

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
Département d'aéronautique

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Aéronautique

**COUVERTURE DE L'ESPACE AERIEN ALGERIEN PAR  
LES**

**MOYENS CNS-ATM**

Par

**BOUDANI Abdelkader**

Devant le jury composé de

T.REZOUG	Maître de conférence, U. de Blida	Président
S.BERGHEUL	Maître de conférence, U. de Blida	Rapporteur
A.ZABOT	Chargé de Cours, U. de Blida	Co-Rapporteur
Y.SMARA	Professeur, U.S.T.B.H, Alger	Examineur
M.LAGHA	Maître de conférence (B), U. de Blida	Examineur

Blida, Juin 2009

## ملخص

الوضع الحالي لمحطات الرادار في الجزائر, وهران, عنابة, الوادي والبيض لا يغطي كامل المساحة في الشمال الجزائري إذ نجد بعض المناطق غير مغطاة مثل بوسعادة غرب قسنطينة و بسكرة, هذه الوضعية تستطيع أن تحدث كوارث.

لهذا السبب أنشأنا دراسة مقارنة لإنشاء محطة رادار جديدة. الدراسة التمهيدية تقترح موقعين إضافيين لحل هذه المشكلة, هما الشريعة (E 36° 25' 32"-002° 52' 36'') وأكفادو (E 36° 04' 36'' N-004° 37' 15'').

إذ أن هذه الدراسة تثبت أن موقع الشريعة هو الأنسب لتغطية هذا الثقب.

الكلمات الرئيسية : تغطية الرادار, الفضاء الجوي الجزائري .

## 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 au nord Algérien. En effet, la région (Boussaâda, ouest Constantine, 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 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 trou.

Mots clés : CNS/ATM, Couverture radar, Espace aérien Algérie.

## ABSTRACT

Actually, the Implantation of radars Algiers, Oran, Annaba, El Oued, and El Bayadh, does not cover the totality of space in the Algerian north. In fact, the region (Boussaâda, ouest of Constantine, 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 solve up this problem. CHREA ( $36^{\circ} 25' 32''\text{N}-002^{\circ} 52' 36''\text{E}$ ) and AKFADOU ( $36^{\circ} 04' 36''\text{N}-004^{\circ} 37' 15''\text{E}$ ). Our simulation shows that the location of CHREA is more adequate to seal the puncturing.

Keywords: CNS/ATM, Coverage radar, Airspace Algeria.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, M<sup>r</sup> Said BERGHEUL, maître de conférence de université de SAAD DAHLEB de Blida et à mon co-promoteur, M<sup>r</sup> Amar ZABOT chargé de cours au département d'aéronautique pour leurs disponibilité et ses conseils avisés. Je souhaite également le remercier pour m'avoir laissé une grande liberté dans mon travail tout en me faisant bénéficier de ses connaissances dans le domaine de navigation aérienne.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans la précieuse aide de Mr : M. DROUCHE, dont l'expérience m'a beaucoup apporté.

J'adresse également mes sincères remerciements :

A Monsieur T. REZOUG, Maître de conférence au département d'aéronautique de l'Université de Blida, pour avoir accepté d'être président du jury.

A Monsieur Y. SMARA, Professeur à université de sciences et de technologie HAOUARI BOUMEDIENE, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à ce jury.

A Monsieur M. LAGHA, Maître de conférence au département d'aéronautique de l'Université de Blida, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à ce jury.

A tous ceux qui ont contribué d'une manière directe ou indirecte, de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.

Abdelkader BOUDANI

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure1.1. Phases du contrôle aérien.....	17
Figure1.2. Les voies aériennes.....	20
Figure1.3. La structure CTA et CTR.....	20
Figure 1.4. Organisation de l'espace Aérien .....	21
Figure 1.5. Niveaux de Croisières RVSM .....	23
Figure 1.6. Représentation des limites de l'espace aérien algérien.....	25
Figure1.7. Sectorisation actuelle.....	27
Figure 1.8. Représentation des zones de contrôle.....	28
Figure 1.9. Les Espaces Restreints en Algérie.....	29
Figure 1.10. Représentation des routes aériennes en Algérie .....	31
Figure 1.11. Couverture VHF actuelle .....	33
Figure 1.12. Couverture des Stations VOR.....	34
Figure 1.13. L'emplacement des Aides de navigation en Algérie.....	35
Figure.1.14. Couverture Radar actuelle en Algérie.....	36
Figure 1.15. Système TRAFCA.....	38
Figure 1.16. L'organigramme de trafic d'aérodrome Algérien.....	38
Figure 1.17. L'organigramme de trafic géré par CCR d'Alger.....	39
Figure 2.1. Différents utilisations du concept CNS-ATM.....	43
Figure 2.2. Représentation des systèmes de navigation par satellite (GNSS).....	51
Figure 2.3. Représente le système ADS-B.....	57
Figure 2.4. Représente une prévision globale entre (1994-2007).....	60
Figure 2.5. Représente une prévision régionale entre (1994-2007).....	61
Figure 2.6. Regroupe les deux prévisions globale et régionale entre (1992-2015).....	62
Figure 3.1. Représentation de deux champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ ainsi que la direction de propagation $\vec{z}$ .....	65

Figure 3.2. La relation entre le champ électrique et le champ magnétique.....	67
Figure 3.3. La représentation d'une onde plane.....	69
Figure 3.4. Représentation d'une onde guidée par deux plans conducteurs.....	73
Figure 3.5. Représentation d'une onde guidée.....	74
Figure 3.6. Représentation de deux chemins émission réception du radar.....	76
Figure 3.7. les classifications du système radar.....	77
Figure 3.8. Représentation des caractéristiques des signaux émis.....	78
Figure 3.9. Représentation de radar à onde continue.....	79
Figure 3.10. Représentation de la modulation FM et mesure de distance.....	79
Figure 3.11. Représentation de système radar bistatique.....	80
Figure 3.12. Représentation des Signaux émis et reçus du radar.....	81
Figure 3.13. Représentation de l'azimut et l'angle de site $\beta$ de la cible .....	83
Figure 3.14. Le calcul de la distance R en fonction de l'angle de site $\beta$ .....	84
Figure 3.15. Représentation de la résolution en distance.....	85
Figure 3.16. Représentation de la résolution angulaire .....	86
Figure 3.17. Représente la cellule de résolution.....	87
Figure 3.18. Représentation de la puissance d'incidente pour les types d'antennes différents.....	89
Figure 3.19. Atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence.....	93
Figure 3.20. Représentation de la composition d'un radar de surveillance.....	95
Figure.3.21. Représente le cône mort.....	96
Figure 3.22. Le diagramme d'antenne en cosécante carrée.....	96
Figure 3.23. Représente la couverture en site en espace libre.....	98
Figure 3.24. Représente la Couverture en présence du sol.....	98
Figure 4.1. Couverture des cinq sites radars.....	102
Figure 4.2. Les stations radars reliées au CCR d'Alger.....	103
Figure 4.3. Représentation du centre de contrôle régional (CCR).....	104
Figure 4.4. Composition de la station radar d'Alger.....	105
Figure 4.5. Flux d'information dans la station d'Alger.....	106
Figure 4.6. Acquisition de la grille des altitudes sous Radio mobile pour le nord Algérien.....	111
Figure 4.7. Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio mobile.....	112

Figure 4.8. Positionnement des stations radars sous l'environnement	
Radio mobile.....	112
Figure 4.9. L'élaboration des couvertures radars.....	113
Figure 4.10. Élaboration des couvertures radars d'Alger, d'Oran et d'Annaba pour FL100.....	114
Figure 4.11. Représentation de la couverture radar à FL100 pour le site AKFADOU.....	115
Figure 4.12. La couverture radar au niveau de vol FL100 pour le site CHREA..	115
Figure 4.13. Représente la couverture radar à FL100 pour le site proposé à CHREA.....	116
Figure 4.14. Précision des données topographiques collectées.....	117
Figure 4.15. Base de données topographique globale de l'Algérie.....	118
Figure 4.16. L'algorithme de simulation de la couverture radar.....	119
Figure 4.17. Processus de traçage de la couverture radar.....	120
Figure 4.18. L'effet du relief sur la couverture idéale du radar pour h=800m.....	121
Figure 4.19. L'effet du relief sur la couverture idéale du radar pour h=1200m...	122
Figure 4.20. Sélection des informations à afficher.....	123
Figure 4.21. Les informations à introduire pour implanter une nouvelle station radar.....	123
Figure 4.22. La couverture radar pour cinq stations existantes à la FIR Alger...	124
Figure 4.23. La couverture radar en tenant compte de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 100.....	125
Figure 4.24. La couverture radar en tenant compte de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 200.....	125
Figure 4.25. La couverture radar en tenant compte de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 300.....	126
Figure 4.26. La position de trou de couverture région Boussaâda.....	127
Figure 4.27. La couverture radar (Station d'AKFADOU).....	128
Figure 4.28. Couverture radar (Station de CHREA).....	128
Figure 4. 29. La couverture radar proposée.....	129
Tableau 1.1. Classification des secteurs en Algérie.....	26
Tableau 1.2. Les centres de contrôle d'approche.....	27
Tableau 1.3. L'emplacement des Radar en Algérie.....	36

Tableau 2.1. Représente une variation du trafic régulier régional et mondial entre (1994-2007).....	61
Tableau 3.1. Regroupe le coefficient d'atténuation atmosphérique.....	92
Tableau.3.2. les bandes et leur atténuation due à la pluie.....	93
Tableau 4. 1. Les stations radars actuelles et leurs sites d'implantations.....	101
Tableau 4.2. Caractéristique d'un radar type de surveillance primaire en Algérie.....	109
Tableau 4.3. Élévation par rapport au niveau de la mer des stations radars algériennes.....	110

## TABLES DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLES DES MATIERES LISTE DES ILLUSTRATION, FIGURES ET TABLEAUX

INTRODUCTION.....	13
1. L'ESPACE AERIEN ALGÉRIEN.....	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.....	22
1.3. Situation actuelle de l'espace aérien Algérie.....	25
1.3.1. Les routes aériennes.....	30
1.3.2. Mise en Œuvre du R.V.S.M, R.N.P et R.N.A.V en Algérie.....	32
1.4. Moyens de Communication, Navigation, Surveillance en Algérie.....	32
1.4.1. Communication.....	32
1.4.2. Navigation .....	34
1.4.3. Surveillance .....	35
1.5. Analyse de trafic aérien en Algérie.....	38
1.5.1. Introduction.....	38
1.5.2. Evolution du trafic aéroports (1998-2007) .....	39
1.5.3. Evolution du trafic de route de 1994 à 2007 .....	40
1.5.4. Evolution du trafic par Secteur de 2002 à 2007.....	40

2. ÉTUDES DE CONCEPT CNS-ATM.....	41
2.1. Introduction aux systèmes CNS-ATM.....	41
2.1.1. Le comité FANS.....	41
2.1.2. La dixième Conférence de navigation aérienne.....	42
2.2. Le système CNS-ATM.....	43
2.2.1. Définition .....	43
2.2.2. Systèmes de communication .....	43
2.4. Systèmes de navigation.....	49
2.4.1. L'objectif.....	49
2.4.2. Qualités de navigation requise (RNP).....	50
2.4.3. Systèmes de navigation par satellite (GNSS).....	50
2.4.4. Renforcements du GNSS.....	52
2.4.5. Avionique.....	54
2.5. Systèmes de surveillance actuels.....	54
2.5.1. Comptes rendus de position.....	54
2.5.2. Radar primaire de surveillance (PSR).....	55
2.5.3. Radar secondaire de surveillance (SSR).....	55
2.5.4. Surveillance dépendante automatique (ADS).....	56
2.5.6. Besoins ATM en matière de surveillance.....	57
2.5.7. Performances de surveillance requises (RSP).....	58
2.5.8. Tendances future de système de surveillance.....	58
2.5.9. Questions générales relatives à la transition.....	59
2.6. Aspects économiques des systèmes CNS-ATM.....	59
2.6.1. Introduction.....	59
2.6.4. Prévisions du trafic et autres prévisions à moyen et à long terme.....	60
2.6.5. Prévisions économiques du trafic de passagers.....	60
2.7. Les avantages des nouveaux systèmes.....	62
2.7.1. Les avantages pour les compagnies aériennes.....	62
2.7.2. Avantage pour les états qui fournissent l'infrastructure de navigation aérienne .....	63
2.7.3. Aviation générale.....	63

3. ÉTUDE DE PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES ET RADAR.....	64
3.1. Introduction.....	64
3.2. Propagation en espace libre .....	64
3.2.1. Définition.....	64
3.2.2. Conditions de passage.....	67
3.2.3. Équations de propagation.....	68
3.2.4. Ondes planes.....	68
3.2.5. Grandeurs caractéristiques d'un champ électromagnétique .....	71
3.3. Onde guidée par deux plans conducteurs.....	73
3.4. Onde guidée.....	73
3.4.1. Conditions de propagation d'une onde guidée.....	73
3.5. Étude des ondes radars.....	75
3.5.1. Principes généraux.....	75
3.5.2. Principe de fonctionnement d'un radar à impulsions.....	80
3.6. Équation du radar.....	88
3.6.1. Établissement de l'équation du radar en espace libre.....	88
3.6.2. Influence des pertes sur la portée.....	91
3.6.3. Influence des pertes atmosphériques.....	92
3.6.4. Discussion de l'équation du radar.....	94
3.7. Étude du radar de surveillance.....	95
3.7.1. Antenne à diagramme en cosécante carrée.....	96
3.7.2. Choix de la fréquence.....	97
3.7.3. La couverture du radar.....	97
3.8. Conclusion.....	99
4. CALCULS ET RESULTATS.....	100
4.1. Introduction.....	100
4.2. Objectifs de l'étude des couvertures radars.....	100
4.3. Les spécifications techniques et les données réelles .....	101
4.3.1. Le centre de contrôle régional CCR.....	103

4.3.2. La station radar d'Alger.....	104
4.3.3. Le flux d'information au niveau de la station .....	105
4.3.4. L'équation de radar.....	106
4.3.5. Les caractéristiques de radar.....	109
4.4. Élaboration des couvertures radars.....	110
4.4.1. Élaboration des couvertures radar via le logiciel Radio mobile.....	110
4.4.2. Élaboration des bases de données topographiques.....	116
4.6. Conception de l'application et des interfaces graphiques.....	122
4.7. Influence des niveaux de Vol sur la couverture radar.....	124
4.8 Couverture radar région BOUSSAADA.....	129
CONCLUSION.....	130

## APPENDICES

- A. Liste des abréviations.
- B. Liste des symboles et des abréviations.
- C-1. Evolution du Trafic Aéroport 1998-2007.
- C-2. Evolution du Trafic de Route 1994-2007.
- C-3. L'évolution de trafic par secteur entre 2002-2007.
- D. Les indicatifs des Aéroports d'Algérie.

## REFERENCES

## INTRODUCTION

L'Algérie couvre une superficie de 2.37 M km<sup>2</sup>. Elle occupe une position charnière entre l'Europe et l'Afrique subsaharienne. En moyenne, 280.000 avions fréquentent annuellement son espace aérien. La nature, l'étendue géographique, les conditions climatiques, le volume et la complexité du trafic aérien mettent en évidence deux sous-ensembles Nord et Sud. [1]

**La partie nord**, au climat méditerranéen, concentre plus de 60% du trafic aérien. La circulation aérienne y est considérée comme relativement dense et complexe, du fait que les principaux aéroports sont situés dans cette sous région.

Dans cette partie, les moyens de communications, de navigation et de surveillance sont, en général, en conformité avec le plan régional de l'OACI. Toutefois, des insuffisances subsistent notamment dans la fonction « télécommunications », et ce, malgré les efforts remarquables déployés par l'état afin de l'améliorer.

Grâce aux plans de développement initiés par le ministère de tutelle, cette partie disposera, dans un moyen terme, d'une couverture radar complète avec automatisation du traitement des données. Elle sera donc, dans un environnement technique et opérationnel comparable à celui de l'Europe et de nos voisins tunisien et marocain.

**La partie sud**, est caractérisée par son immensité géographique est par son inhospitalité. Elle est caractérisée par une densité de trafic relativement faible, mais néanmoins par l'existence de flux de trafic nord-sud en survol très importants. Dans le domaine de la télécommunication et radionavigation, les moyens mis en œuvre dépassent, dans bien des cas, les niveaux requis par le plan régional, et ce, 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. Cet aspect constitue un frein à la réalisation d'une couverture VHF complète et performante et par suite à l'extension du service de contrôle à tout l'espace aérien national ; ce qui demeure l'objectif ultime. De plus, même si certaines liaisons sont réalisées par voie satellitaire, des problèmes demeurent.

Notre travail est réparti entre le premier chapitre qui traite de, l'étude de l'espace aérien algérien avec une présentation générale de tous les moyens de communication, navigation et surveillance. Dans le deuxième chapitre, on a évoqué le concept CNS-ATM et ses nombreux avantages sur la navigation aérienne. La propagation des ondes électromagnétiques et RADAR a été traitée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été consacré à l'élaboration de programmes de calculs et la simulation du meilleur site pouvant compléter la surveillance radar du Nord Algérien. On termine notre étude par une conclusion générale.

## **CHAPITRE 1**

### **L'ESPACE AERIEN ALGÉRIEN**

#### 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, aux différentes échelles géographiques tel 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) met en place des services de circulation aérienne qui dépendent des différentes phases de vol et selon ces derniers interviennent les services de la circulation aérienne.

##### 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

Le control est un service assuré dont le but est de :

- Prévenir les abordages entre les aéronefs ;
- Régler et accélérer la circulation aérienne ;
- Veiller à éviter les collisions entre aéronefs qui évoluent au sol et les obstacles. [2].

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 sure, 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 contrôlés à l'arrivée et au 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 régulariser la circulation aérienne.

