du territoire algérien (2 000 km d'Est en Ouest, 1 500 km du Nord au Sud). Le Grand Sud algérien alterne entre paysages volcaniques (massif du Hoggar) et lunaires (Tassili N'Ajjer), plaines de pierres et (les Regs) et plaines de sable (les Ergs) d'où jaillissent parfois de superbes oasis.



Figure 4.17 : Le Sahara Algérien

A l'aide du logiciel Google Earth, nous avons établi une base de données topographique. A cet effet, nous avons optés pour deux résolutions différentes, la première de 15 NM pour le nord de l'espace aérien algérien, la seconde de 30 NM pour le sud, figure (4.18).



Figure 4.18 : Précision des données topographiques collectée.

Des balayages successifs de surface de dimensions (15×15 NM) ont été réalisés dans toutes les directions afin de localiser les points les plus élevés, (cad) les obstacles les plus pénalisants avec à chaque fois, l'enregistrement des coordonnées de ces derniers, à savoir : latitude, longitude et sa hauteur par rapport au niveau de la mer. Ainsi, plus de 1600 points ont été enregistrées et traitées.

Le traitement de ces dernières nécessite deux étapes :

1°) La conversion des données (latitude, longitude) en coordonnées cartésiennes (X, Y) pour obtenir en degré la latitude et la longitude et en mètre pour la hauteur.

(X et Y) en degré = degré + minute/60 + secondes/3600.

2°) La projection des données sur une carte à l'aide d'un outil de dessin cartographique [71]. Pour avoir une base de données topographique.

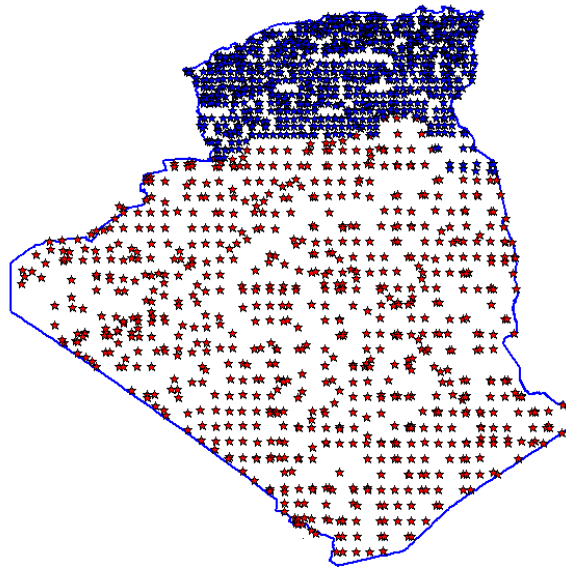


Figure 4.19 : Base de données topographique globale de l'Algérie. [71]

4.5. L'organigramme de calcul (simulation)

L'organigramme que nous avons développé montre les différents étapes de notre simulation, cette dernière est faite de la manière suivante : d'abord une initialisation des données, puis une simulation ayant comme outils, Radio Mobil et

Delphi et on a terminé par une comparaison de résultats afin de choisir un site plus adéquat.