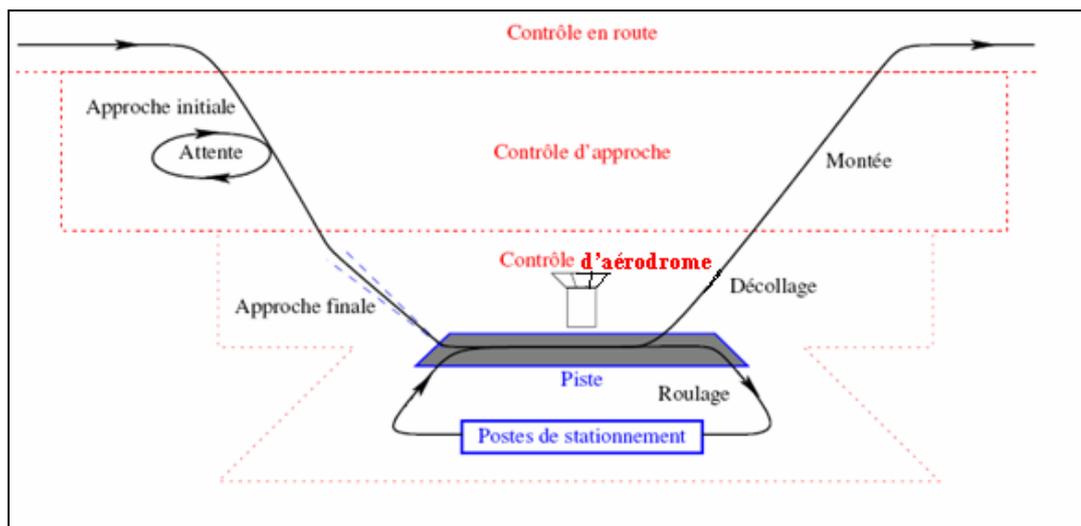


Figure1.1 : Phases du contrôle aérien.

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 [2.3], l'état des aérodromes et des installations radioélectriques, sans oublier l'information sur le trafic aérien qui pourrait être considérée en tant que situation conflictuelle. L'information de vol peut aller jusqu'à la transition de 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. Il est fourni par tous les organismes de la circulation aérienne (organismes de contrôle ou d'information) à tous les aéronefs qui se déclarent ou qui se trouvent en situation d'urgence [3].

### 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, 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. [4]

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. Dans cette espace on 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).

- Partition de l'espace aérien inférieur

L'espace aérien inférieur est déterminé suivant la nature des services de circulation aérienne qui doivent être établis, et sera effectué de la manière suivante :

**Région d'information de vol (FIR Flight Information Région) :** 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 (18.5Km). 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).

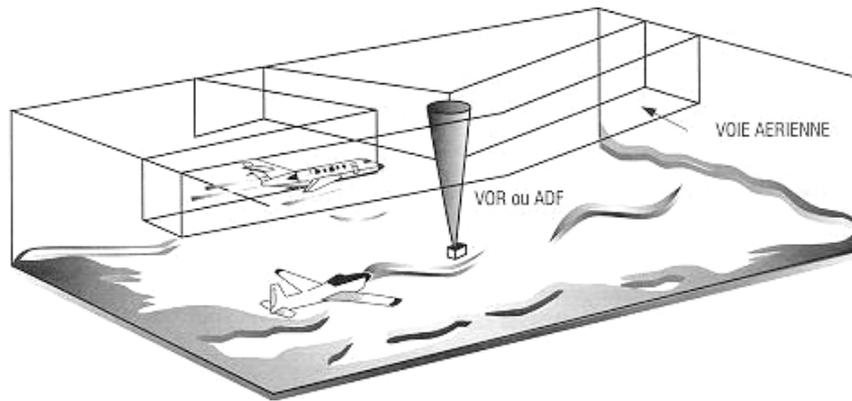


Figure1.2 : Les voies aériennes.

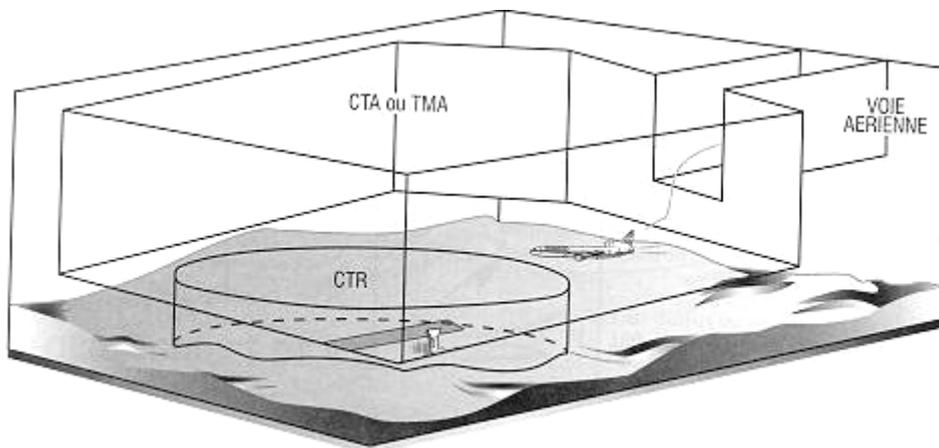


Figure1.3 : La structure CTA et CTR.

b) 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 se divise 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 jusqu'à au niveau de vol FL195.

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

Elles ont en été créés 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. [5]. Ce schéma suivant résume les différents types d'espaces :

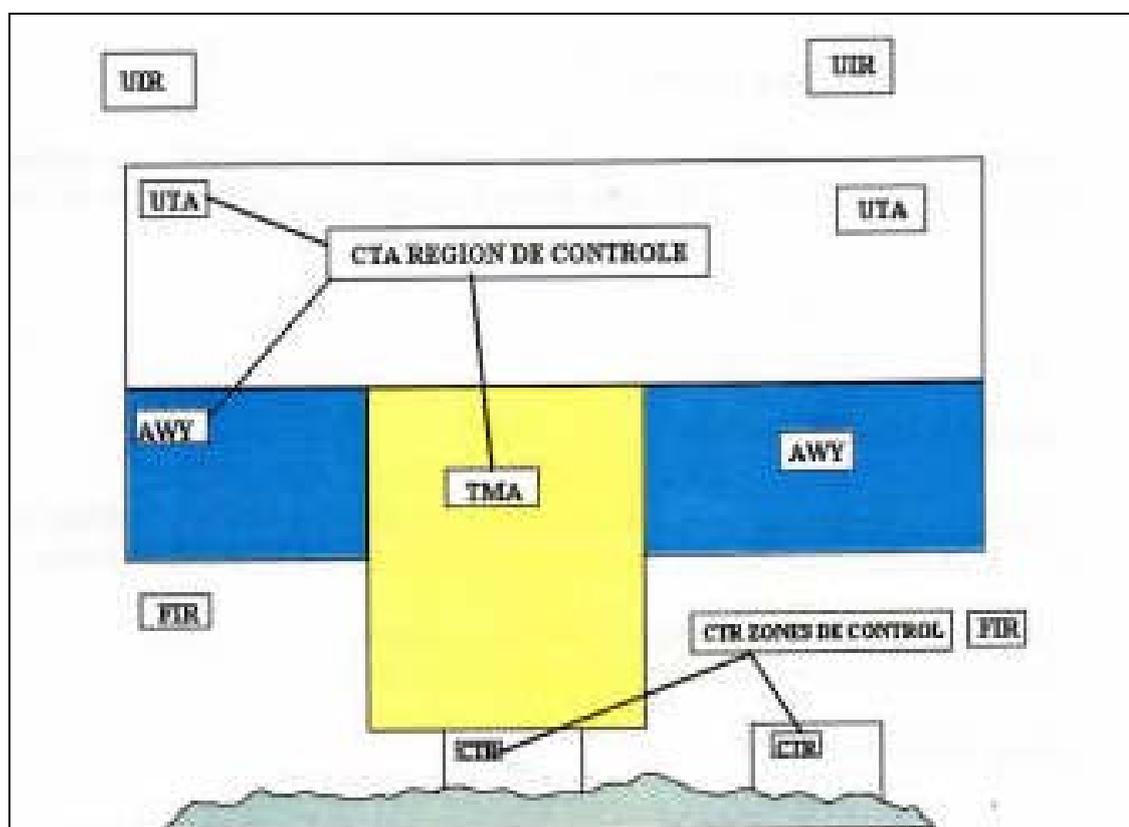


Figure 1.4 : Organisation de l'espace Aérien [5].

### 1.2.3 Classification des espaces aériens

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 effectuer des vols en régime VFR. Chaque classe d'espace se voit attribuer une lettre de A à G. A étant la plus restrictive, 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, notamment destinée à établir les règles de compatibilité IFR/VFR.

### 1.2.4 Optimisation de l'espace aérien

Pour une bonne exploitation de l'espace aérien on fait recours à différentes techniques (système RVSM, RNP...).afin d'obtenir un espace aérien plus optimisé.

#### a) RVSM (Minimum Réduit de Séparation verticale)

Le but de la mise en œuvre de le RVSM est de réduire la séparation verticale de 2000 ft à 1000 ft au-dessus du niveau de vol 290, cela permet aux usagers d'avoir six niveaux de vol supplémentaires. Ces niveaux de croisière supplémentaires permettent d'augmenter la capacité de l'espace aérien, de réduire la consommation de carburant, d'amélioration de la flexibilité opérationnelle des organismes de contrôle de la circulation aérienne et d'assurer la 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 1000f, comme il est bien représenté dans la figure (1.5) [6].

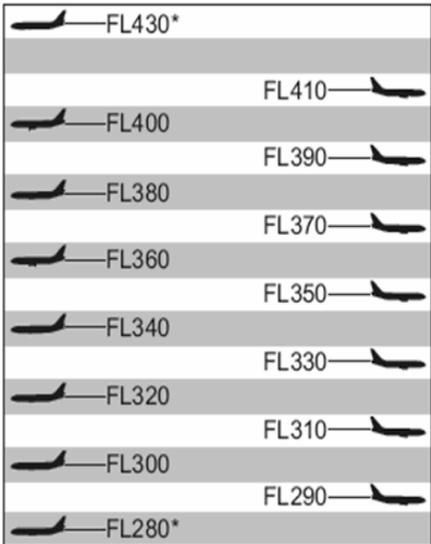
	<b>Le niveau de vol FL</b>	<b>La conversion en Km</b>
	410	12.4968
	390	11.8872
	370	11.2776
	350	10.668
	330	10.0594
	310	9.4488
	290	8.8392

Figure 1.5 : Niveaux de Croisières RVSM [6].

- 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 qui se situent 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 va changer de réglementation R.V.S.M 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).

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

La R.N.A.V est une méthode de navigation permettant le vol 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'avion dispose d'un 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. [6]

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

Etant donnée 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 concerne la précision de navigation qui doit être maintenue par un aéronef volant à l'intérieur d'un espace aérien ou sur une route particulière. 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 mots, il se surveille lui-même. Il s'agit d'un système R.N.A.V disposant d'un moyen de surveillance des performances et d'alerte embarqué. Idéalement, un espace aérien devrait 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 s'appliquer du décollage à l'atterrissage, mais le type de R.N.P exigé dans les différentes phases du vol peut varier, par exemple, le type R.N.P peut être très exigeant pour le décollage et l'atterrissage, mais moins exigeant pour la croisière. 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 dans cet espace. [5,6].

### 1.3 Situation actuelle de l'espace aérien Algérie

#### 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'Etablissement 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 .F.I.R Dakar et Niamey, voir figure (1.6).

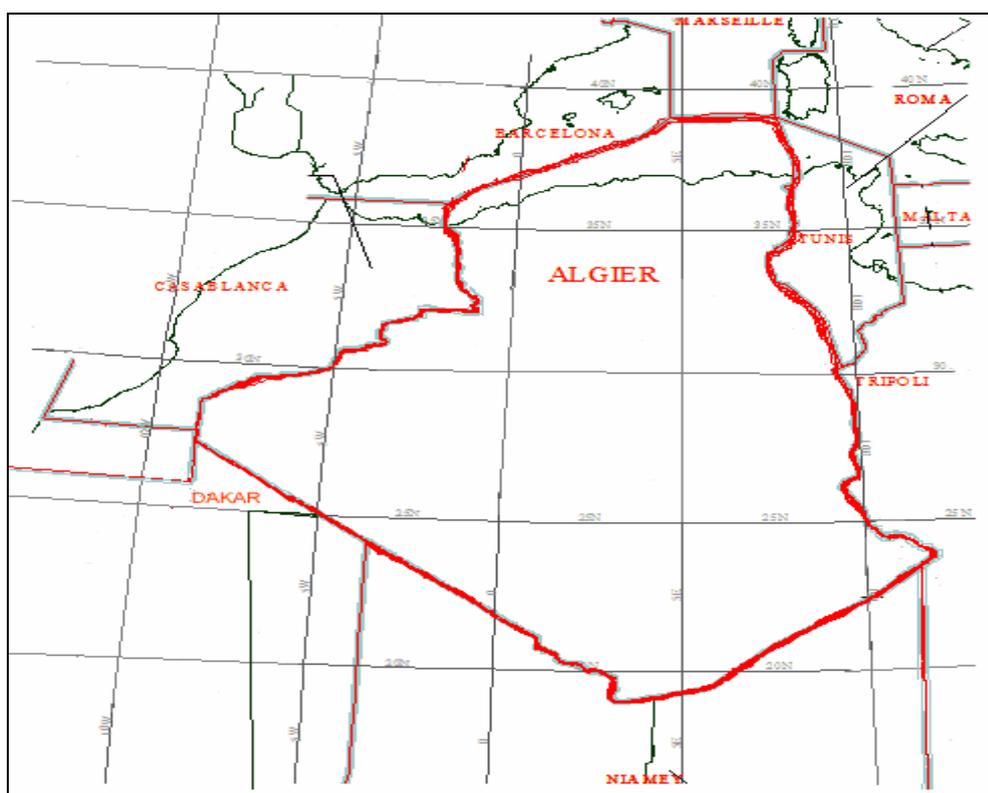


Figure 1.6 : Représentation des limites de l'espace aérien algérien. [7]

## 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 (1.1) et la figure (1.7) ci-dessous reprennent la délimitation des (07) secteurs existants actuellement en Algérie.

Tableau 1.1: Classification des secteurs en Algérie [7].

<b>N° secteur</b>	<b>Secteur</b>	<b>Classe</b>	<b>Limite Inférieure</b>	<b>Limite Supérieure</b>	<b>Service de contrôle</b>	<b>Fréquence Hz</b>
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

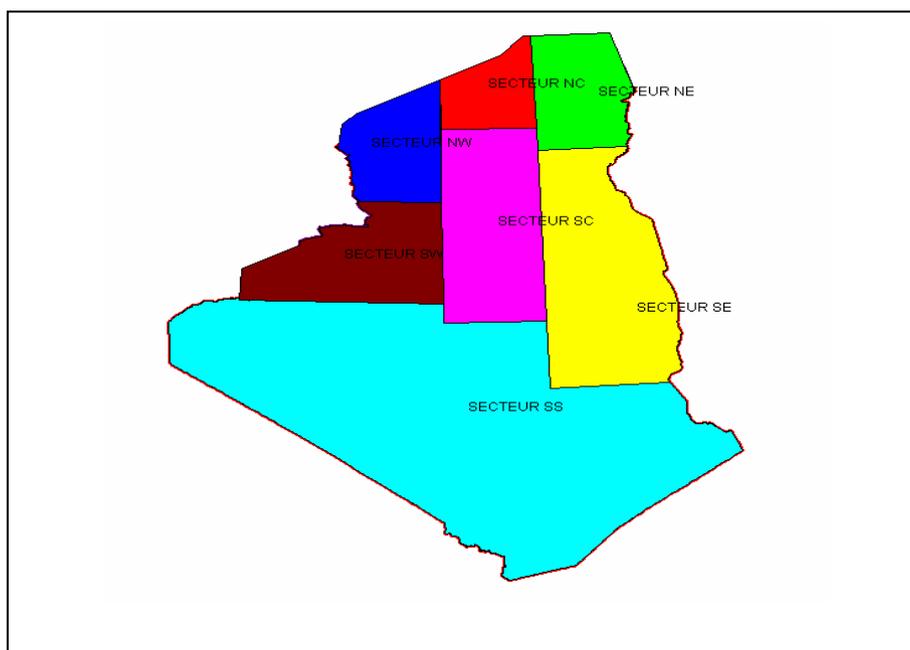


Figure1.7 : Sectorisation actuelle.

c) Les zones déléguées à l'approche

Pour mieux gérer les manœuvres des aéronefs auteurs 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 (1.2) et la figure (1.8).

Tableau 1.2 : Les centres de contrôle d'approche.

Désignation	Classe	Limite Inférieure	Limite supérieure
CTA Alger/Houari Boumediene	D	450m GND/MSL	FL105
CTA Annaba/EI 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

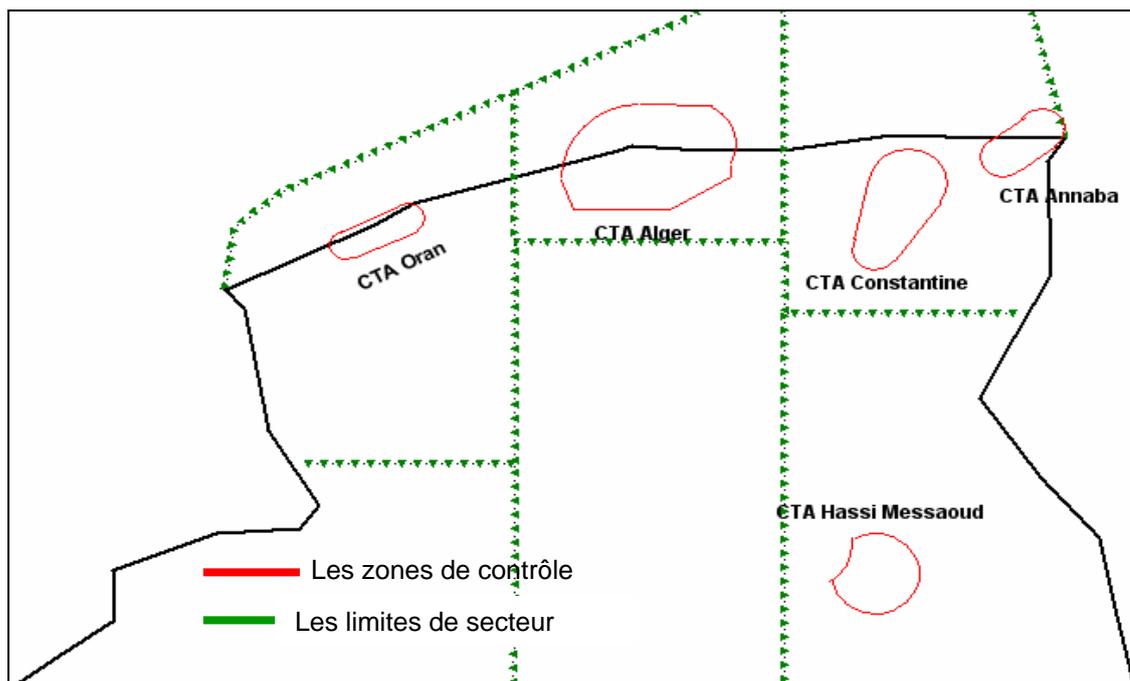


Figure 1.8 : Représentation des zones de contrôle.

#### 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 certain cas, il est souhaitable de l'éviter lorsqu'elle est active. Les zones dangereuses en espace supérieure ne sont pas gérées de la même façon qu'en espace inférieur.
- **Zones réglementées (R-regular)** : Il s'agit d'un 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.

- **Zones interdite (P-Prohibited) :** Il s'agit d'un 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 (1.9).

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 dommages qu'entraîne un accident d'avion risqueraient de prendre des proportions catastrophiques (centrale nucléaire) ou installations particulières indispensables pour garantir la sécurité d'un pays.

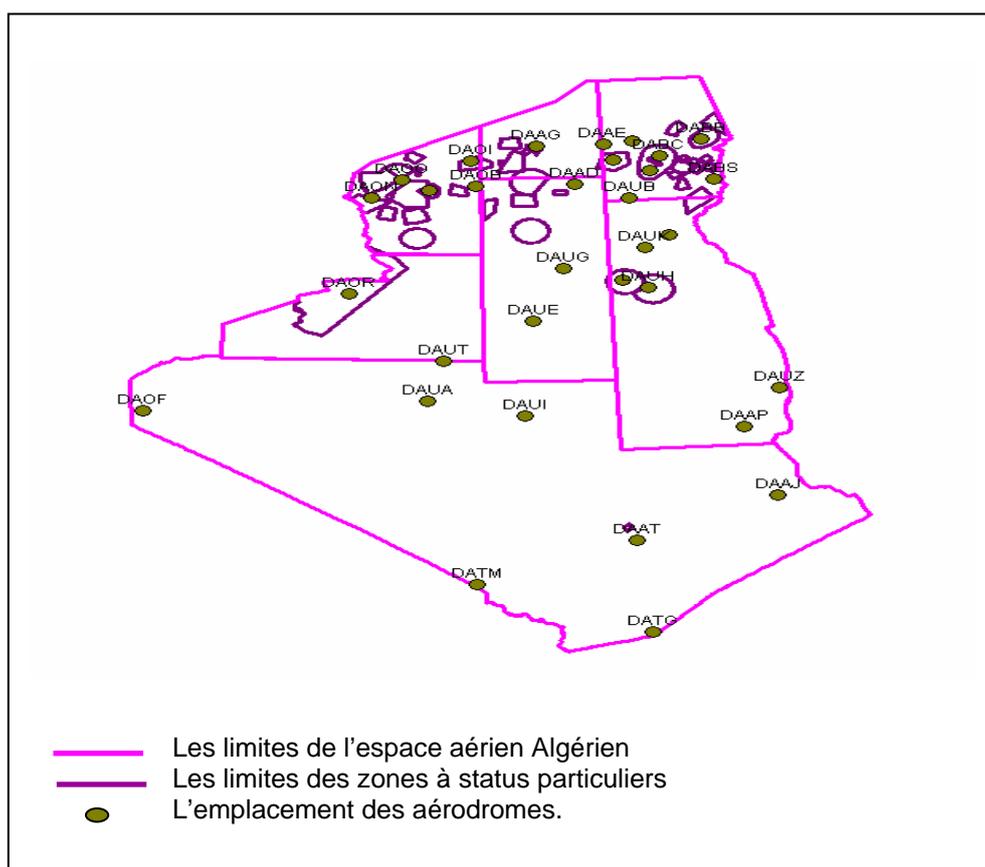


Figure 1.9 : Les Espaces Restreints en Algérie.

### 1.3.1 Les routes aériennes

Une route aérienne est un itinéraire réservé et prédéfini permettant de rallier un aéroport depuis un autre et pouvant comporter des étapes ou escales. La route aérienne emprunte des couloirs aériens, qui sont des zones réservées à la circulation des avions. Ces routes sont 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 de la route dépend du type d'avion et du type de vol programmé afin de choisir la route la plus courte et facile à traverser. 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 avions civils entre deux aéroports d'un même pays.

##### ▪ **Les routes A.T.S internationales**

Les routes A.T.S internationales sont des chemins utilisés par les avions 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 avions 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.

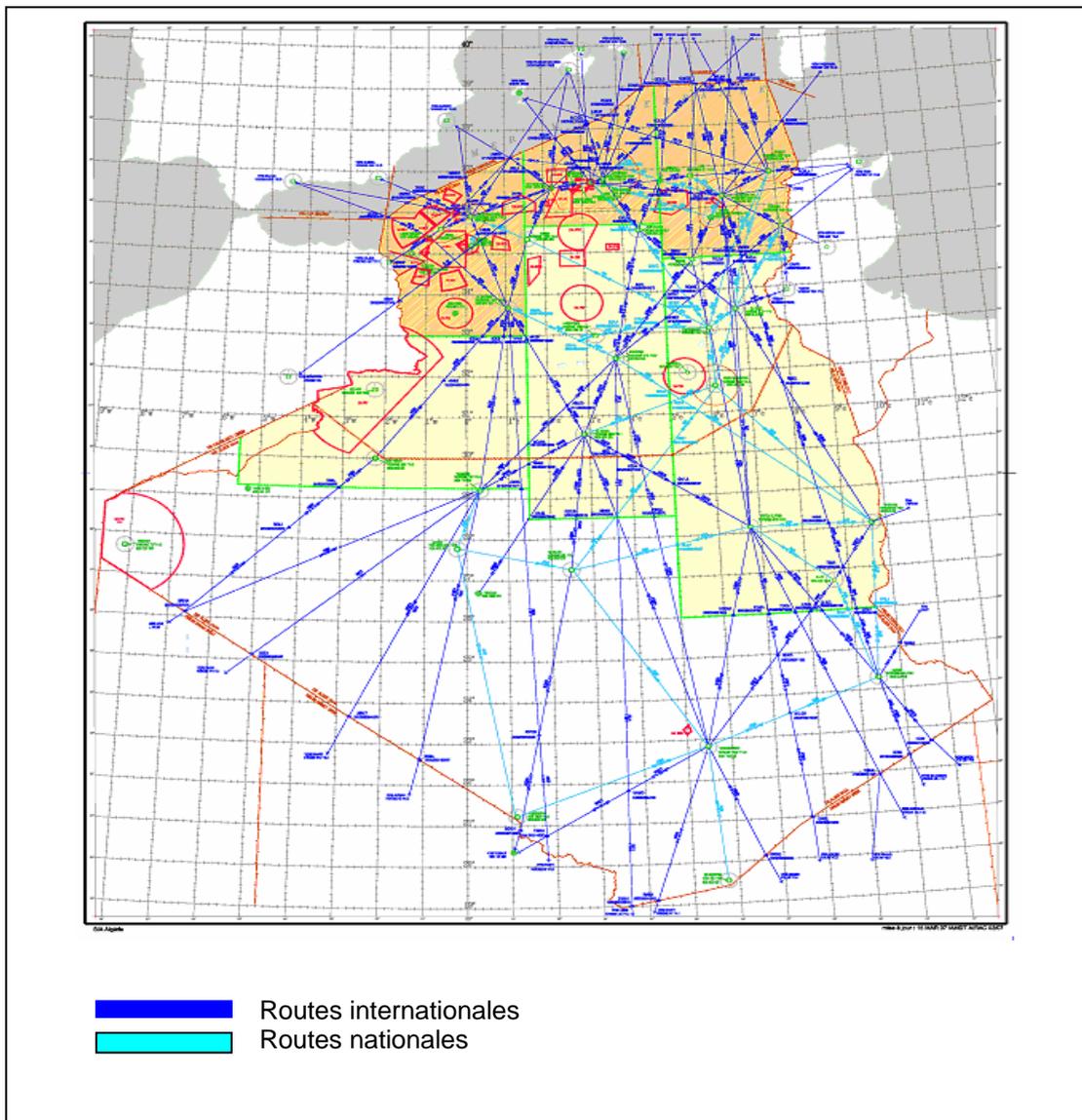


Figure 1.10 : Représentation des routes aériennes en Algérie [8].

### 1.3.2 Mise en Œuvre du R.V.S.M, R.N.P et R.N.A.V en Algérie

#### a) Mise en Œuvre du R.V.S.M

L'espace Algérien est devenu R.V.S.M depuis le 25 Octobre 2007. 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 FL410 inclus, désignés Minimum Réduit de Séparation Verticale (R.V.S.M) dans la F.I.R Alger.

#### 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 est appliquée en 2005.
- Mise en œuvre de la R.N.P 12,6 sur la partie Sud de la F.I.R est appliquée en 2005. [9]

#### 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, surtout sur la partie Sud qui est due au manque de disponibilité des moyens radios navigation dont l'implantation est rendue difficile par la nature semi-desertique des régions traversées. La navigation R.N.A.V se présente donc comme la meilleure solution pour améliorer et optimiser le réseau de routes.

### 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 (16) sites radio VHF réparties sur 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 (1.11).

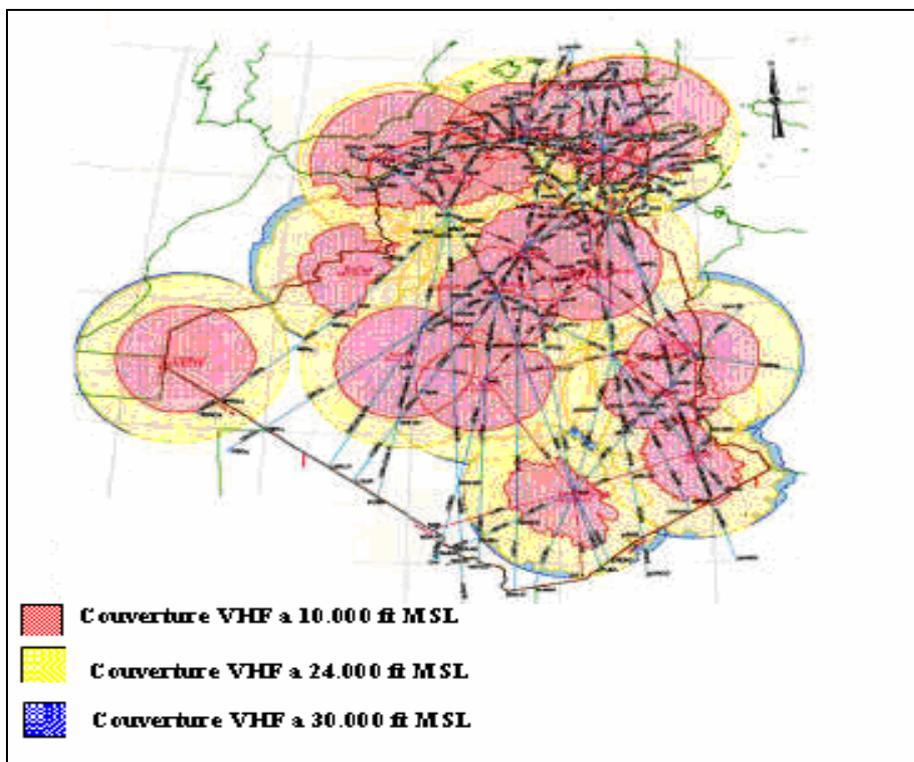


Figure 1.11 : Couverture VHF actuelle [10].

#### 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 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.

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

L'échange des messages tel que les NOTAMs, Plan de vols, 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, cette dernière est assurée par le BCT Alger située au siège de l'E.N.N.A

de Oued Samar. Les supports de télécommunication en Algérie sont assurés par le 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 Navigation

La navigation aérienne en FIR Alger repose sur 31 stations VOR/DME. La plupart des stations VOR/DME sont installées au niveau des aéroports sur le prolongement des axes de 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 (1.12 & 1.13).

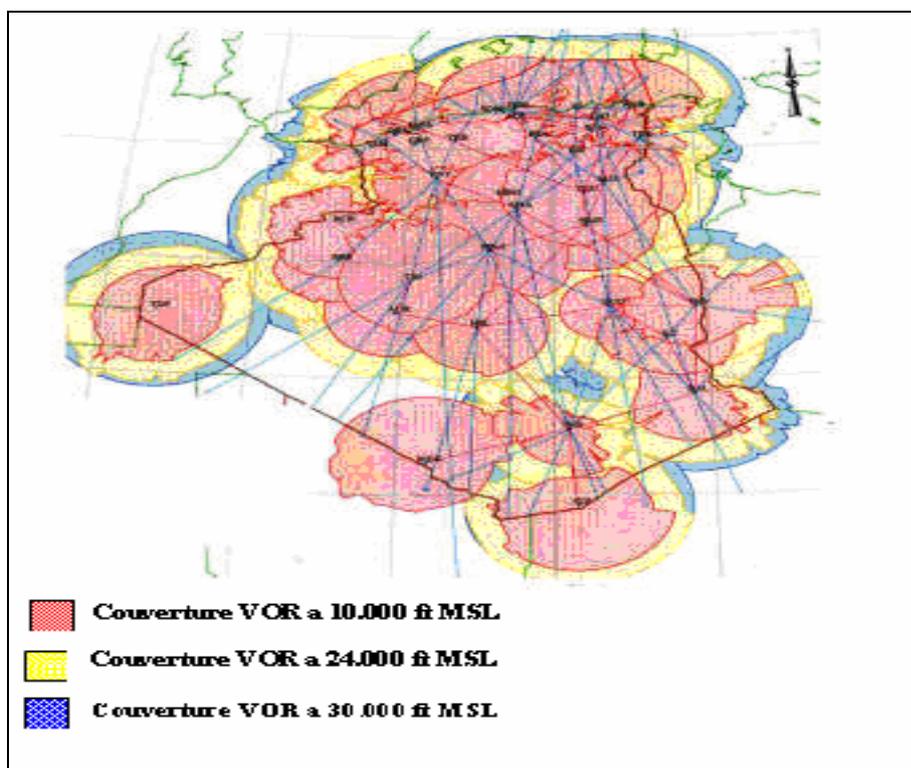


Figure 1.12 : Couverture des Stations VOR

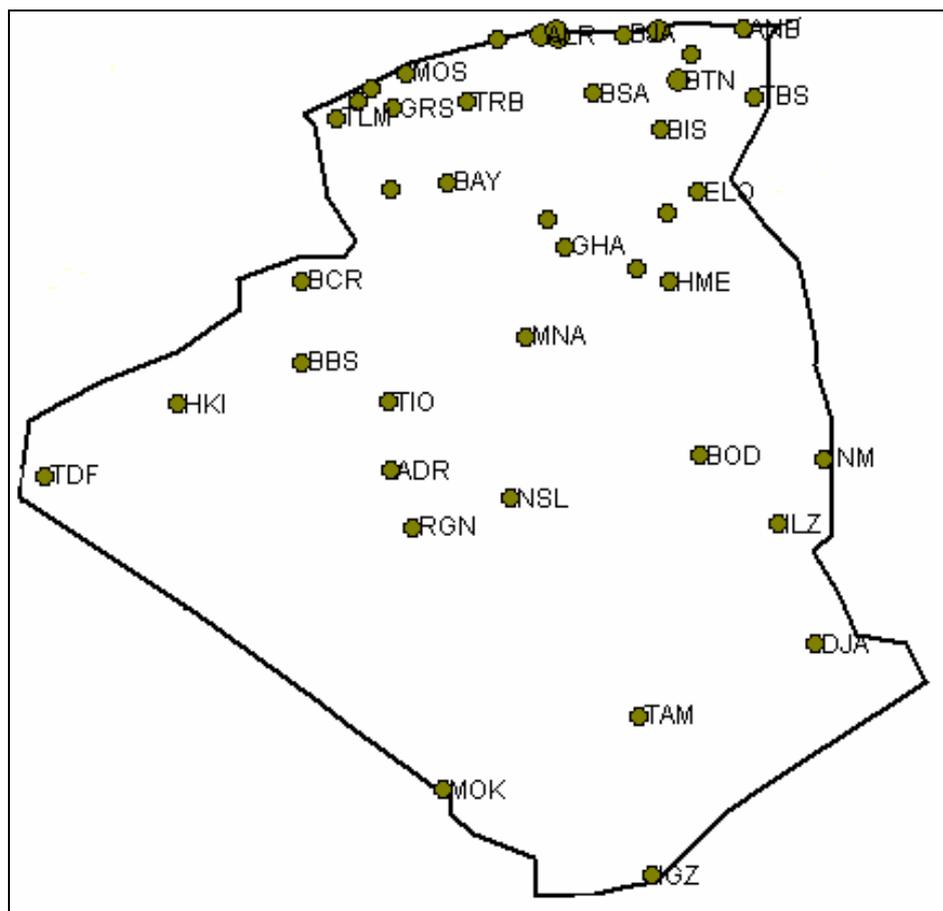


Figure 1.13 : L'emplacement des Aides de navigation en Algérie.

### 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 radar 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 un secondaire, voir le tableau (1.3) [11].

Tableau 1.3 : L'emplacement des Radar en Algérie.

Type	Station radar	Site	Date d'installation
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	Février 2001
SSR	Seraidi	Annaba	Décembre 2001
SSR	Murdjadjo	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 seul 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.

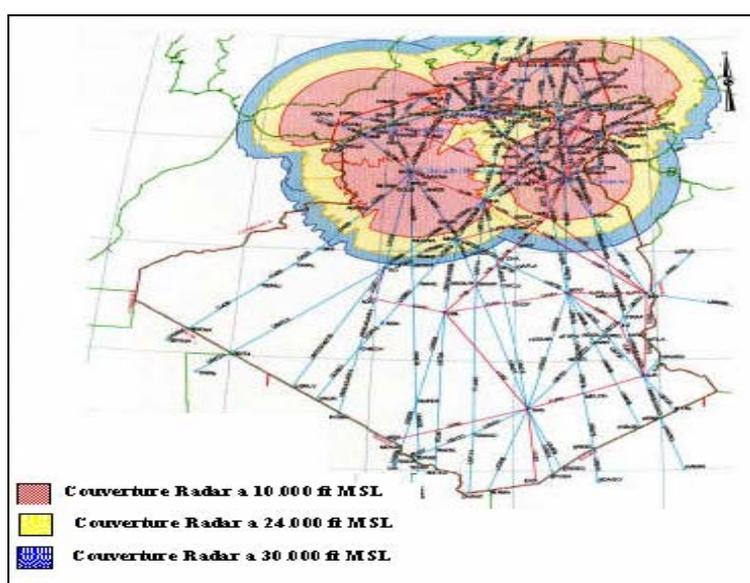


Figure.1.14 : Couverture Radar actuelle en Algérie.