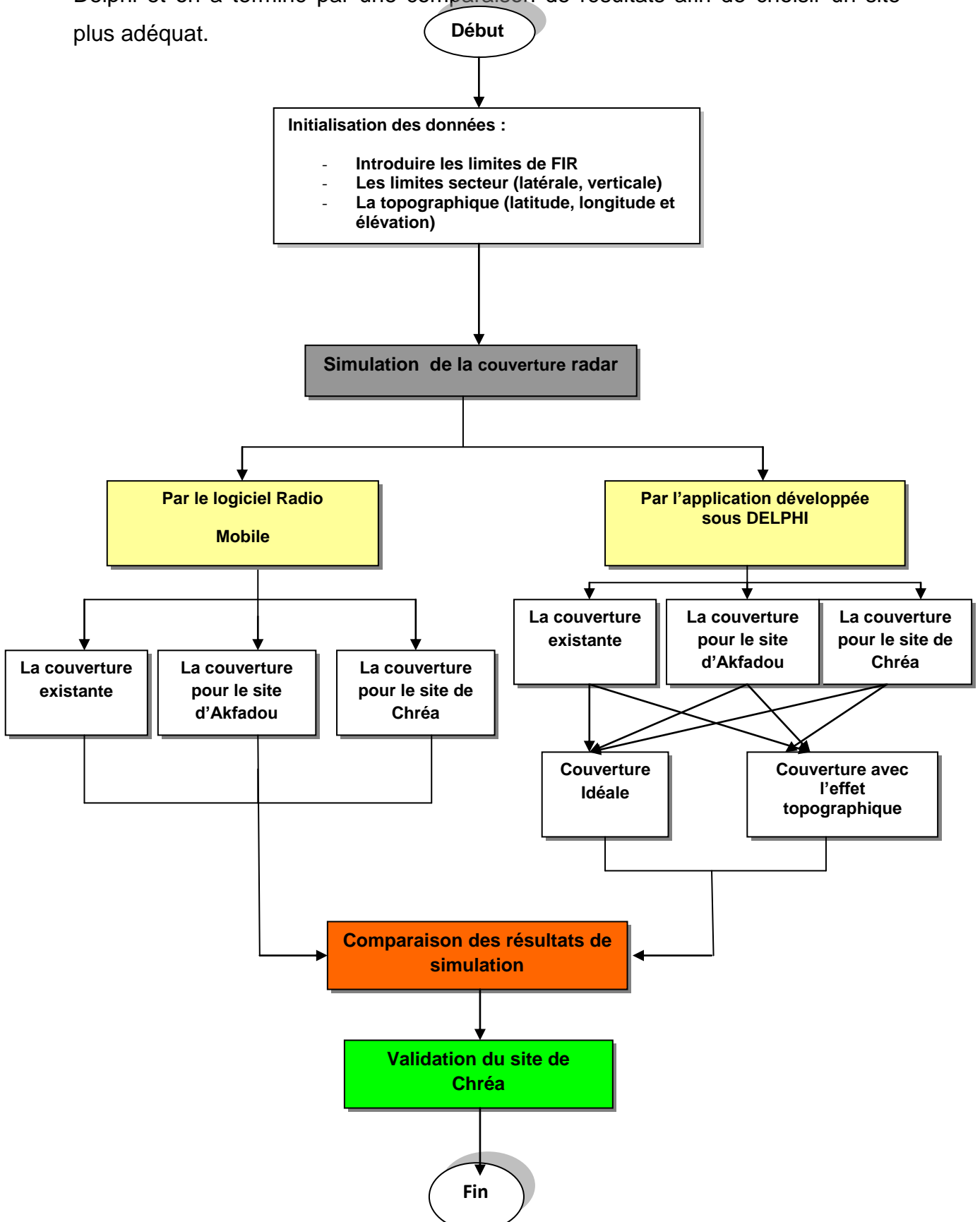


Figure.4.20 : L'organigramme de calcul (simulation) [71]

Afin de mieux visualiser l'effet de relief sur la couverture idéale nous avons élaboré un programme sous MATLAB [71].

On prend comme exemple une station radar avec des coordonnées suivantes :

- Latitude est de 36° ;
- Longitude est de 3° ;
- La hauteur de la station par rapport au niveau de la mer est de 800, avec la portée du radar est de 200NM.

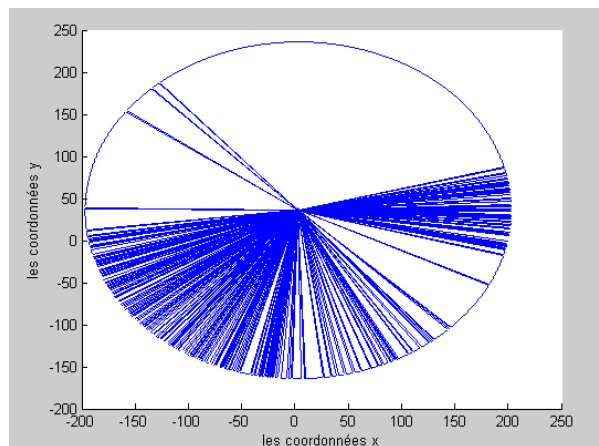


Figure.4.21: Représente l'impact du relief sur la couverture idéale du radar pour $h=800\text{m}$. [71]

Commentaire :

On remarque qu'avec une hauteur de 800m, on aura une couverture radar insuffisante

Par contre si on garderait les mêmes coordonnées de la station, mais on fait augmenter la hauteur ($h=1200\text{m}$) de la station, on aura une couverture meilleure relativement à la première et la figure ci-dessous nous montre clairement cette amélioration.

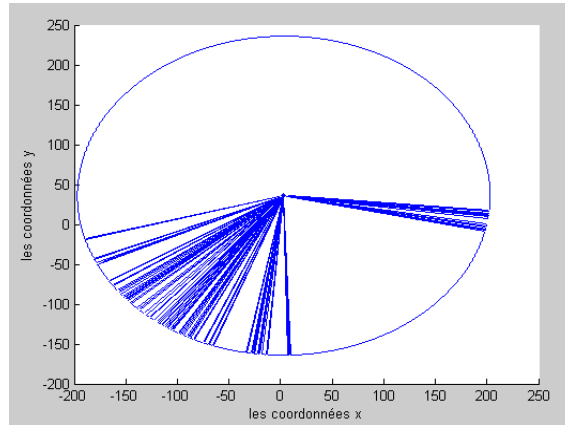


Figure.4.22: Représente l'impact du relief sur la couverture idéale du radar pour $h=1200\text{m}$. [71]

Commentaire :

On constate qu'avec une hauteur de 1200 m, on aura une couverture plus satisfaisante par rapport au premier exemple. Pour cela on déduit que plus une station sera plus haute située plus la couverture sera meilleure.

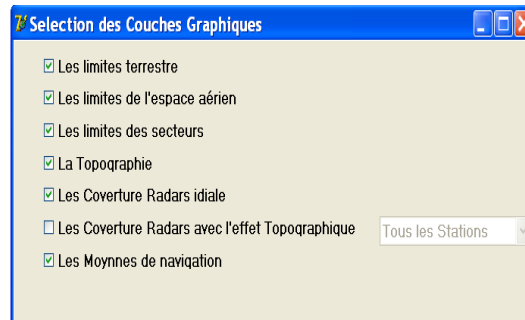


Figure.4.23 : les sélections les informations à afficher[71].