### b) ADS/C (Automatic Dependent Surveillance)

La surveillance dépendante automatique ADS (Automatic Dependent Surveillance) est une technique qui permet de transmettre des paramètres comme la position et l'identification. Elle a été mise en oeuvre dans l'espace aérien algérien le 6 février 2008. 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, 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 oeuvre. Ils ont pour but d'aider le contrôleur aérien à remplir sa mission de contrôle. En Algérie, le système utilisé est appelé TRAFCA [10].

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 oeuvre d'un centre de qualification pour les besoins de perfectionnement du 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 radar secondaires.

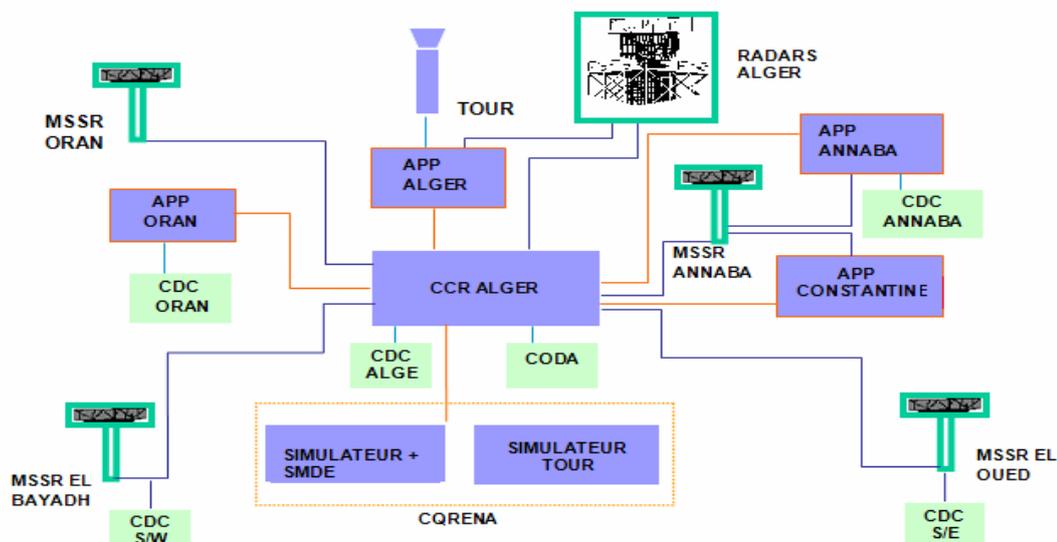


Figure 1.15 : Système TRAFCA.

## 1.5. Analyse de trafic aérien 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 et trafic international, et le trafic non commercial qui est lié à l'industrie pétrolière au Sud. La figure suivante (1.16) représente les différents trafics d'un type d'aéroport Algérien.

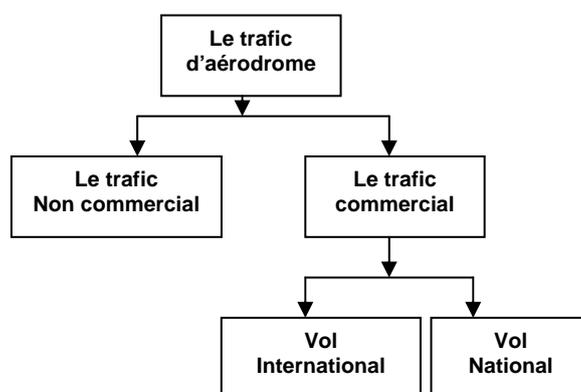


Figure 1.16 : L'organigramme de trafic d'aéroport Algérien.

Par contre, pour l'analyse du trafic géré par le CCR d'Alger, les statistiques seront basées sur trois types de trafic, survols avec Escale qui est divisé en deux sous types, nationaux et internationaux, Survols sans Escale et Vols Spéciaux. La figure (1.17) représente l'organigramme géré par le centre de contrôle régional d'Alger.

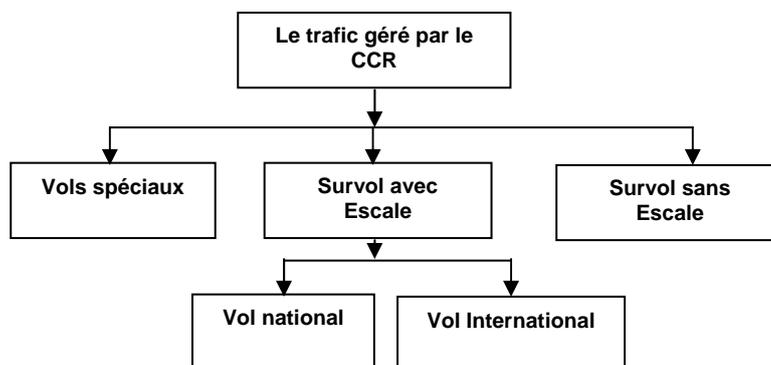


Figure 1.17 : L'organigramme de trafic géré par CCR d'Alger.

### 1.5.2 Evolution du trafic aérodomes (1998-2007) (Appendice C-1) [12]

Le tableau (1.4) représente l'évolution du trafic aérien d'aérodrome avec toutes ses phases, nous constatons entre 1998- et 2007 :

- Une croissance moyenne estimée à 3.53 % pour les mouvements commerciaux, avec une valeur maximum de 144960 Mouvement pour l'année 2002 ;
- Un fléchissement de -6.25% et -42.41% pour le trafic national dans les années 2002 et 2003.
- Une croissance moyenne estimée à 3.689% pour les mouvements non commerciaux.
- Une croissance stable pour le trafic international avec une valeur moyenne estimée à 8.65%.

### 1.5.3 Evolution du trafic de route de 1994 à 2007 (Appendice C-2)

#### **Le trafic national**

D'après le tableau (1.5), le trafic national de dix (10) dernières années a connu une phase plus au mois stable allant de 94 à 98, suivi d'une phase de croissance très rapide de 99 à 2001 où il a dépassé la barre de 616517 mouvements, pour arriver à une décroissance jusqu'à 32510 Mvts en 2002 à 2005, avec une croissance annuelle moyenne de trafic 6.3%.

#### **Le trafic international**

Le trafic international a connu une phase de croissance allant de 1995 – 2002 où il a dépassé la barre de 54562 mouvements. Malgré la chute de trafic en 2003 (38440 Mvts), avec une croissance allant moyenne de 7.9%.

#### **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 5.5%.

### 1.5.4 Evolution du trafic par Secteur de 2002 à 2007 (Appendice C-3)

L'analyse des données du trafic par secteur a fait ressortir un déséquilibre entre les secteurs, le secteur TMA Est qui est le plus chargé contrairement à l'ouest, le secteur Sud/Sud étant le plus vaste mais le plus chargé car il y a des pointes d'environ 45 aéronefs (de 00 h00 à 04h00) le secteur Sud/Est est plus chargé par rapport au secteur Sud Ouest, due au nombre important des plateformes pétrolière à Hassi Massoud. Cette différence entraîne un déséquilibre de la charge du travail des contrôleurs.

Sur les dernières années, malgré une chute importante du trafic 2004 et 2005, c'est le secteur Est qui a connu une hausse importante, due au trafic géré par les aéroports d'Est.

## **CHAPITRE 2**

### **ÉTUDES DE CONCEPT CNS-ATM**

#### 2.1 Introduction aux systèmes CNS-ATM

##### 2.1.1 Le comité FANS

Constatant la croissance régulière de l'aviation civile depuis 1983, informé des prévisions de croissance du trafic et conscient du développement de nouvelles technologies à l'horizon 2020. 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 si bien servi l'aviation civile internationale pendant des années. Voyant que les systèmes et les procédures employés par l'aviation civile avaient atteint leurs limites, le conseil prit une importante décision à un moment clé, celle de créer le comité spécial de 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 de développement de la navigation aérienne, pour une période de l'ordre de 25 ans.

Le comité FANS constata, qu'il serait nécessaire de mettre au point des systèmes nouveaux, pour s'affranchir des limites des systèmes classiques. Les futurs systèmes devraient pouvoir évoluer, de façon à répondre davantage aux besoins des usagers. 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. 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 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 [13].

En juillet 1989, donnant suite à la recommandation 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.

### 2.1.2 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, 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. Le concept FANS, connu aujourd'hui sous la désignation de systèmes de communication, navigation, surveillance et de gestion du trafic aérien (CNS-ATM), fait intervenir un ensemble complexe de technologies connexes qui reposent largement sur les satellites et les transmissions par liaison de données.

## 2.2 Le système CNS-ATM

### 2.2.1 Définition

C'est des systèmes de communication, navigation et de surveillance faisant appel aux technologies numériques et aux systèmes satellitaires, ainsi qu'à divers niveaux d'automatisation, appliquée aux besoins d'un dispositif de gestion du trafic aérien mondiale homogène, Figure (2.1).

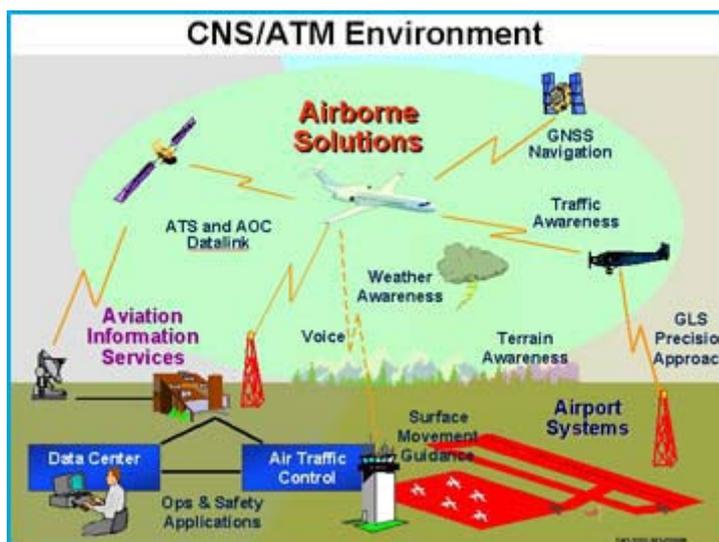


Figure 2.1 : Différents utilisations du concept CNS-ATM.

### 2.2.2 Systèmes de communication

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

#### a / Services de communication envisagés

Il y a essentiellement deux catégories de communications aéronautiques :

- Les communications liées à la sécurité exigent une haute intégrité et une réponse rapide ;

- ✓ Communications des services de la circulation aérienne (A.T.S.C) entre organes ATS et un aéronef dans le cadre du contrôle de la circulation aérienne, informations de vol, alertes, etc.
  - ✓ Communications du contrôle d'exploitation aéronautique (AOC) des exploitants d'aéronefs, qui concernent 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, portant sur des questions d'ordres administratifs 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 auront toujours priorité.

#### b / Principales caractéristiques des nouveaux systèmes de communication

Il y a un certain nombre de différences fondamentales entre les systèmes de communications aéronautiques classiques et les nouveaux systèmes de communications CNS-ATM. Voici quelques-unes des principales caractéristiques propres aux nouveaux systèmes :

- ✓ La plupart des communications de routine sont assurées par échange de 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.

Ces caractéristiques permettent une meilleure utilisation des canaux de communication et le partage des installations par de nombreux usagers.

### c/ Communication Air – Sol

La plupart des communications air - sol régulières de la phase en route se font par échange de données numériques. En revanche, dans les régions terminales encombrées, les communications vocales resteront probablement le moyen d'échange de prédiction [14]. Dans les situations d'urgence et les situations autres que de routine, elles restent le principal moyen de communication air-sol utilisé.

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

✓ **S.M.A.S** : Satellites de communication géostationnaires conçus expressément pour les communications mobiles, qui offrent une couverture étendue/quasi mondiale ainsi que des canaux de communications et des données de grande qualité. Le S.M.A.S convient particulièrement aux aéronefs qui volent dans les espaces aériens océaniques et les espaces aériens continentaux éloignés;

✓ **V.H.F** :(analogique) – les radios V.H.F analogiques existantes offrent une excellente fiabilité opérationnelle. Elles continueront d'être utilisées dans les communications vocales dans les régions terminales encombrées ainsi que pour les communications générales autres que de routines dans les zones de couverture correspondante. Mais à court ou à moyen terme, il pourrait y avoir saturation de la bande V.H.F 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 ;

✓ **H.F** (analogique) : Les radiocommunications par bande H.F permettent les échanges au 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 S.M.A.S dans les régions océaniques ou éloignées entraînera une atténuation de l'encombrement des canaux H.F et éventuellement, une diminution de l'emploi du bande H.F 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, l'HF demeurera le seul moyen de communication disponible pour les vols dans les régions polaires;

✓ **Liaison numérique V.H.F (VDL) mode 1** : C'est vers la fin des années 1970 que les exploitants d'aéronefs ont commencé à utiliser la radio V.H.F analogique pour échanger des données. Les radios V.H.F de bords existantes ont servi au transfert de données A.O.C et A.A.C 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 A.O.C et A.A.C- ainsi que, 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, mais 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 mode 1 est de 2400 bauds. Le mode 1 peut être considéré comme une étape vers le mode 2.

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

✓ **V.D.L 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 alors améliorée par la fourniture de quatre canaux radio distinctes 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 devrait autoriser des capacités de liaison de données en navigation en plus des fonctions de communication des données ;

✓ **Liaison de données SSR mode S** : La liaison de données mode S du SSR permet une capacité de surveillance et une liaison de données air-sol qui conviennent en particulier pour une messagerie de données limitées 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 pourrait utiliser la liaison de données HF pour les communications ATSC. Étant donné 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 serait possible quelque soit le moment et le lieu, de trouver la fréquence qui convient le mieux pour transmettre des paquets de données. La liaison de données HF pourrait alors compléter le SMAS dans les régions océaniques ou éloignées et constituer ainsi 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. Le service de communication qui assure l'interopérabilité des sous réseaux de 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. 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 la 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 son 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, tenant compte des niveaux actuels du trafic ;
- Prévenir les brouillages RF (RFI) dans les fréquences, les bandes et les services ainsi que chez les usagers des systèmes de radiocommunications aéronautiques.
- Autoriser la fourniture de service de communication par des prestataires commerciaux.

#### d/ 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 entres des entités telles que les centres météorologiques, les bureaux NOTAM, les bandes de données aéronautiques et les organes ATS, etc., pourront prendre alors 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 des états, par des groupes d'états ou par des fournisseurs commerciaux continuera d'offrir des services de communications 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 de réseaux ATN. Avec la mise en œuvre progressive de l'ATN, l'emploi du réseau du service fixe des télécommunications aéronautiques (RSFTA) diminuera. [15].

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 du système de navigation aérienne, surtout lorsqu'il s'agit d'harmoniser et de synchroniser des FIR voisines d'un point de vue communications. La façon de régler ce problème, consiste à abandonner la spécification des 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, etc.). Une fois les RCP spécifiées pour un scénario opérationnel, dans un système qui satisfait les critères établis, ce dernier, peut être considéré alors comme étant acceptable pour l'exploitation.

## 2.4 Systèmes de navigation

### 2.4.1 L'objectif

L'élément navigation du système CNS-ATM a pour objectif 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 aéronautique par satellite.

### 2.4.2 Qualités de navigation requise (RNP)

Les aéronefs modernes sont de plus en plus équipés pour la R.N.A.V, 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 la navigation à l'intérieur d'un espace aérien défini, compte tenu de la combinaison des erreurs de capteur de navigation, du récepteur embarqué, de l'affichage et de l'erreur technique de vol [13-15].

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 la précision, de l'intégrité de l'aéronef, de la continuité et de la disponibilité de la 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) [16]

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 d'intégrité du système. Il est 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 pour appuyer le développement évolutif du GNSS. En 1994, le conseil de l'OACI a accepté la proposition des États-Unis concernant le GPS et, en 1996, il a accepté l'offre de la Fédération de Russie concernant le GLONASS, voir figure (2.2).

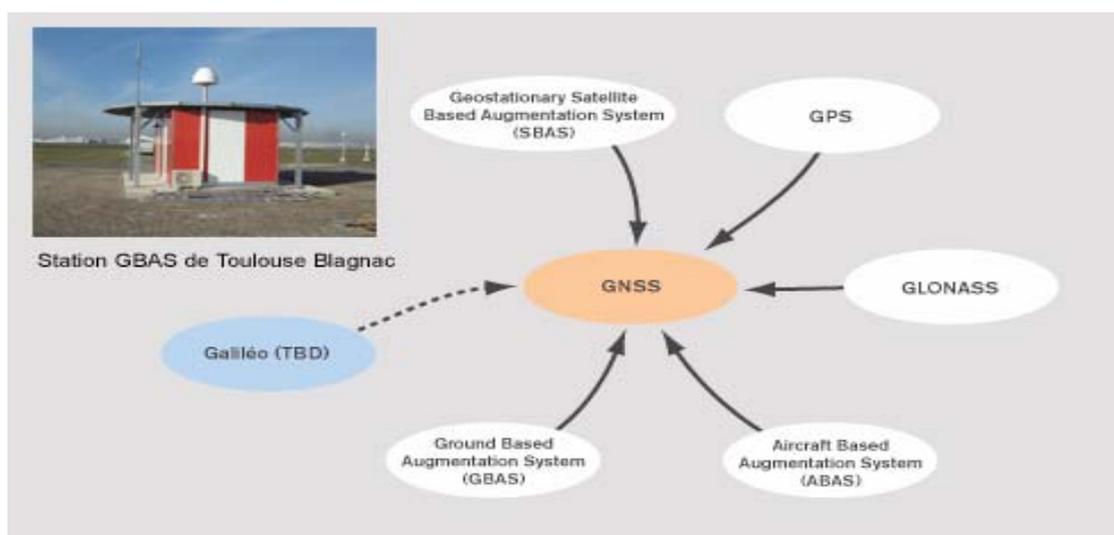


Figure 2.2 : Représentation des systèmes de navigation par satellite (GNSS).