En ce qui concerne l'affichage de toutes ces informations, soit s'effectuée a la fois soit indépendamment.

Pour la partie sud on peut installer une nouvelle station en introduisant les coordonnées de la station (latitude, longitude) en degrés, l'élévation de la station, le nom et la portée de radar en degrés comme présentée dans la fenêtre suivante.

The image shows a software window titled "Nouvelle Station" with a blue title bar. It contains several input fields: "X:" (empty), "Y:" (0.0), "Z(m):" (0.0), "R:" (0.0), and "Nom:" (NewStation). There is an "OK" button at the bottom center.

Figure.4.24 : les informations à introduire pour implanter une nouvelle station radar. [71]

Après la réalisation d'une base de données topographique mentionnée précédemment, et la présentation de sectorisation actuelle, on projette à l'aide d'un logiciel (DELPHI) la couverture idéale de cinq stations radars qui couvrent la partie nord de l'espace aérien Algérien y compris les limites avec les pays de l'autre rive de la mer méditerranéenne.

4.6 Résultats et Interprétation

Pour le recueil de résultats on réalise la simulation de couverture idéale sans tenir compte de l'effet topographique, en suite on introduit l'effet de relief pour trois niveaux de vol différent et on finira par choisir deux sites comparables.

Voici la couverture idéale sans tenir compte de l'effet topographique.

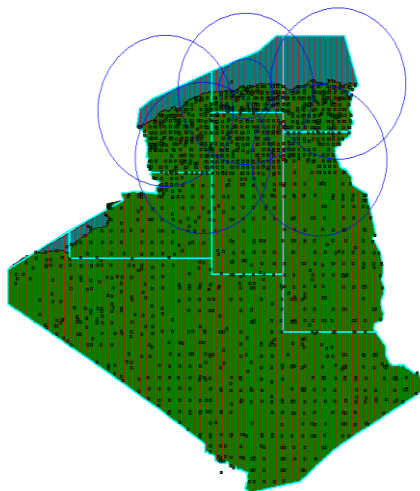


Figure.4.25: Représente la couverture idéale pour cinq stations radars existantes au FIR d'Alger. [71]

La figure ci-dessous nous montre la simulation de couverture concernant les cinq stations radar existantes en prenant en considération l'effet de relief sur la couverture idéale du radar.

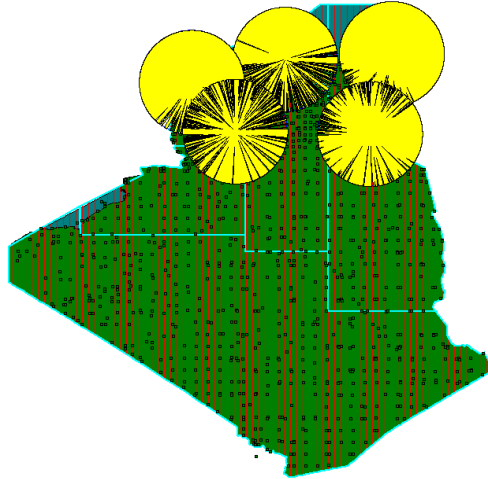


Figure.4.26: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour un niveau de vol FL 100. [71]

Commentaire :

On constate que pour un niveau de vol FL100, la couverture radar est médiocre aboutissant à un trou au niveau de la région de BOUSSAADA, ceci est bien représenté dans la figure (4.25).

Lorsqu'on fait augmenter le niveau de vol pour atteindre FL200 on aura ce schéma.

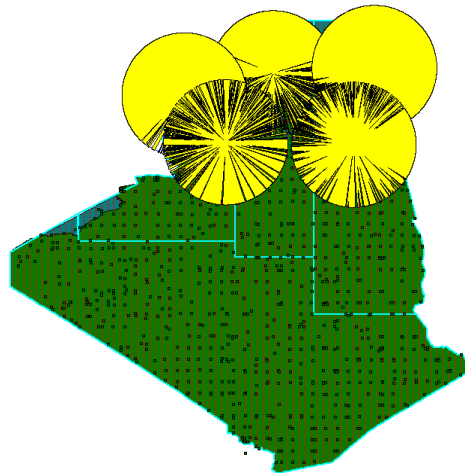


Figure.4.27: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour un niveau de vol FL 200[71].

Commentaire :

On remarque que la couverture radar s'améliore de plus en plus, ce ci est dû à une augmentation de niveau de vol (FL200), avec la persistance du trou de BOUSSAADA d'une degré moindre, en comparant avec celle constatée au niveau de vol FL100.

On reste sur le même paramètre qui est le niveau de vol (FL), tout en augmentant sa valeur pour atteindre le FL 300. Ça nous donne la figure suivante.