Le segment spatial GPS est composé de 24 satellites (constellation minimale) sur six plans d'orbites. Les satellites évoluent sur des orbites quasi circulaires à 20180 km (10 900 NM), inclinées à 55° par rapport à l'équateur, chaque satellite effectue une révolution en 11 h56.

Le segment 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 11h 15 minutes. Huit (08) 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 besoins de divers degrés de renforcement. Les renforcements 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 (RAIM) et peut être utilisé, que lorsqu'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. Si ces positions ne concordent pas, on peut en déduire qu'un ou plusieurs des satellites fournissent des renseignements inexacts.

D'autres renforcements sur aéronefs peuvent aussi être 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 sont insuffisants. Les techniques de renforcement particulièrement utilisées pour améliorer la disponibilité de la fonction navigation comprennent : l'aide altimétrique, des sources d'indication de l'heure plus précise 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). Ces signaux fournissent des rectifications pour augmenter la précision de la position locale, ainsi que des renseignements sur l'intégrité des satellites. Cette capacité exige des liaisons de données entre station sol et aéronef.

- Renforcement par 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 qu'on appelle le système de renforcement satellitaire (SBAS).

La fourniture d'un renforcement satellitaire par des satellites géostationnaires présente certaines limites qui font qu'on ne peut pas avoir un soutien pour toutes les phases de vol, notamment pour les approches de précisions et les atterrissages de plus hautes catégories, étant donné que ces satellites évoluent sur une orbite équatoriale, leurs signaux ne seraient 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 devront peut-être être envisagés pour combler ces failles.

### 2.4.5 Avionique

Les récepteurs G.P.S ou GLONASS simples qui n'ont pas de capacité RAIM (ou d'autres formes de contrôle d'intégrité) ne peuvent pas généralement, répondre aux besoins dans toutes les phases de vol. Des systèmes à capteurs multiples, utilisant le GNSS. 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 pourraient être obtenus grâce au seul emploi du GPS ou du GLONASS.

### 2.5 Systèmes de surveillance actuels

Les systèmes de surveillance utilisés actuellement peuvent être divisés en deux types principaux : les systèmes de surveillance dépendants et 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 de position vocaux actuels sont 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. Par contre, 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 régional 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 aura pour effet de réduire l'emploi du PSR dans la gestion du trafic en route, quoiqu'il continuera à être utilisé dans les zones terminales. 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 mono pulse (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, une technique qui utilise une adresse unique (l'adresse 24 bits) pour chaque aéronef 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 [17]. Il fournit également une liaison de données bidirectionnelle entre les stations mode S au sol et les transpondeurs mode S. Le SSR 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 utiliserait 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 sera 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.

#### 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) [18]. Il est également envisagé que l'ADS-B soit appliquée 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, voir figure (2.3).

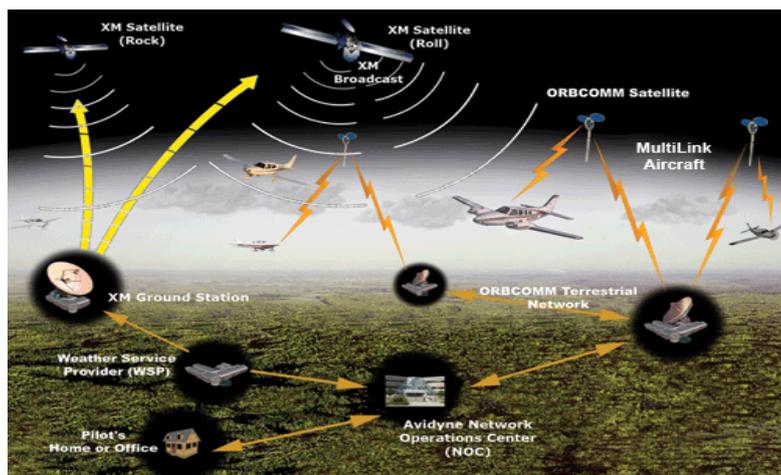


Figure 2.3 : Représente le système ADS-B.

### 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 :

- Les systèmes de surveillance actuels doivent transmettre des comptes rendus actualisés de la position de l'aéronef de manière à garantir la séparation sûre ;
  - ✓ 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 devrait permettre d'assurer les minimums de séparation pour l'espace aérien défini ;
  - ✓ Le système de surveillance devrait 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'urgence ;
  - ✓ Le système de surveillance devrait appuyer les opérations de recherche et de sauvetage.

### 2.5.7 Performances de surveillance requises (R.S.P)

L'émergence de plusieurs types de systèmes et de procédures de surveillance pour appuyer les fonctions ATM, en plus des moyens de surveillance existants, fait craindre que le système de navigation aérienne actuel ne devienne trop complexe. Il est vrai que l'idéal d'un point de vue coût/efficacité, serait de n'avoir qu'un seul système capable de répondre à tous les besoins de surveillance pour toutes les phases de vol et dans tous les types d'espaces aériens.

Cependant, il est nécessaire d'avoir des systèmes de surveillance de caractéristiques et de capacités 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. Dans l'attente d'un système de surveillance capable de répondre à tous les besoins, la communauté aéronautique se doit d'examiner toutes les possibilités. Même si la diversité des options de surveillance assouplit le processus de planification, elle complique l'harmonisation des fonctions de surveillance. Une manière de faciliter la planification serait de traduire tous les besoins opérationnels pertinents, en série de paramètres de performance de surveillance.

L'expression « performances de surveillance requise (R.S.P) » 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 R.S.P 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 future de système de surveillance

L'ADS-B pourrait être utilisée comme couverture complémentaire du SSR 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 l'affichage d'informations de trafic dans

le poste de pilotage (CDTI). Il est prévu d'incorporer cette fonction à l'ACAS III. [16-18].

### 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. Ce but ne peut être atteint, bien sûr, sans 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. Les lignes directrices visent à limiter cette période au minimum.

## 2.6 Aspects économiques des systèmes CNS-ATM

### 2.6 1 Introduction

Les difficultés que les États doivent désormais surmonter sont d'ordre organisationnel et financier. Il existe déjà un certain nombre d'éléments indicatifs de la 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 élaborées. 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, 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 financières éprouvées mine la confiance du monde financier, freinant ainsi la mise en œuvre des éléments des systèmes CNS/ATM.

Sauf à quelques rares exceptions, la mise en œuvre et l'exploitation des principaux éléments des 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.

#### 2.6.4 Prévisions du trafic et autres prévisions à moyen et à long terme [19]

L'analyse des facteurs économiques et les prévisions du trafic aérien ainsi que d'autres facteurs qui sous-tendent les développements dans le domaine du transport aérien font partie des activités de prévision de l'OACI, voir la figure (2.4).

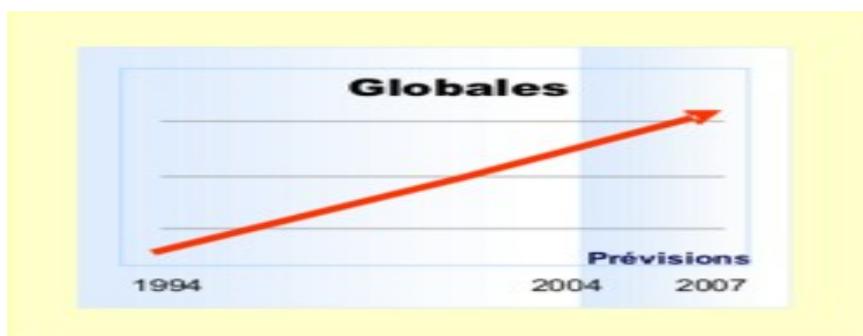


Figure 2.4 : Représente une prévision globale entre (1994-2007). [19]

Des prévisions à moyen terme sont établies et publiées annuellement. La Circulaire 308 présente révision de trafic et tendances financières des compagnies aériennes, 2004-2007 contient le tout dernier ensemble de prévision de croissance.

#### 2.6.5 Prévisions économiques du trafic de passagers

Le tableau ci-dessous (2.1), contient l'analyse des tendances à l'échelle mondiale et par région (Afrique, Amérique du Nord, Amérique latine, caraïbe, Asie/Pacifique, Europe et Moyen-Orient) du trafic et des résultats financiers des compagnies aériennes, accompagnée des facteurs sous-jacents à la demande de trafic pour la période 1994-2004, **Prévisions du trafic régulier**

**de passagers**, exprimé en passagers-kilomètres réalisés entre (2005-2007), ainsi que des prévisions financières mondiales de base concernant les compagnies aériennes.

Tableau 2.1 : Représente une variation du trafic régulier régional et mondial entre (1994-2007).

**Trafic régulier de passagers régional et mondial de 1994 à 2007**  
[passagers-kilomètres réalisés (PKR)]

Région de l'immatriculation	1994 (milliards de PKR)	2004 (milliards de PKR)	Moyenne annuelle de croissance 1994-2004 (%)	2005 (milliards de PKR)	Variation annuelle (%)	2006 (milliards de PKR)	Variation annuelle (%)	2007 (milliards de PKR)	Variation annuelle (%)
Afrique	47,0	75,2	4,8	80,1	6,5	85,4	6,6	90,1	5,5
Amérique du Nord	867,2	1 247,3	3,7	1 325,9	6,3	1 385,5	4,5	1 443,7	4,2
Amérique latine et Caraïbe	106,0	147,3	3,3	156,4	5,2	165,0	5,5	174,3	5,6
Asie/Pacifique	493,1	903,7	6,2	986,8	9,2	1 069,7	8,4	1 158,5	8,3
Europe	524,6	919,9	5,8	989,8	7,6	1 055,1	6,6	1 123,7	6,5
Moyen-Orient	62,0	148,3	9,1	165,8	11,8	185,7	12,0	202,0	8,8
<b>Monde</b>	<b>2 099,9</b>	<b>3 441,7</b>	<b>5,1</b>	<b>3 704,9</b>	<b>7,6</b>	<b>3 946,5</b>	<b>6,5</b>	<b>4 192,4</b>	<b>6,2</b>



Figure 2.5 : Représente une prévision régionale entre (1994-2007).

L'OACI prépare également des prévisions à long terme sur le trafic de passagers/fret, les mouvements d'aéronefs, la composition du parc aérien et des paramètres connexes, à l'appui des objectifs de planification des compagnies aériennes, des aéroports ou des systèmes de communications, de navigation, de surveillance et de gestion du trafic aérien (CNS/ATM) et d'autres systèmes. Ces prévisions mondiales et régionales portent sur une période de dix ans et sont publiées tous les deux ou trois ans sous forme de publication vendue. La Circulaire 304 [20] intitulée contient le tout dernier ensemble des prévisions jusqu'à l'an 2015, figure (2.6).

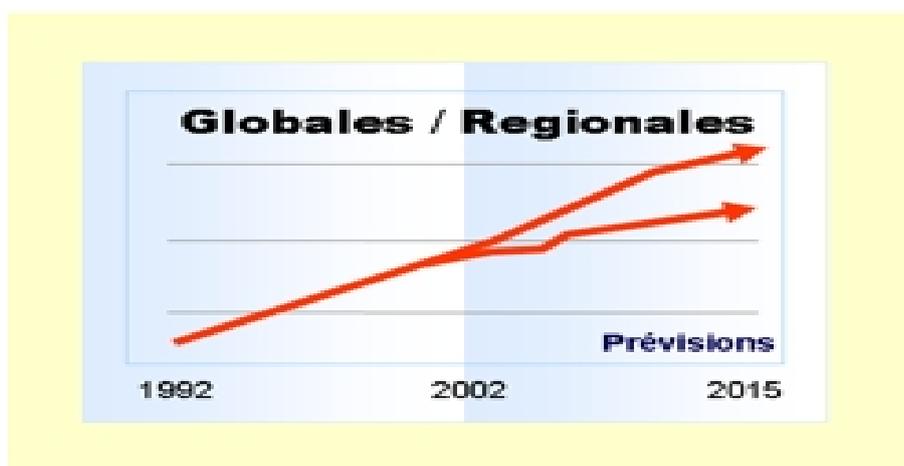


Figure 2.6 : Regroupe les deux prévisions globale et régionale entre (1992-2015).

## 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 les éléments sol et embarqués. Les systèmes de navigation plus précis et plus fiables permettront 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 29 000 ft des possibilités d'établissement plus dynamique des routes, des acheminements plus directs ainsi qu'un rehaussement général de la sécurité.

### 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 traditionnels deviendront dépassés et feront de plus en plus place à la technologie des satellites. [21] Ces états bénéficieront en outre de l'amélioration de la sécurité aérienne.

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 et 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'ils 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.

## CHAPITRE 3

### ÉTUDE DE PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES ET RADAR

#### 3.1 Introduction

Le radar est un instrument qui permet de détecter la présence d'un objet cible et de déterminer sa position et sa vitesse au moyen des ondes électromagnétiques. [22] Grâce aux propriétés des ondes qu'il utilise, le radar peut acquérir des données dans n'importe quelles conditions atmosphériques, de jour comme de nuit. Pour cette raison, le radar est très utile pour de nombreuses applications.

Les ondes électromagnétiques ou (hyperfréquences, micro-ondes correspondent aux fréquences de 300 MHz. Ces ondes sont aussi appelées ondes submillimétriques, millimétriques, centimétriques et décimétriques suivant leur longueur d'onde dans le vide.

#### 3.2 Propagation en espace libre [23]

##### 3.2.1 Définition

Une onde électromagnétique en propagation libre dans une direction  $z$  possède une composante de champ électrique  $E$  et une composante de champ magnétique  $H$ .  $E$ ,  $H$  et  $z$  forment un trièdre direct. Le plan contenant  $E$  et  $H$  est perpendiculaire à la direction de propagation, c'est le plan d'onde, comme illustre dans la figure (3.1).

L'onde est caractérisée par :

$\vec{z}$  : La direction de propagation ;

$\vec{E}$  : Le champ électrique (Volt /mètre), sa direction indique la polarisation de l'onde ;

$\vec{H}$  : Le champ magnétique (Ampère/mètre).

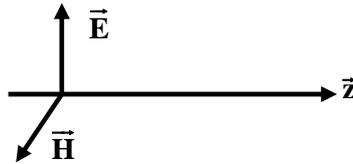


Figure 3.1 : Représentation de deux champs  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  ainsi que la direction de propagation  $\vec{z}$ .

Concernant le milieu de propagation, ce dernier est caractérisé par les paramètres suivants :

$\varepsilon$  : La permittivité, dans le vide elle est égale à  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9}$  exprimée en (Farad/mètre) ;

$\mu$  : La perméabilité, dans le vide elle est égale à  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m exprimée en Henry/mètre ;

$\sigma$  : La conductivité est exprimée en  $\Omega^{-1}$ . Dans le vide, elle est égale à  $\sigma_0 = 0$ .

### Remarque

Dans le cas général ( $\varepsilon$ ,  $\mu$  et  $\sigma$ ) sont des tenseurs, dans les milieux homogènes et isotropes, ce sont des scalaires. La densité volumique ( $\rho$ ) des charges électriques, dans le vide  $\rho_0 = 0C/m^3$ . Elle est exprimée en Coulomb/mètre cube.

À partir de ces grandeurs caractéristiques, on introduit les grandeurs suivantes :

- L'excitation du champ électrique :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.1)$$

- L'excitation du champ magnétique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.2)$$

- La densité de courant :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.3)$$

Toutes ces grandeurs sont reliées (exprimées) par les équations de Maxwell :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (3.6)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.7)$$

### Commentaire

Ces équations montrent que toutes variations temporelles du champ électrique  $E$  induisent une variation spatiale du champ magnétique  $H$ , de même toutes variations temporelles du champ magnétique induisent une variation spatiale du champ électrique  $E$ . Il ne peut donc pas avoir de propagation seule de l'un des champs. C'est pourquoi on parle d'onde électromagnétique.

### 1<sup>ère</sup> Cas

En milieu isotrope, conducteur ( $\rho \neq 0$   $\sigma \neq \infty$ ) et pour une onde sinusoïdale, les équations précédentes deviennent :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + j\omega \epsilon \vec{E} \quad (3.8)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (3.9)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0 \quad (3.10)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0 \quad (3.11)$$

### 2<sup>ème</sup> Cas

En milieu isotrope, non conducteur ( $\rho = 0$ ) et pour une onde sinusoïdale, les mêmes équations deviennent :

$$\overline{\operatorname{rot}} \vec{H} = j\omega \varepsilon \vec{E}$$

(3.12)

$$\overline{\operatorname{rot}} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (3.13)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0 \quad (3.14)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (3.15)$$

#### 3.2.2 Conditions de passage

Il s'agit de déterminer les relations qui lient les composantes des champs de part et d'autre d'un dioptré séparant deux milieux caractérisés par :

Milieu 1 :  $\varepsilon_1; \mu_0$

Milieu 2 :  $\varepsilon_2; \mu_0$

La figure (3.2) représente deux milieux de propagation avec des caractéristiques différentes.

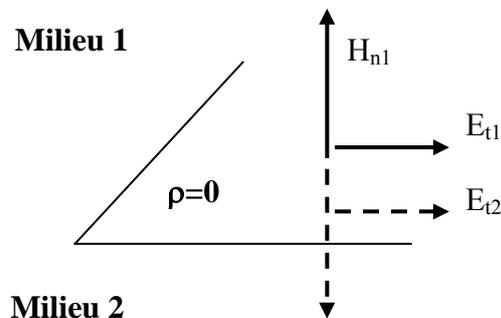


Figure 3.2 : La relation entre le champ électrique et le champ magnétique

### a) Composantes normales

Continuité des composantes normales de H :

$$\varepsilon_1 \vec{E}_{n1} + \varepsilon_2 \vec{E}_{n2} = 0 \quad (3.16)$$

$$\vec{H}_{n1} + \vec{H}_{n2} = 0 \quad (3.17)$$

### b) Composantes tangentielles

Continuité des composantes tangentielles de E :

$$\vec{E}_{t1} + \vec{E}_{t2} = 0 \quad (3.19)$$

$$\vec{H}_{t1} + \vec{H}_{t2} = 0 \quad (3.20)$$

### 3.2.3 Équations de propagation

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}) = -j\omega\mu\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \omega^2\mu\varepsilon\vec{E} \quad (3.21)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}) = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{E})) - \nabla^2(\vec{E}) \quad (3.22)$$

Dans un milieu sans charge :

$$\text{div}\vec{E} = 0 \quad (3.23)$$

$$\nabla^2(\vec{E}) + \omega^2\mu\varepsilon\vec{E} = 0 \quad (3.24)$$

Le même calcul avec la composante du champ magnétique nous donne :

$$\nabla^2(\vec{H}) + \omega^2\mu\varepsilon\vec{H} = 0 \quad (3.25)$$

Ces équations sont connues sous le nom d'équations de propagation de Helmholtz.