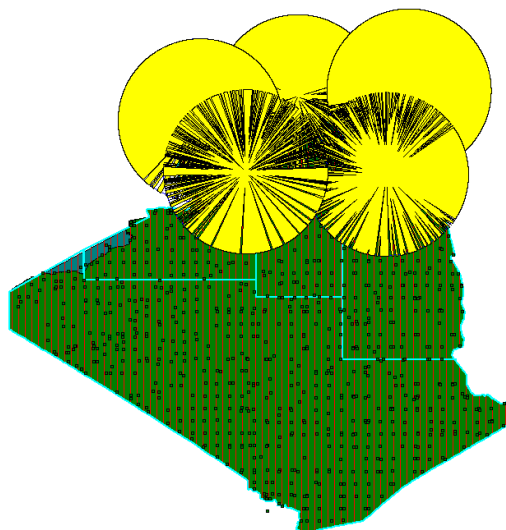


Figure.4.28: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour un niveau de vol FL 300. [71]

Commentaire :

On constate que la couverture radar est relativement meilleure pour un niveau de vol FL300.avec disparition quasi complète de trou de BOUSSAADA. Cela nous mène à dire que la couverture radar est proportionnelle au niveau de vol c'est-à-dire que lorsque on augmente le niveau de vol on aura une couverture optimale.

L'implantation d'une station radar est soumise à plusieurs critères à savoir, l'accessibilité de site, la sécurité, disponibilité de l'énergie...ect.et pour cela on propose le site d'AKFADOU dont la couverture est bien présentée dans la figure suivante.

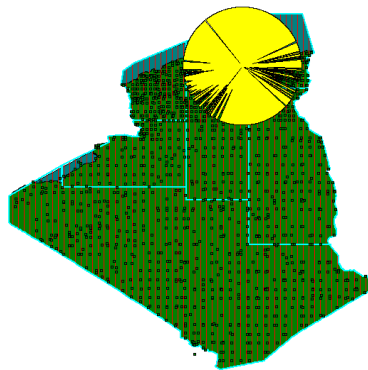


Figure.4.29: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour la station d'AKFADOU. [71]

Commentaire :

On constate que la couverture du radar assurée par la station AKFADOU est bonne de coté de la mer par contre elle est mauvaise à l'intérieure du pays.

Pour améliorer la couverture du radar à l'intérieure de pays et faire face au lacune de BOUSSAADA, on propose un autre site celle de CHREA dont la couverture est bien présentée dans la figure suivante.

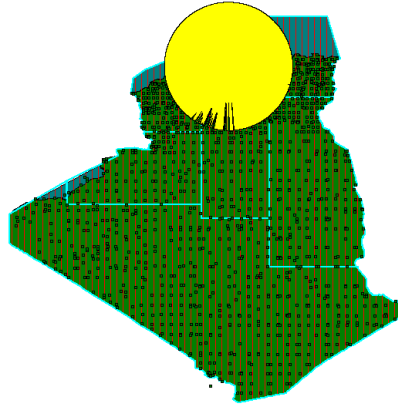


Figure.4.23: Représente la couverture radar en tenant compte l'effet topographique pour la station de CHREA. [71]

Commentaire :

On remarque que la station de CHREA assure une meilleure couverture radar dans toutes les directions.

Dans la figure ci-dessous on faite greffer la couverture assurée par la station de CHREA sur celle assurée par les cinq stations existantes

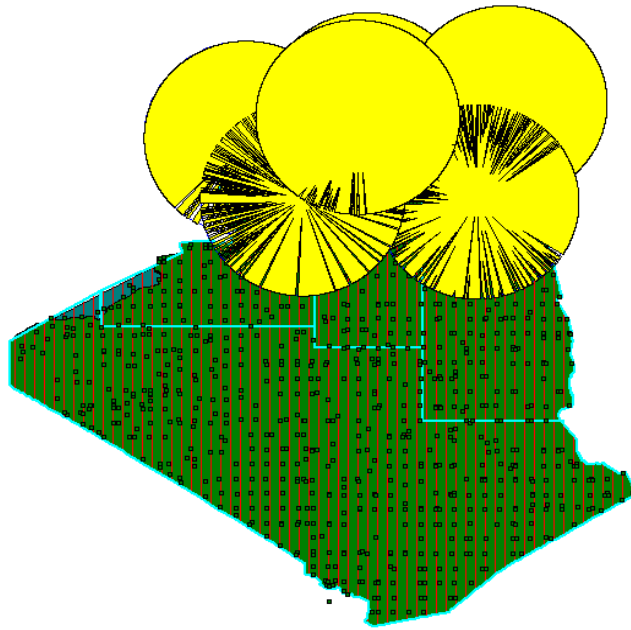


Figure.4.31: Représente la couverture radar proposée. [71]

Commentaire :

On constate que la superposition de couverture existante et celle résultante de la station de CHREA couvre le trou qui se trouve à la région de BOUSSAADA.

4.7. Conclusion

Vue sa position géographique, les moyens et les installations radionavigation qui se trouvent au site de CHERA vue le résultat de notre simulation de couverture radar en proposera le site de CHERA comme site privilégié au détriment d'AKFADOU.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté nous a permis d'étudier la problématique de la couverture radar de l'espace aérien Algérien par l'utilisation de nouveau concept CNS-ATM pour l'amélioration de gestion du trafic aérien. Ces nouveaux systèmes permettent une intégration très étroite entre le système au sol et les usagers de l'espace aérien.

La gestion du trafic aérien à l'aide de ces systèmes permet :

- Une utilisation rationnelle de l'espace aérien.
- Un renforcement accru de la sécurité du trafic aérien.

Actuellement, les systèmes de contrôle et de surveillance du trafic aérien installé en Algérie supportent assez bien la charge de trafic (les contrôleurs aériens arrivent à gérer l'espace aérien sous leur responsabilité, mais avec certaines difficultés). Néanmoins, dans un avenir très proche la charge du trafic deviendra tellement importante qu'elle nécessitera :

- L'implantation de nouvelles stations radars.
- L'utilisation de nouvelles technologies de surveillance du trafic aérien à savoir : ADS-C, ADS-B et radar secondaire mode S.....etc.

Il est admis que la sécurité du trafic aérien repose sur une connaissance en temps réel de la position des aéronefs. En Algérie, ces données sont principalement obtenues par un réseau de radar. Néanmoins, le choix de l'installation de ces derniers ne permet pas la couverture de la région de Boussaâda, malgré sa densité de trafic. Notre souci ainsi que celui de l'E.N.N.A est de trouver un site pour une nouvelle station radar. Cette dernière permettra la couverture aérienne de la région de Boussaâda.

En tenant compte des critères de sélection propre à ce type d'installation. Deux sites majeurs ont été sélectionnés. A savoir : Chréa et l'Akfadou.

Notre choix s'est porté sur le site de Chréa :

- Vu sa position géographique ;
- Vu les moyens techniques, sécuritaires et les installations de radionavigation qui se trouvent actuellement sur le site de Chréa ;
- Vu les résultats probants des différentes couvertures radar simulées.

Il est indéniable que le site de Chréa est le plus approprié à assurer un complément à la couverture radar du nord de notre pays.

On proposera comme perspectives tirées de notre étude :

- L'amélioration du traitement et du transfert de l'information entre les exploitants, les aéronefs et les organes ATS ;
- L'extension de la surveillance grâce à l'utilisation des positions d'aéronef obtenues des systèmes embarqués (dépendante aéronautique ADS) ;
- L'utilisation des systèmes avancés de traitement des données obtenues au sol, y compris les systèmes destinés à présenter au contrôleur, les données obtenues de l'ADS (« affichage pseudo radar »), compte tenu :
 - 1- de la possibilité de tirer parti de la précision de navigation améliorée en quatre dimensions des aéronefs modernes.
 - 2- Des meilleures possibilités de répondre aux demandes exprimées en matière de profils de vol dans toutes les phases du vol, sur la base des objectifs des exploitants.
 - 3- De l'amélioration de la détection et de la résolution des conflits, de la génération et de la transmission automatiques d'autorisation non conflictuelles et de d'adaptation rapide à l'évolution des conditions de trafic.

APPENDICE A

LISTE DES ABREVIATIONS

ACARS	: Airborne communication addressing and reporting system
ADS-B	: Système automatique dépendant de surveillance mode Diffusion
ADS/C	: Système automatique dépendant de surveillance par contrat
AIP	: Publications d'information aéronautique
AMSL	: Au-dessus du niveau moyen de la mer
APP	: Contrôle d'approche
ATM	: Gestion du trafic Aérien
AWY	: Voies aériennes
AIS	: Service d'information Aéronautique
ATC	: Contrôle du trafic Aérien
ATS	: Services de circulation aérienne
CCR	: Centre de contrôle régional
CA	: Circulation aérienne
CNS	: Communication Navigation Surveillance
CTA	: Région de contrôle
CTR	: Zone de contrôle
CAG	: Circulation aérienne générale
CPDLC	: Communication contrôleur pilote par liaison de donnée
CVSM	: Minimums de séparation verticale conventionnelle
DAAG	: Indicateur d'emplacement OACI pour l'aérodrome d'Alger Houari Boumediene
DACM	: Direction de l'Aviation Civile et de de la Météorologie

DME	: Equipement de mesure de distance
EGSA	: Direction de gestion aéroportuaire
ENNA	: Etablissement National de la navigation aérienne
FIS	: Service d'information de vol
FL	: Niveau de vol
FMS	: Système de gestion de vol
FIR	: Région d'information de vol
GND	: (Niveau) du sol
GLONASS	: Système global de navigation par satellite russe
GNSS	: Système global de navigation par satellite
GPS	: Système global de positionnement par satellite
HF	: Haute fréquence
IFR	: Vol aux instruments
ILS	: Système d'atterrissage aux instruments
MHZ	: Mégahertz
MSL	: Niveau moyen de la mer
NDB	: Balise non Directionnelle
OACI	: Organisation de l'Aviation Civile Internationale
PSR	: Radar primaire de surveillance
RVSM	: Réduction des Minimums de Séparation Verticale
RNAV	: Navigation de surface
RNP	: Qualité de navigation requise
RSFTA	: Réseau du Service Fixe de Télécommunication Aéronautique
SAACTA	: Système Algérien Automatisé de Contrôle du Trafic Aérien
SSR	: Radar secondaire de surveillance
SYRAL	: Système Radar Algérien
TMA	: Région terminale de contrôle