### 3.2.4 Ondes planes

C'est une onde qui se propage dans un milieu infini, uniforme, homogène et non conducteur dans une direction z supposée infinie et telle que le champ E

qui est perpendiculaire à la direction de propagation soit constant. Ce plan perpendiculaire à la direction de propagation est le plan d'onde. On suppose, de plus, que la polarisation de l'onde (direction du champ  $E$ ) reste constante et que l'amplitude des champs varie de façon sinusoïdale, figure (3.3).

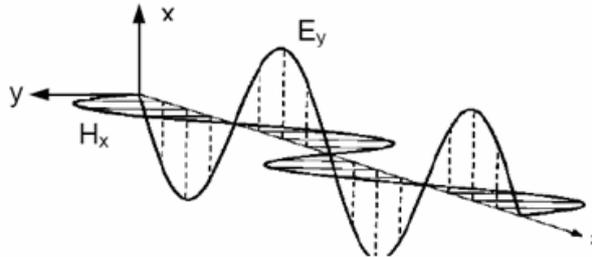


Figure 3.3 : La représentation d'une onde plane

Dans les conditions citées ci-dessus, le champ  $E$  s'écrit alors:

$$E = \begin{Bmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

#### a) Calcul du champ électrique

L'équation de propagation de Helmholtz devient pour le champ électrique :

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0 \quad (3.26)$$

La solution de cette équation est :

$$E_x = E' e^{-j\beta z} + E'' e^{+j\beta z} \quad (3.27)$$

En posant :  $\beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon$  nous aurons  $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$

$\beta$  est la constante de propagation qui est un nombre réel dans un milieu sans perte.

Comme les champs varient sinusoïdalement avec le temps ; la nouvelle équation de champ électrique devient :

$$E_x(z, t) = E_0' e^{j\omega(t-z\sqrt{\varepsilon\mu})} + E_0'' e^{j\omega(t+z\sqrt{\varepsilon\mu})} \quad (3.28)$$

Cette équation représente deux ondes, l'une correspond au premier terme et se propage dans le sens des z croissants (onde incidente), la seconde correspond au second terme et se propage dans le sens de z décroissants (onde réfléchie). On ne retient dans un premier temps que l'onde qui se propage dans le sens des z positifs, soit alors :

$$E_x(z, t) = E_0' e^{j\omega(t-x\sqrt{\varepsilon\mu})} \quad (3.29)$$

### b) Calcul du champ magnétique

L'équation de Maxwell permet de calculer le champ H à partir du champ E. Comme pour l'hypothèse d'une onde plane, les composantes du champ H ne dépendent ni de x ni de y et le champ E n'a qu'une composante selon x, nous aurons donc l'expression suivante:

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega\varepsilon E_x \quad (3.30)$$

En remplaçant  $E_x$  par son expression, nous pourrions écrire l'équation (3.31) :

$$\frac{dH_y}{dz} = -j\omega\varepsilon E_0' e^{j\omega(t-\frac{z}{c})} \quad (3.31)$$

Delà, nous calculons l'expression de la composante du champ magnétique H :

$$H_y = c\varepsilon E_0' e^{j\omega(t-\frac{z}{c})} \quad (3.33)$$

Vitesse de propagation est exprimée par la relation suivante :

$$c = \frac{dz}{dt} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3.34)$$

Cette expression montre que la vitesse de l'onde dépend des caractéristiques du milieu de propagation. Dans le vide, elle est égale :

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (3.35)$$

### 3.2.5 Grandeurs caractéristiques d'un champ électromagnétique [24]

Le champ électromagnétique est caractérisé par plusieurs grandeurs, nous citerons les plus importantes, à savoir :

#### **a) Fréquence**

La fréquence d'une l'onde ( $f$ ), s'exprime en Hertz. C'est le nombre de fois ou l'amplitude de l'onde change de sens par seconde. La fréquence ne dépend que de l'émetteur de l'onde.

#### **b) Période**

C'est l'inverse de la fréquence, elle s'exprime en seconde. Elle est égale à :  $T = \frac{1}{f}$  Avec  $f$  exprimée en Hz.

#### **c) Pulsation**

La pulsation ( $\omega$ ), s'exprime en radian par seconde et ne dépend que de la fréquence, son expression est  $\omega = 2\pi f$ .

#### **d) Constante de propagation**

La constante de propagation ( $\beta$ ) dans un milieu sans perte ou  $\varepsilon$  est réelle, elle à la dimension de l'inverse d'une longueur, son expression est  $\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ .

Dans un milieu avec perte, on écrira les composantes de l'onde sous la forme :

$$A = A_0 e^{-\gamma z} \quad (3.36)$$

Où par comparaison avec la propagation sans perte :

$$\gamma = j\beta^* = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon^*} = j\omega\sqrt{\mu(\varepsilon' - j\varepsilon'')} \quad (3.37)$$

La constante de propagation comporte donc une partie réelle et une partie imaginaire qu'on écrit sous la forme :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.38)$$

Dans cette expression  $\alpha$  est la constante d'atténuation et  $\beta$  la constante de phase.

### e) Vitesse de l'onde

La vitesse de l'onde est exprimée par l'expression suivante :

$$c = \frac{dz}{dt} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3.39)$$

Cette expression montre que la vitesse de l'onde dépend des caractéristiques du milieu de propagation. Dans le vide l'équation s'écrit :

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (3.40)$$

Avec :

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} \text{ F/m} \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

D'où :

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Cette vitesse n'est autre que la vitesse de la lumière dans le vide.

### f) Longueur d'onde

C'est la distance parcourue par l'onde pendant une période, la longueur d'onde dépend de la fréquence de l'émetteur et des propriétés du milieu dans lequel l'onde se propage, son expression est :

$$\lambda = cT = c/f \quad (3.40)$$

### g) Impédance d'onde

On constate que  $\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$  est homogène à  $\frac{E}{H}$  c'est à dire homogène à une impédance, c'est ce qu'on appelle l'impédance d'onde :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.41)$$

Dans le vide, cette impédance d'onde est égale à :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \quad (3.42)$$

### 3.3 Onde guidée par deux plans conducteurs

Considérons une onde plane qui arrive dans un espace séparé par deux plans conducteurs avec un angle d'incidence  $\theta$ , voir figure (3.4).

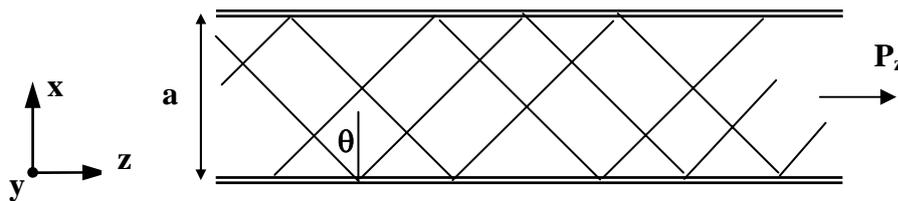


Figure 3.4 : Représentation d'une onde guidée par deux plans conducteurs

L'énergie transportée par l'onde est concentrée entre ces deux plans et se propage dans la direction  $z$ , suivant l'équation (3.43):

$$P_z = \iint \frac{E_0^2}{Z} \sin \theta (1 + \cos(2\beta x \cos \theta)) ds \quad (3.43)$$

### 3.4. Onde guidée

#### 3.4.1 Conditions de propagation d'une onde guidée

Nous considérons que les ondes se propagent toujours dans la direction  $z$ . D'une manière générale, les composantes de l'onde électromagnétique s'écrivent :

$$A = A(1,2)e^{j\omega t - \gamma_g z} \quad (3.44)$$

Avec :

$\gamma_g$  : Est la constante de propagation

$\omega$  : La pulsation de l'onde

Considérons une zone de l'espace délimitée par un tube supposé parfaitement conducteur de section  $S$  que nous appellerons **guide d'onde** de forme quelconque, figure (3.5).

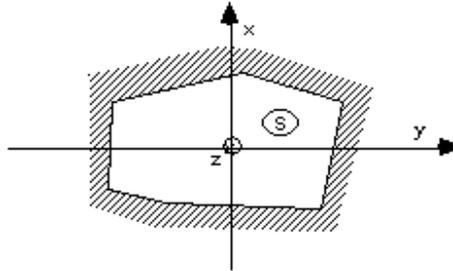


Figure 3.5 : Représentation d'une onde guidée.

On montre qu'une onde transverse électromagnétique TEM (une onde TEM n'a pas de composante longitudinale de champ :  $E_z = H_z = 0$ ) ne peut pas se propager dans un guide d'onde. Or, l'expérience montre qu'un rayon lumineux peut se propager au travers d'un guide d'onde. Il existe donc des conditions telles, qu'une onde peut se propager dans un guide.

Cherchons les solutions de l'équation de propagation de Helmholtz.

Chaque composante du champ répond à l'équation :

$$\nabla^2_{xyz}(\vec{A}) + \gamma_0^2 \vec{A} = 0 \longrightarrow \nabla^2_{xy}(\vec{A}(x, y)) + (\gamma_0^2 + \gamma_g^2) \vec{A}(x, y) = 0 \quad (3.45)$$

Posons :

$$\gamma_c^2 = \gamma_0^2 + \gamma_g^2 \quad (3.46)$$

Avec :

- $\lambda_0 = 2\pi / \gamma_0$ , représente la longueur d'onde un milieu infini ayant les propriétés intérieures du guide
- $\lambda_g = 2\pi / \gamma_g$ , représente la longueur d'onde à l'intérieur du guide.
- $\lambda_c = 2\pi / \gamma_c$ , représente la longueur d'onde de coupure.

Deux cas de figure peuvent se présenter :

La longueur d'onde  $\lambda_0$  est plus petite que la longueur d'onde  $\lambda_c$  de coupure. Ceci qui correspond à :  $\gamma_0 > \gamma_c$ .

Par contre lorsque l'onde se propage dans un milieu sans perte, la relation de la constante de propagation devient alors :

$$\gamma_g = \sqrt{\gamma_c^2 - \gamma_0^2} = j\beta_g \quad (3.47)$$

On a alors :

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (3.48)$$

Avec:

$\lambda_0, \lambda_c$  sont respectivement des longueurs d'onde dans un milieu infini ayant des propriétés de l'intérieur du guide et la longueur d'onde de coupure

### 3.5 Étude des ondes radars

#### 3.5.1 Principes généraux

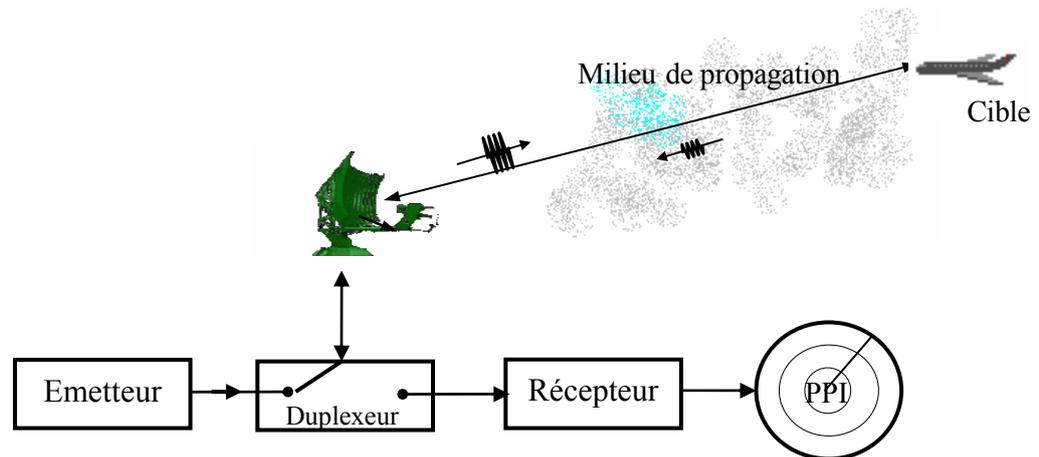
##### a) Définition du radar

Un radar est un système qui utilise la propriété des ondes électromagnétiques de se réfléchir (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 et la forme**. RADAR est un acronyme de Radio Detection And Ranging qui signifie « Détection et Télémétrie radioélectriques ».

Une cible (Target en Anglais) au sens large du terme 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... etc.) qui interceptent aussi l'énergie et la renvoient [25].

### b) Le principe du radar [26]

Le schéma ci-dessous figure (3.6) 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 3.6 : Représentation de deux chemins émission réception du radar

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

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 de l'axe de l'antenne.

Ce vecteur fait le tour de l'écran à la vitesse de rotation de l'antenne. 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.

### c) Classification des radars

Selon l'information recherchée, les radars possèdent différentes technologies. Différentes classifications sont utilisées en fonction de certains critères : type de cible (primaire, secondaire), selon la forme (image) de l'objet (radar imageur), objectif (surveillance, poursuite, etc.), [27] position relative de l'émetteur et le récepteur (monostatique, bistatique), type de signal (radar à impulsions, radar à onde continue), la résolution (radars conventionnels, radars haute résolution), voir figure (3.7),

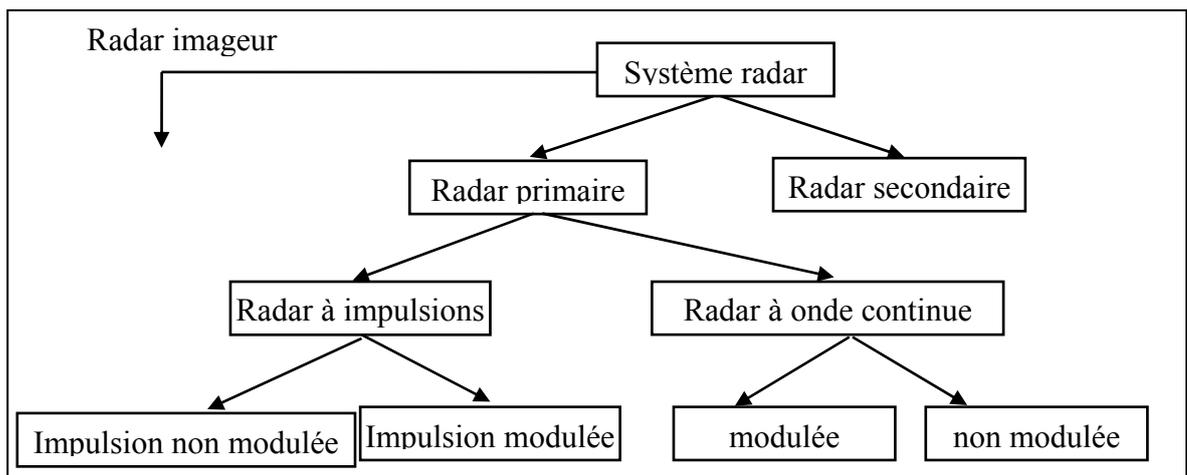


Figure 3.7 : les classifications du système radar

- **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 de la terre, d'autres planètes et des astéroïdes.

- **Radar primaire**

Un radar primaire émet des signaux à haute fréquence qui sont réfléchis par les cibles. Les échos reçus sont traités pour en extraire certaines informations.

- **Radar secondaire**

Pour ces types de radar, l'avion doit avoir un transpondeur (TRANSMITTING) et ce dernier répond aux interrogations en émettant un signal codé. Cette réponse peut contenir beaucoup plus d'informations qu'un radar primaire (par exemple l'altitude, un code d'identification et également tout problème technique à bord, comme, une perte de contact-radio...etc.).

- **Radars à impulsions**

Ces radars émettent un signal formé d'impulsions de durée très brève de haute fréquence et de grande puissance. Après l'émission d'une impulsion, suit un temps d'écoute plus ou moins long durant lequel les échos éventuels sont reçus, avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise.

La direction, la distance et parfois la taille ou l'altitude de la cible peuvent être déterminées à partir du traitement des échos de retour, figure (3.8).

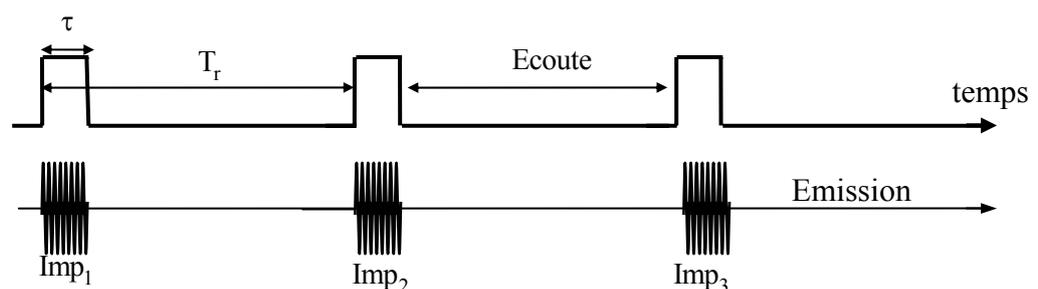


Figure 3.8 : Représentation des caractéristiques des signaux émis.

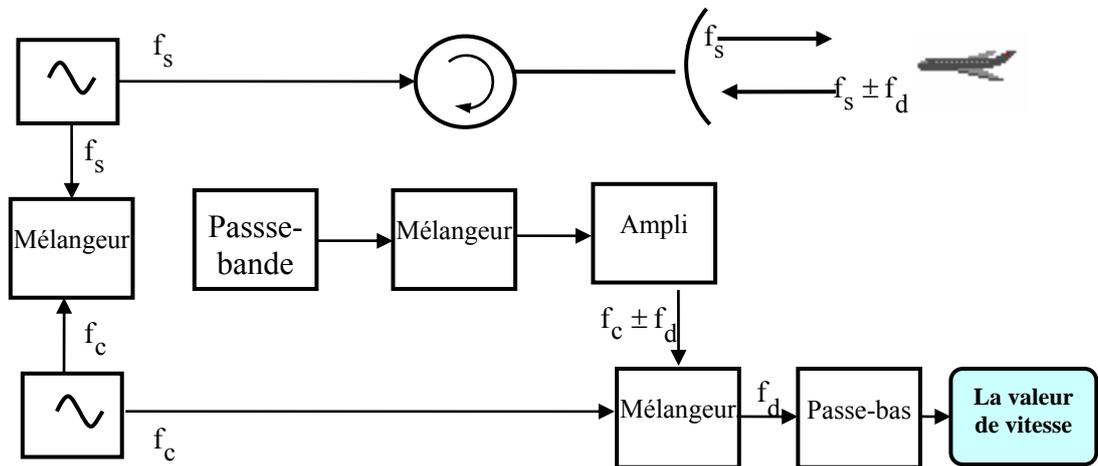
Où:

$\tau$  : La largeur d'impulsion,

$T_r$  : La période de l'écoute.

- **Radar à onde continue non modulée**

Le radar émet de façon continue un signal d'amplitude et de fréquence constantes. 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, voir figure (3.9).



Où  $f_s$  : La fréquence  
 $f_c$  : La fréquence de coupure ;  
 $f_d$  : La fréquence Doppler.

Figure 3.9 : Représentation de 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), voir figure (3.10).

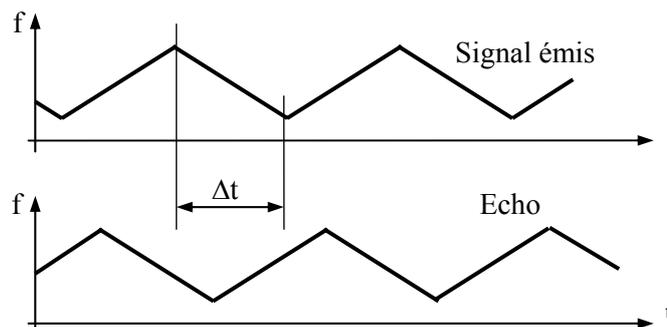


Figure 3.10 : Représentation de la modulation FM et mesure de distance.

- **Radar bistatique**

Un radar bistatique comporte des sites d'émission et de réception éloignés (par une distance qui peut être considérable), figure (3.11). Ils sont utilisés dans le domaine militaire et météorologie.

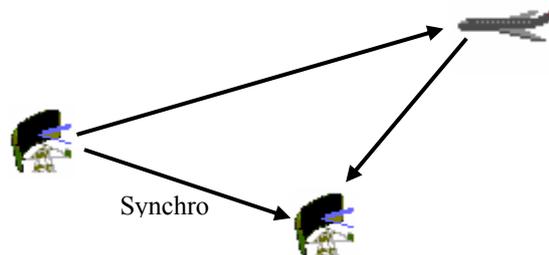


Figure 3.11 : Représentation de système radar bistatique.

### 3.5.2 Principe de fonctionnement d'un radar à impulsions

#### a) Mesure de 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. Le temps  $\Delta t$  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, figure (3.12). [28].

Chaque impulsion revenant au radar a parcouru deux fois la distance radar cible. La formule permettant de calculer cette distance est donc la suivante :

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3.49)$$

Avec:

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

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

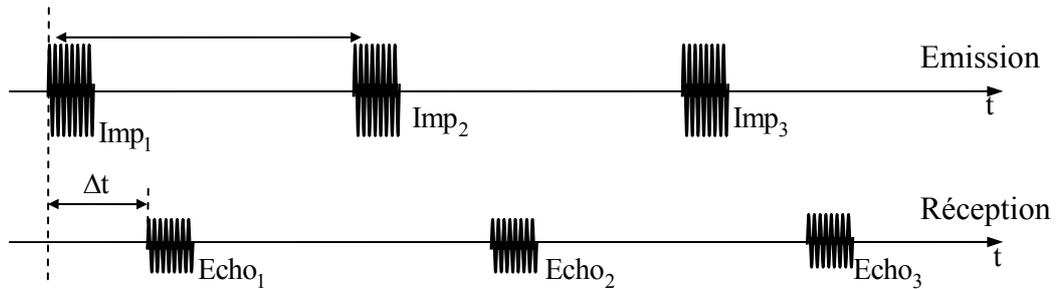


Figure 3.12 : Représentation des Signaux émis et reçus du radar.

- **Distances ambiguës**

L'horloge du radar est remise à zéro à chaque fois qu'une nouvelle impulsion est émise, et ce, afin de s'assurer que la mesure de 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 en 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 ci-dessous :

$$R_u = \frac{c \cdot T_r}{2} = \frac{c}{2f_r} \quad (3.50)$$

Avec:

$c$  : La vitesse de la lumière ;

$T_r$  : La période de répétition des impulsions ;

$f_r$  : la fréquence de réflexion.

Exemple : pour une fréquence  $f_r = 600\text{Hz}$ , la distance maximale sans

ambiguïté  $R_u$  est : 
$$R_u = \frac{3 \cdot 10^8}{(2)(600)} = 250\text{Km}$$

- **Distance aveugle**

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 ait entièrement quittée l'antenne et que le radar ait remis 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. La distance  $R_{\min}$  est exprimée par l'équation (3.51).

$$R_{\min} = \frac{c(\tau + TMES)}{2} \text{ (m)} \quad (3.51)$$

Avec:

$c$  : La vitesse de la lumière ;

$\tau$  : La largeur d'impulsion ;

$TMES$  : Le temps de mise en service du récepteur.

## b) Mesure de la direction

L'angle entre la direction du nord et celle de la cible (azimut) est déterminée 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 l'antenne est fonction de ses dimensions

propres. La transmission rapide et précise de l'information de la direction de la cible (azimut) entre la plaque tournante supportant l'antenne et le scope radar peut être assurée par:

- Des servo-systèmes (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 oeuvre un balayage électronique en azimut et/ou en élévation (antenne réseau à commande de phase), voir figure (3.13).

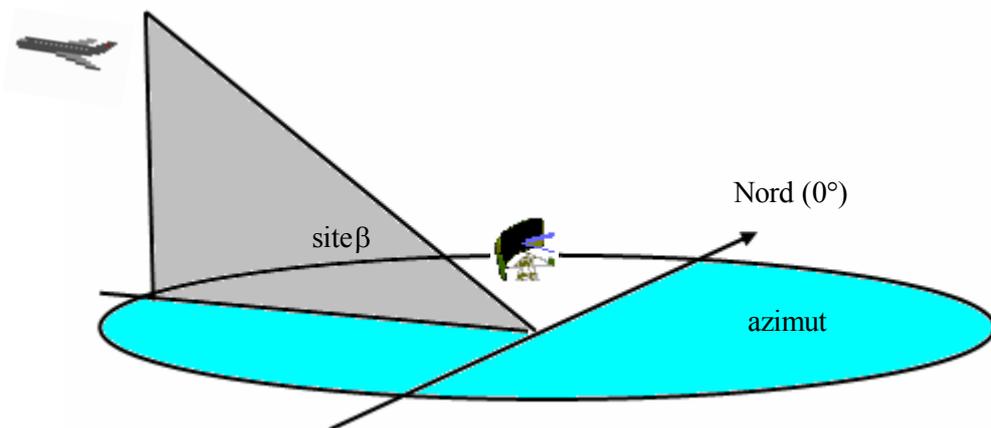


Figure 3.13 : Représentation de l'azimut et l'angle de site  $\beta$  de la cible

La hauteur  $H$  d'une cible par rapport à la surface du globe terrestre est appelée altitude. Cette dernière peut être calculée à partir des mesures de distance  $R$  et d'angle de site  $\beta$ , figure (3.13) 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 ; de 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. A l'image de l'équation (3.52) qui représente la distance  $R$  en fonction l'angle de site  $\beta$  de l'altitude  $H$  et le rayon de la terre  $R_T$ .

$$R(\beta) = R_T \left\{ -\sin(\beta) + \sqrt{\sin^2(\beta) + 2 \frac{H}{R_T}} \right\} \quad (3.52)$$

Avec:

H : l'hauteur de l'avion par rapport de la terre ;

$R_T$  : Le rayon de la terre égale :  $R_T = \frac{4}{3} 6370 \text{ Km} \cong 8500 \text{ Km}$  .

On peut écrire, alors :

$$(R_T + H)^2 = R^2 + R_T^2 - 2RR_T \cos\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.53)$$

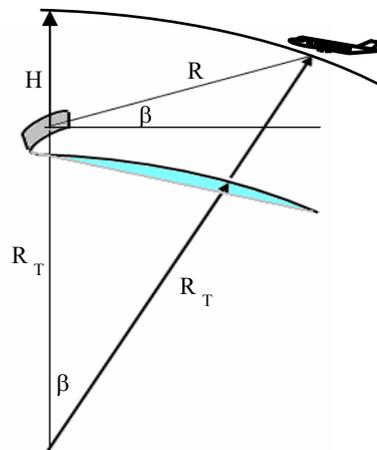


Figure 3.14 : Le calcul de la distance R en fonction de l'angle de site  $\beta$

### 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 réfléchi provoquée par le mouvement de la cible par rapport à la fréquence émise. L'écart de fréquences entre la fréquence émise et réfléchi est appelé fréquence Doppler  $f_d$  . Il est relié à la vitesse radiale  $v_r$  par la relation :

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (3.54)$$

### d) Résolution en distance

La résolution en distance  $\Delta R$  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  $\Delta f$  de l'impulsion émise, figure (3.15).

La largeur de bande  $\Delta f$  est fonction de spectre du signal. On obtient alors :

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f} \quad (3.55)$$

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

Dans le cas d'une impulsion non modulée, on a la largeur de bande donnée par la relation suivante :

$$\Delta f = \frac{1}{\tau}, \text{ d'où } \Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (3.56)$$

Exemple : Pour un avion volant avec un une largeur d'impulsion  $\tau = 3 \mu s$  et on calcul la résolution en distance  $\Delta R$  comme suite :

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

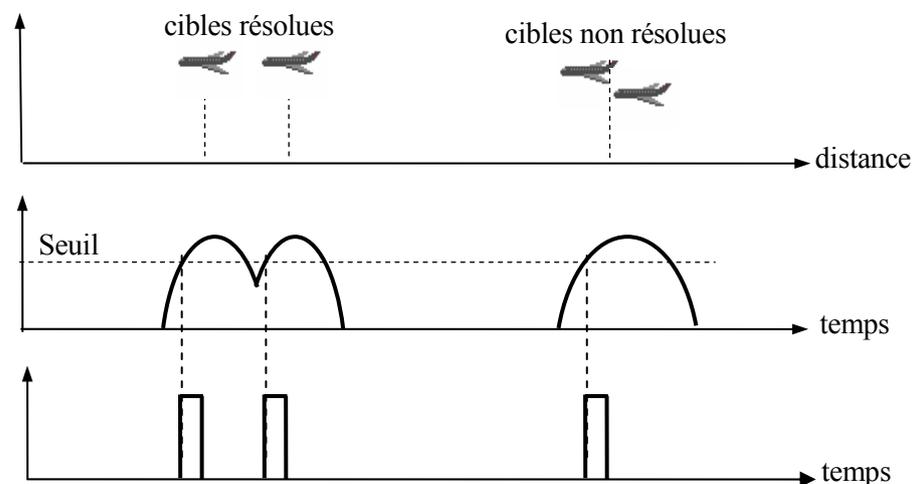


Figure 3.15 : Représentation de la résolution en distance.

### ➤ 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), Les points du diagramme de rayonnement de l'antenne qui reçoit la moitié de la puissance émise (c'est-à-dire la largeur du lobe à -3 dB) sont considérés comme les limites du lobe lorsqu'on calcule la résolution angulaire, figure (3.16). Deux cibles identiques, à la même distance, sont de fait vues par un radar à des azimuts différents lorsqu'elles sont espacées angulairement d'une valeur supérieure à la largeur du lobe à -3 dB.

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

$$\Delta_{az} = 2R \sin\left(\frac{\theta_{-3dB}}{2}\right) \text{ (m)} \quad (3.57)$$

Avec:

R : C'est la portée de cible.

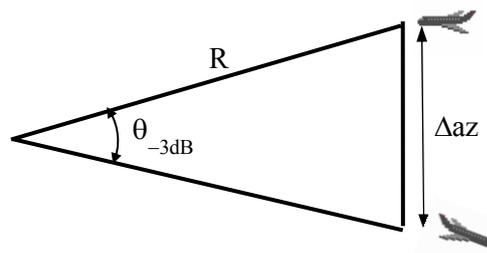


Figure 3.16 : Représentation de la résolution angulaire.

### ➤ Cellule de résolution

Les résolutions en distance et en angulaire conduisent à la notion de **cellule de résolution**. Il est impossible de distinguer l'une de l'autre de deux cibles 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  $\Delta R$ , voir figure (3.17).

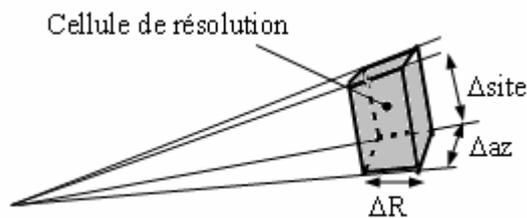


Figure 3.17 : Représente la cellule de résolution.

Avec:

- $\Delta R$  : La variation de la portée de la cible ;
- $\Delta_{site}$  : La variation de l'angle de site ;
- $\Delta_{az}$  : Représente une variation de l'hauteur de cible.

### e) 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 :

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_m} \quad (3.58)$$

- Résolution en vitesse :

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2T_m} \quad (3.59)$$

### 3.6 Équation du radar

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. Nous supposons que les ondes électromagnétiques se propagent dans des conditions idéales, sans subir une quelconque perturbation. [29].

#### 3.6.1 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 avec un gain maximum  $G$  et une 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 grande surface sphérique. Cela revient à dire que la densité de puissance dans une direction donnée diminue lorsque la distance de l'émetteur augmente. La formule (3.60) permet de calculer la densité de puissance rayonnée par l'antenne à la distance  $R$  du radar, voir figure (3.18).

$$p_i = G \frac{P_c}{4\pi R^2} \text{ (W / m}^2\text{)} \quad (3.60)$$

Avec :

$G$  : Le gain de l'antenne ;

$P_c$  : La puissance crête  $P_c$  émise ;

$R$  : La distance entre l'antenne et la cible.

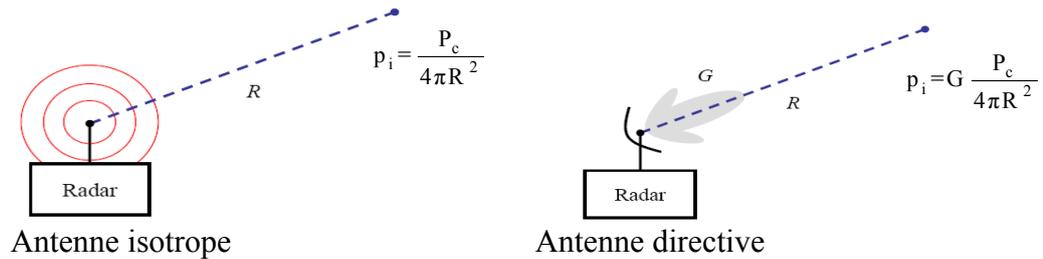


Figure 3.18 : Représentation de la puissance d'incidente pour les types d'antennes différents.

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 réfléchi par la cible qui est réenvoyée vers l'antenne du radar. Afin de déterminer la valeur de cette puissance réfléchi utile, il est nécessaire de définir une surface équivalente radar de la cible SER (RCS en Anglais) notée  $\sigma$ .

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 réfléchi 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 :

$$P_{cib} = p_i \cdot \sigma = \frac{P_c}{4\pi R^2} G \sigma (W) \quad (3.61)$$

Avec:

$\sigma$  : La surface équivalente de la cible ;

$G$  : Le gain de l'antenne ;

$P_c$  : La puissance crête  $P_c$  émise ;

$R$  : La distance entre l'antenne et la cible.

La cible se comporte comme un émetteur qui réémet omnidirectionnellement la puissance ( $P_{cid}$ ).

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

$$p_r = \frac{P_{cib}}{4\pi R^2} = \frac{\sigma G P_c}{4\pi R^2} (W / m^2) \quad (3.62)$$

Avec:

$P_{cible}$  : La puissance reçue par la cible.

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

$$P_r = p_r \cdot A_e = \left( \frac{\sigma G P_c}{(4\pi R^2)^2} \right) \left( \frac{G \lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} (W) \quad (3.63)$$

Avec:

$P_r$  : La puissance captée par le radar ;

$A_e$  : La surface équivalente du radar.

D'où on tire la distance :

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_r}} (W) \quad (3.64)$$

Avec:

$\lambda$  : La longueur d'onde ;

$\sigma$  : La surface équivalente de la cible ;

$G$  : Le gain de l'antenne ;

$P_c$  : La puissance crête.

Soit  $P_{r\min}$  la puissance minimum du signal autorisant sa détection par le radar. Tout signal de puissance inférieure 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 :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}}} (W) \quad (3.65)$$

Avec:

$S_{\min}$  : Représente le signal minimum de détection.

### 3.6.2 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 alors, une pondération par un facteur de pertes  $L_s$  ( $L > 1$ ) dans l'équation de la portée pour tenir compte de ces pertes, on obtient finalement :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi) L_s^3 S_{\min}}} (W) \quad (3.66)$$

Avec :

$P_c$  : La puissance crête ;

$G$  : Le gain de l'antenne ;

$\lambda$  : La longueur d'onde ;

$\sigma$  : La surface équivalente de la cible ;

$S_{\min}$  : Représente le signal minimum de détection ;

$L_s$  : Facteur de perte.

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 a supposé que le gain de l'antenne est constant. Or, ce gain varie pendant le balayage dont il faut tenir compte. La bonne approximation du gain de l'antenne est de forme gaussienne :

$$G(\theta) = e^{-\frac{2,77\theta^2}{\theta_{3dB}^2}} \quad G(\theta) = e^{-\frac{2,77\theta^2}{\theta_{3dB}^2}} \quad (3.67)$$

### 3.6.3 Influence des pertes atmosphériques

Le signal émis par le radar subit tout au long de son trajet aller et retour une atténuation due à sa traversée des gaz de l'atmosphère constitués d'air sec et de vapeur d'eau. Cette perte de signal est caractérisée par un coefficient d'atténuation atmosphérique temps clair aller-retour  $\alpha_{atm}$ , exprimé généralement en dB/km et fonction de la longueur d'onde du radar.