TRAFCA	: Traitement automatique des Fonctions de la Circulation Aérienne
TWR	: Tour de contrôle
UIR	: Région supérieure d'information de vol
UTA	: Région supérieure de contrôle
VDL	: Liaison de donnée VHF
VFR	: Vol à vue
VHF	: Très haute fréquence
VOR	: Radiophare omnidirectionnel
VSAT	: Terminal à très petite ouverture

Appendices B

Liste des Symboles et les Abréviations

c	: La vitesse de propagation
f	: La fréquence
T	: La période.
λ	: La longueur d'onde.
Z	: L'impédance d'onde.
P_z	: L'énergie transportée par l'onde
λ_0	: La longueur d'onde un milieu infini.
λ_g	: La longueur d'onde à l'intérieur du guide.
λ_c	: La longueur d'onde de coupure.
τ	: La largeur d'impulsion.
f_d	: La fréquence doppler.
T_r	: La période de répétition des impulsions.
R_u	: La distance maximum sans ambiguïté pour un radar.
f_r	: La fréquence de réflexion.
R_{min}	: La distance minimum (distance aveugle).
$TMES$: Temps de mise en service du récepteur.
H	: La hauteur de l'avion par rapport de la mer.
R_T	: Le rayon de la terre.
β	: L'angle de site.
v_r	: La vitesse radiale.
ΔR	: La résolution en distance.
Δ_f	: La largeur de bande.
G	: Le gain de l'antenne.
P_c	: La puissance crête.
R	: La distance entre l'antenne et la cible.
P_i	: La densité de puissance rayonnée par l'antenne.
P_{cib}	: La puissance totale reçue par la cible.

σ	: la surface équivalente de la cible.
P_r	: La puissance totale captée par le radar.
A_e	: La surface équivalente du radar.
S_{min}	: Représente le signal minimum de détection
L_s	: Facteur de perte.

REFERENCES

1. Olaf Milbredt, Florian Rudolph, Erik Grunewald, Thomas Christ,"Evaluating condition and impact of intermodal traffic management involving airports and railways", Transportation Research Procedia 25, 2017,1735-1744.
2. Julie Roudet, Paul-Emmanuel Thurat, Nicolas Turcot," Airport ground-traffic surveillance systems data feed innovative", Transportation Research Procedia 14 (2016) 3741 – 3750.
3. Mounia Boutkhil, Abdellah Driouach, Abdellatif Khamlichi, " Detecting and localizing moving target using multistatic radar système", Procedia Manufacturing 22 (2018),455-462
4. Brunilde Girardet, "Trafic aérien : détermination optimale et globale des trajectoires d'avion en présence de vent", DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2014.
5. Nicolas Marc,"Enjeux d'appropriation de l'espace aérien en France et en Europe : vers une territorialisation spécifique", Géographie. Université d'Angers, 2014. Français.
6. Doc 4444, Procédures pour les services de navigation aérienne ; « Gestion du trafic aérien », Quatorzième édition, 2013.
7. M.DJAMMALI,"Support à la mise en œuvre de CNS-ATM en AFIMID",mémoire de fin d'étude,Master En Exploitation aeronautique et Gestion du trafic aérien. ENAC, Promotion 2005.
8. TRAN DAC Huy, "Sectorisation contrainte de l'espace aérien,« Ecole Doctorale de l'Université de Technologie de Compiègne", Thèse d'état, 2004.
9. AIP ALGERIE, "CLASSIFICATION DES ESPACES AERIENS ,«ENR 1-4, 15 MAR 2007.
10. TAMBET TREIMUTH, »" Dynamic optimization of airspace sector grouping", DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2018.

11. Jun ZHOU, "Optimisation des procedures de d ´ epart et d'arriv ´ ee dans une zone terminale ´ Optimal Design of SIDs/STARs in Terminal Maneuvering Area ",DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE,2017.
12. Michael W. Sawyer, Katherine A. Berry, Andrew Henderson, Richard Rohde, Devin Liskey," A proactive assessment of the changing non-conformance risk profile for arrival and departure procedures in NextGen" Procedia Manufacturing 3 (2015) 2967 – 2973.
13. Vincent Galotti," The evolving air navigation system and the impact on avionics", Deputy Director, Safety Standardization & Infrastructure, International Civil Aviation Organization, 18 August 2011.
14. Sanja Steiner," The Impact of Transition Processes on Safety". Flight Safety Foundation & European Regions Airline Association, 14th European Safety Seminar, Conference Proceedings, Budapest, March 11-13, 2002, p. 1-7
15. La carte de Croisière pour la FIR d'alger.Pdf.2017.
16. A.BOUDANI, S.BERGHUEL & H. SACI, " Etude et la mise en œuvre de la navigation basée sur les performances ", au 2^{ème} Conférence internationale des sciences aéronautiques (ICAS) à USTO 3-4 Novembre 2015 à Oran en Algérie.
17. Plan National de Mise en Oeuvre de la Navigation Fondée sur les performances – **pbn**, Ver 1.0 / Août 2015.
18. ENNA, DENA, SIA, AIC série A, NR 03/11,' Mise en œuvre du CPDLC à titre supplétif dans l'Espace aérien de la FIR Alger', 30 JUN 11.
19. ENNA, DENA, SIA, AIC série A, NR 02/08,' Mise en œuvre de la surveillance dépendante automatique ADS/C dans de la région d'information de vol d'Alger', 03 JAN 08.
20. Projet SAACTA Algérie, " projet de mise en oeuvre du contrôle radar dans la FIR Algérie" , CIA série NR 02 / 06 - 19 JAN 06.
21. DDNA /DPD /SPS/ Statistique de trafic 2007-2017.
22. Tim Murphy, Peter Rudolph, Cortney Robinson, ICCAIA CNS- ATM Committee Report to Council, Montréal, Canada – 16 May 2017.
23. IBAC CNS/ATM Advisory Group, International Business Aviation Council (IBAC), "Communications, Navigation, Surveillance/ Air Traffic Management (CNS/ATM)", Guidance Material, January, 2009 Version 1.0.
24. Doc l'OACI,'Incorporating Supplement No.1(Doc9623),4 Report 4 th Meeting

- 1993.
25. Matsapha, Manzini," description des stratégies de mise en œuvre des initiatives du plan mondial de navigation aérienne" ,organisation de l'aviation civile internationale, , 8 to 9 novembre 2010.
 26. Tao Jiang, Jared Geller, Daiheng Ni, John Collura, " Unmanned Aircraft System traffic management: Concept of operation and system architecture", International Journal of Transportation Science and Technology 5 (2016) 123–135.
 27. David Gianazza," Méthodes d'optimisation et d'apprentissage Appliquées à des problèmes de trac aérien", Habilitation a diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2016.
 28. Frédéric Dobruszkes,"High- speed rail and air transport competition in western Europ : A supply- oriented perspective", Transport Pollicy 18, 2011, 870-879.
 29. David L. Allen, Aslaug Haraldsdottir, Robert W. Lawler, Kathleen Pirotte, Robert W. Schwab," The Economic Evaluation of CNS/ATM Transition", Boeing Commercial Airplane Group, 16th DASC. AIAA ,1997.
 30. B. Pet, F.A. BOONS,"transition through subsystem innovation ? The case of traffic management", Technological Forecasting & Social Change 77(2010), 1249-1259.
 31. Doris Novak, Karlo Jurkovic,"GNSS Navigation for Enabling More Efficient and Effective Air Traffic Management", Transportation Research Procedia 28, 2017,106-110.
 32. Carlos Daniel Salós Andrés," Contrôle d'intégrité appliqué à la réception des signaux GNSS en environnement urbain ",Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2012.
 33. GIUSEPPE Rotondo, « Processing and Integrity of DC/DF GBAS for CAT II/III Operations », DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2016.(GBAS).
 34. Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), ANNEXE 15, Quatorzième édition Juillet 2013.
 35. ZHANG Guangming," An Overview of the Effect of GNSS Operation at High Elevation Airport", Procedia Engineering 17 (2011) 117 – 124.

36. Adriana Miramontes, Andriana Tesoro, Yuri Trujillo, Edward Barraza, Jillian Keeler, Alexander Boudreau, Thomas Z. Strybel, Kim-Phuong L. Vu, "Training student air traffic controllers to trust automation", *Procedia Manufacturing* 3 (2015) 3005 – 3010.
37. Tannaz Mirchi, Kim-Phuong Vu, James Miles, Lindsay Sturre, Sam Curtis, Thomas Z. Strybel, "Air traffic controller trust in automation in NextGen", *Procedia Manufacturing* 3 (2015) 2482 – 2488.
38. ZHANG Juna, LIU Weib, ZHU Yanbo, "Study of ADS-B Data Evaluation", *Chinese Journal of Aeronautics* 24 (2011) 461-466.
39. Yang Haomiao, Huang Rongshun, Wang Xiaofen, Deng Jiang, Chen Ruidong, "EBAA: An efficient broadcast authentication scheme for ADS-B communication based on IBS-MR", *Chinese Journal of Aeronautics*, (2014), 27(3): 688–696.
40. Thabet Kacem, Alexandre Barreto, Duminda Wijesekera, Paulo Costa, "ADS-Bsec: A novel framework to secure ADS-B", *ICT Express* 3 (2017) 160–163.
41. O.M. Reva, S.P. Borsuk, "Air traffic control students tendencies of desirability levels during flight norms violations", *Procedia Manufacturing* 3 (2015) 3049 – 3053.
42. Sakae Nagaoka*, Mark Brown, "Constructing an Index of Difficulty for Air Traffic Control Using Proximity Parameters", *Procedia Engineering* 99 (2015) 253 – 258.
43. Civil Navigation Japan, "Development of Future Air Traffic Systems in Japan", 5 March 2009 ATS Systems Planning Division. JCAB.
44. David L. Allen, Aslaug Haraldsdottir, Robert W. Lawler, Kathleen Pirotte, Robert W. Schwab, "The Economic Evaluation of CNS/ATM Transition", *The Business Side of CNS/ATM*, Boeing Commercial Airplane Group.
45. Xi ZHU, Xianbin CAO, Kaiquan CAI, "Measuring air traffic complexity based on small samples" *Chinese Journal of Aeronautics*, (2017), 30(4): 1493–1505.
46. Axel B. Classen, Christian Werner, Martin Jung, "Modern airport management-fostering individual door-to-door travel", *Transportation Research Procedia* 25, 2017, 63-76.
47. Piotr Andrzej Dmochowski, Jacek Skorupski, "Air Traffic Smoothness as a Universal Measure for Air Traffic Quality Assessment", *Procedia Engineering* 134, (2016), 237-244.

48. Li Weigang, Marcos Vincicius Pinheiro Dib, Daniela Pereira Alvers, Antonia Marcio Ferreira Crespo, "Intelligent computing methods in Air Traffic Flow Management", *Transportation Research Part C*, 2009,
49. Bruno Desart, David Gillingwater, Milan Janic, "Capacity dynamics and the formulation of the airport capacity / Stability paradox A European perspective", *Jornal of Air Transport Management* 16, 2010, 81-85.
50. Julien DELPRATO, "Analyse de la stabilité d'impulsion à impulsion des amplificateurs de puissance HEMT GaN pour applications radar en bande S", DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES, 2016.
51. Robert M. O'Donnell, "Radar Systems Engineering Lecture 4 The Radar Equation", IEEE New Hampshire Section IEEE AES Society, 2010.
52. Pierre Vaillant et Christophe Paumier, "Notions de base", Radartutorial, Chapitre 1 Version 9 juillet 2011.
53. Julien PETITJEAN, "Contributions au traitement spatio-temporel fondé sur un modèle autorégressif vectoriel des interférences pour améliorer la détection de petites cibles lentes dans un environnement de fouillis hétérogène Gaussien et non Gaussien", thèse de doctorat, spécialité : automatique, productique, signal et image, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, l'université bordeaux 1 soutenue le 6 décembre 2010.
54. Renaud Cariou, "Le traitement du signal radar, Détection et interprétation de l'écho radar", Dunod, Paris, 2012, ISBN 978-2-10-057797-2.
55. George W. Stimson, "*Introduction to Airborne Radar*", Second Edition, SciTch Publishing, 1998.
56. N.V.S.N. Sarma, "*Principles of Radar Systems*", student laboratory manual, 38542-00, Lab- Volt (Quebec), 2006
57. Farzad Hessar, Student Member, IEEE, Sumit Roy, Fellow, IEEE, Spectrum "Sharing Between A Surveillance Radar and Secondary Wi-Fi Networks", Electrical Engineering Department, University of Washington, 2Feb2016.
58. Jamal zaidouni, "traitement en temps réel de signaux radar Appliqués aux transports terrestres", thèse de doctorat, spécialité: électronique, l'université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, n° d'ordre : 08-16, thèse soutenue le 27/06/2008.

59. Ján Labun, Pavol Kurdel, Marek Češkovič , Alena Novák Sedláčková, "Airborne Weather Surveillance Radar For Increasing Air Transport Safety", Transportation Research Procedia 28- (2017) 156-163.
60. Arunesh Roy, Nicholas Gale, Lang Hong," Automated traffic surveillance using fusion of Doppler radar and video information", Mathematical and Computer Modelling 54 (2011) 531–543
61. Brahim BOUDAMOUZ, "Contribution à l'étude de nouvelles techniques de radar MIMO pour la détection de cibles en contexte urbain (à l'intérieur des bâtiments)", Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), thèse de doctorat, 1 mars 2013.
62. L. Delobbe," Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique", Institut Royal Météorologique de Belgique, Publication scientifique et Technique Nr 44, 2006.
63. KHAMASSI Seif eddine, CHEBBI Aymen," Étude des futurs systèmes de surveillance", rapport du projet de final., Université Virtuelle de Tunis (UVT), 2010/2011.
64. Euiho Kim, Kevin Sivits, Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance, Aerospace Science and Technology, [Volume 45](#), 2015, Pages 203-208.
65. ACHACHI ABDELALI, " MODELISATION D'UN RADAR SECONDAIRE POUR UN TRAFIC AERIEN" , Mémoire de MAGISTER, Université de Batna, 2010.
66. Julie Roudet, Paul-Emmanuel Thurat, Nicolas Turcot, "Airport ground-traffic surveillance systems data feed innovative comprehensive analysis", Transportation Research Procedia 14 (2016) 3741 – 3750.
67. ENNA, DENA, SIA, AIC série A, NR 02/06, " PROJET DE MISE EN OEUVRE DU CONTROLE RADAR DANS LA FIR ALGER", 19 JAN 06.
68. Projet SAACTA Algérie, " projet de mise en oeuvre du contrôle radar dans la FIR Algérie" , CIA série NR 02 / 06 - 19 JAN 06.
69. Radio Mobile Freeware by VE2DBE, www.cplus.org/rmw/english1.html.
(Email: arjun_gps@yahoo.com).
70. A. BOUDANI, S. BERGHEUL, M. LAGHA & H. SACI, " Intégration du concept CNS/ATM pour l'amélioration de la couverture radar en Algérie", bulletin des sciences géographiques N°31, p30, 2018.

71. A. BOUDANI, S. BERGHEUL AND H. SACI. "L'influence des nouveaux obstacles sur le schéma de circulation de l'aérodrome d'Alger ", Conférence Internationale de Mécanique et Aéronautique 18-20 Octobre 2016 ZERALDA- ALGER . Proceeding CIMA 2016 p 97.