Tableau 3.1 : Regroupe le coefficient d'atténuation atmosphérique.

<b>BANDES</b>	<b>L (1,3 GHz)</b>	<b>S (3 GHz)</b>	<b>C (5,5 GHz)</b>	<b>X (10 GHz)</b>
$\alpha_{atm}$ (dB/km) aller-retour (temps clair)	0,012	0,015	0,017	0,024

La relation entre la portée calculée  $R$  sans atténuation et la portée réelle  $R_{att}$  avec l'atténuation atmosphérique est la suivante :

$$R = R_{att} \cdot 10^{0,025 \alpha_{atm} R_{att}} \quad (3.68)$$

La figure (3.19) Représente la variation de l'atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence.

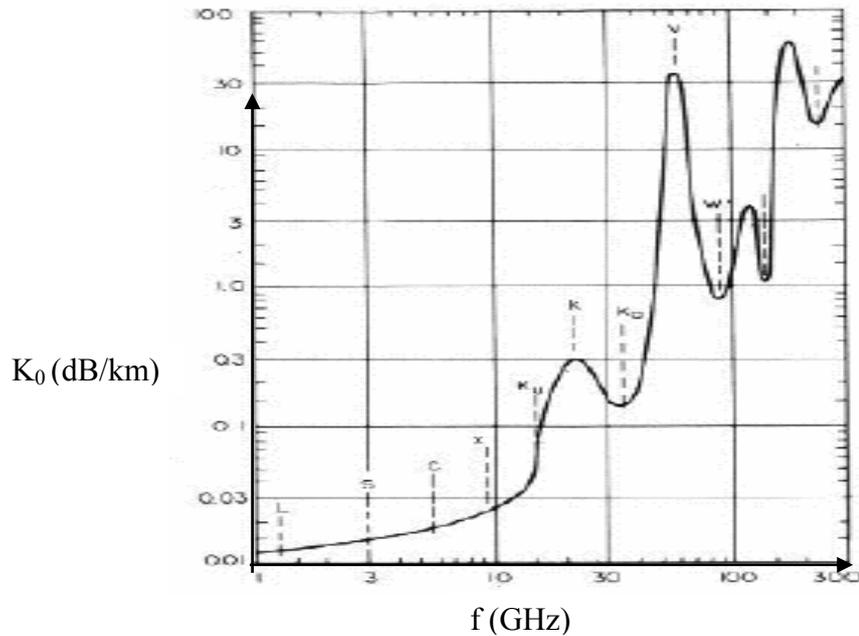


Figure 3.19 : Atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence.

Le radar est sensible à la pluie, d'autant plus que sa longueur d'onde est faible. Cette sensibilité est caractérisée par un coefficient d'atténuation atmosphérique supplémentaire dû à la pluie. Il s'exprime en fonction du taux de précipitation  $\tau_{pluie}$  (en mm/h) par la formule ci-dessous:

$$\alpha_{pluie} = 2A(\lambda)\tau_{pluie}^{B(\lambda)} \quad (3.69)$$

Le tableau suivant représente les différentes bandes, aussi que leur atténuation en cas de pluie.

Tableau.3.2 : les bandes et leur atténuation due à la pluie.

Bandes	Atténuation due à la pluie (mm/h) (dB/km)	
	A	B
L	0,0000733	0,927
S	0,000402	1,042
C	0,00147	1,261
X	0,0101	1,276

Le coefficient d'atténuation atmosphérique total, en temps de pluie, est alors la somme du coefficient temps clair et celui du à la pluie.

### 3.6.4 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 :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{(P_c \tau) \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot 1,2 \cdot kFT_0 \cdot L_s (S/N)_1}} \quad (3.70)$$

Avec:

$P_c$  : La puissance crête;

$G$  : Le gain de l'antenne;

$\lambda$  : La longueur d'onde;

$\sigma$  : La surface équivalente de la cible;

$(S/N)$  : Représente le rapport signal sur le bruit;

$L_s$  : Facteur de perte;

$T_0$  : la température.

Cette équation entraîne plusieurs remarques, à savoir:

- La portée du radar est proportionnelle à l'énergie du signal émis

$$E = P_c \tau ;$$

- Elle est proportionnelle à la surface équivalente  $\sigma$  de la cible.

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

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

### 3.7 Étude du radar de surveillance [30]

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;
- 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 (3.20).

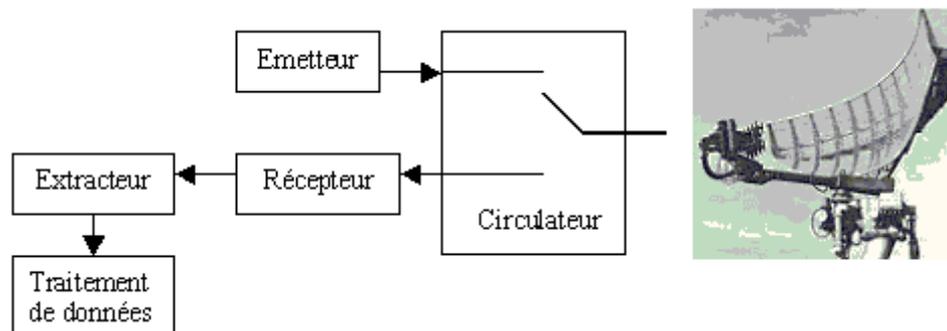


Figure 3.20: Représentation de la composition d'un radar de surveillance.

L'antenne est un réflecteur parabolique tronqué dont la courbure permet de focaliser le rayonnement électromagnétique. L'ouverture dans le plan horizontal est de l'ordre de  $2^\circ$ . 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  $45^\circ$ , lui permettant ainsi d'éclairer une large tranche du ciel avec l'existence d'un cône mort (voir figure 3.21). Une motorisation et un joint tournant assurent la rotation de l'antenne à la vitesse angulaire d'une dizaine de tours/mn.

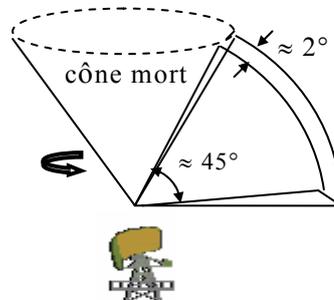


Figure.3.21 : Représente le cône mort

### 3.7.1 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 [25]. En pratique, l'antenne peut être réalisée par une déformation d'un réflecteur parabolique, voir figure (3.22).

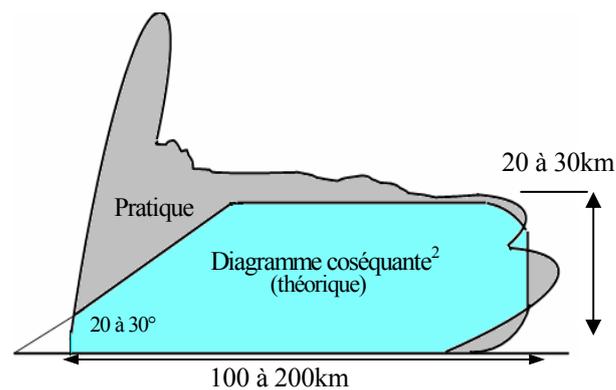


Figure 3.22 : Le diagramme d'antenne en cosécante carrée.

### 3.7.2 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 45 m<sup>2</sup> alors que son équivalent bande **S** utilisera un réflecteur de 15 m<sup>2</sup>. 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 10 m seulement en bande **S**.

### 3.7.3 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, [31] Pd et de cible ( $\sigma$ ) données.

$$\begin{cases} R_{\max} = K\sqrt{G(\beta_0)} \\ R(\beta) = K\sqrt{G(\beta)} \end{cases} \longrightarrow R(\beta) = R_{\max} \sqrt{\frac{G(\beta)}{G}} \quad (3.71)$$

Avec:

$G(\beta)$  diagramme gain de l'antenne en fonction du site  $\beta$ , 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  $\sigma$ , figure (3.23).  $R(\beta)$  est la distance maximale détectable par le radar dans la direction du site  $\beta$  dans les mêmes conditions de  $P_{fa}$  et  $P_d$  et  $\sigma$ .

La couverture  $R(\beta)$  est tracée sur une grille spéciale radar (distance, site et altitude) qui tient compte de la courbure des rayons lumineux.[ 32].

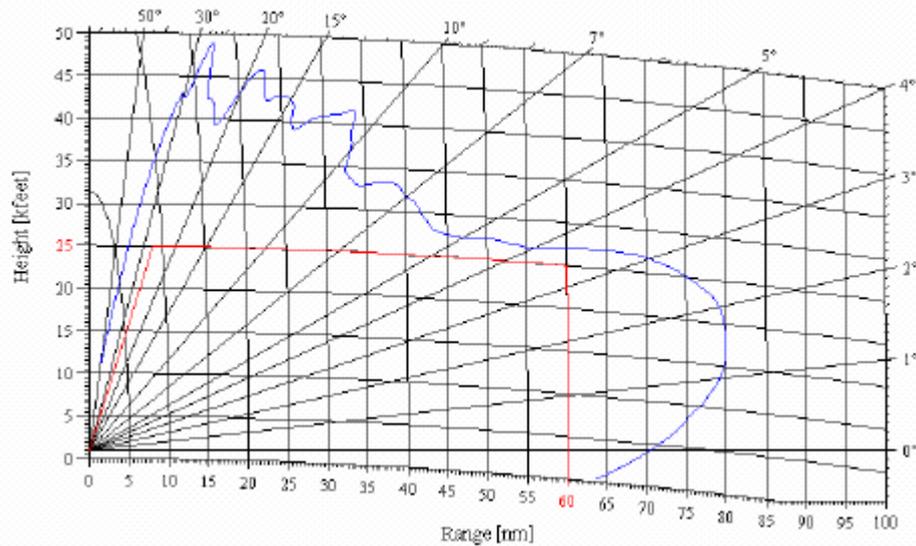


Figure 3.23 : Représente la couverture en site en espace libre.

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, qui est bien présentée dans la figure (3.24).

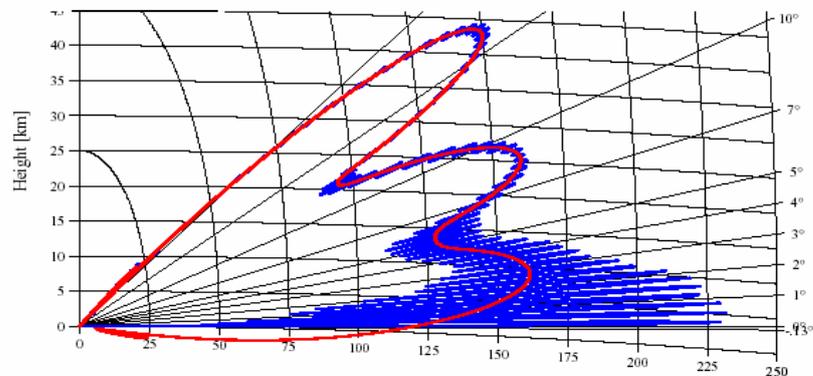


Figure 3.24 : Représente la Couverture en présence du sol

### 3.8 Conclusion

Pour qu'elle puisse se propager l'onde électromagnétique du radar. Elle doit surmonter plusieurs caps. Cette propagation est liée à plusieurs paramètres ; on cite, la puissance de l'émetteur, le gain de l'antenne, les conditions atmosphériques, etc.... . Ceux-ci doivent être bien maîtrisés et manipulés afin d'avoir une propagation de qualité.

## **CHAPITRE 4**

### **CALCULS ET RESULTATS**

#### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de simulation de la couverture radar pour :

- i) Les cinq stations existantes
- ii) Celles qui seront proposées afin de combler les trous de couverture radar en Algérie.

Deux sites seront pris en considération, celui d'Akfadou et Chréa, car, ils répondent aux critères d'installations de moyens de radiocommunications. Dans un souci de réduire les erreurs de simulation de nos couvertures radars, nous utiliserons deux outils différents. Le premier, c'est le logiciel Radio mobile en complément des couvertures radars fournies par le constructeur radar (ALENIA). Dans une deuxième étape, on développera un programme de calcul des mêmes couvertures radars en prenant en considération les effets topographiques.

#### 4.2. Objectifs de l'étude des couvertures radars

Le travail présenté traite la couverture radar pour les besoins de la surveillance du trafic aérien en Algérie. Ce dernier s'inscrit dans le but d'avoir une meilleure intégration du concept CNS/ATM.

L'idéale est d'avoir une couverture totale de l'espace aérien Nord Algérien, pour cela, on propose une étude et simulation d'implantation de nouvelles stations radar sur les sites de Chréa (36° 25' 32"N-002° 52' 36" E) et Akfadou (36° 4' 36" N-004° 37' 15"E). Les résultats obtenus de nos différentes simulations montrent que le site de Chréa est plus adéquat pour combler le trou de couverture radar actuel dans le Nord algérien.

#### 4.3. Les spécifications techniques et les données réelles

Le Système automatique Algérien de Contrôle du Trafic aérien (SAACTA) [33], se compose de cinq (05) stations radars, une station primaire (PSR) co-implantée avec une station secondaire (SSR) et de quatre stations secondaires. De plus, il est composé d'un système de traitement de données radar (RTP & MTP) et d'un système de traitement de données plan de vol (FDP) voir tableau (4.1) & figure (4.1).

Tableau 4. 1 : Les stations radars actuelles et leurs sites d'implantations

Type	Station radar	Site	Les coordonnées (Latitude et Longitude)	Date Mise en Service
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	(36°40' 34.10"N 003° 10' 40.04" E)	Février 2001
SSR	Seraidi	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.

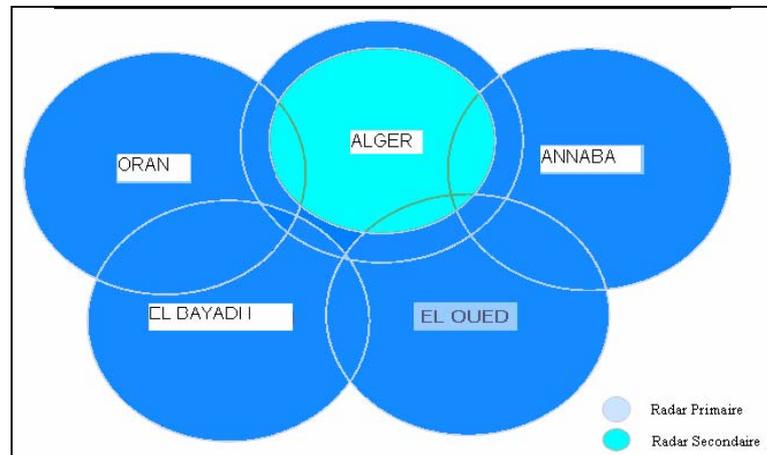


Figure 4.1 : Couverture des cinq sites radars

Chacune de ces stations mentionnées ci-dessus (figure 4.1), incluent un radar de surveillance secondaire mono pulsation (MSSR), tandis que le radar du secteur central inclut en plus du radar secondaire un radar d'approche primaire (PSR). En outre, chaque station radar contient un serveur pour l'entretien (ordinateur de télémaintenance) du radar (RMM) et un processeur de la tête radar (RHP), qui assure la visualisation des données radars (plots radars) et la transition de ces derniers au CCR et un système de contrôle local et de visualisation (CMS).

Les données radars de chaque station sont envoyées, à la fois au centre de contrôle régional (CCR) et à la station d'approche de l'aéroport de la région, voir la figure (4.2).

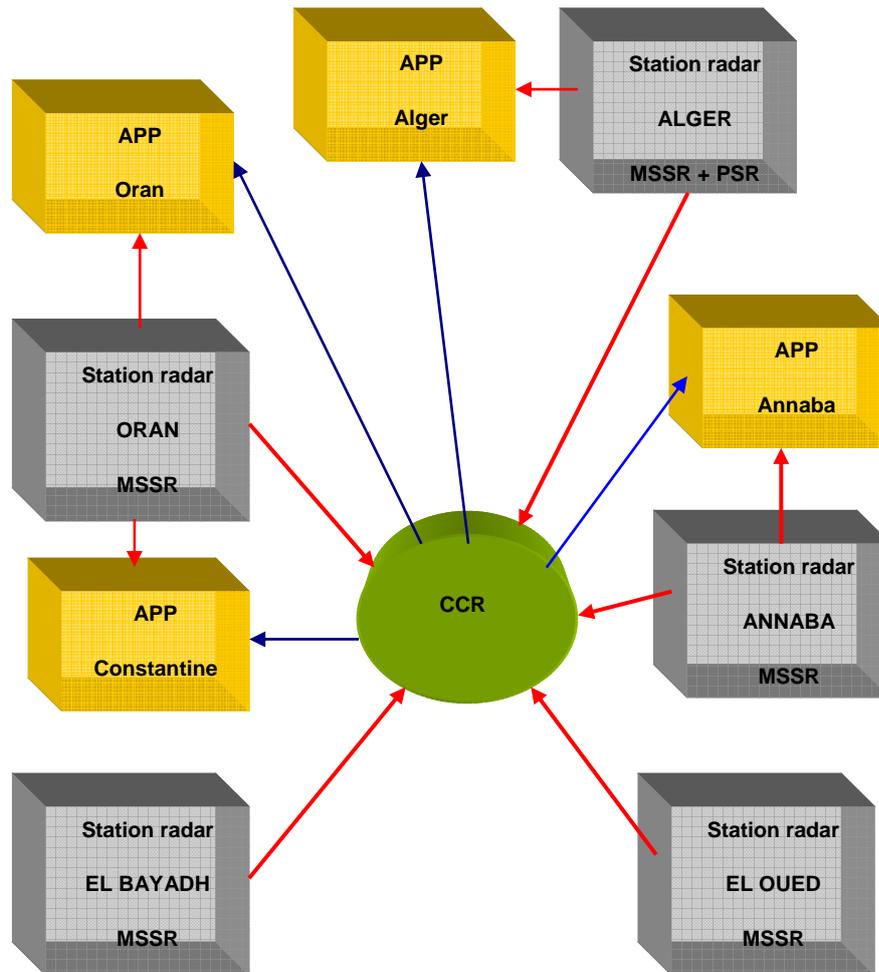


Figure 4.2 : Les stations radars reliées au CCR d'Alger.

#### 4.3.1 Le centre de contrôle régional CCR

Un centre de contrôle est composé de deux grandes salles, la salle technique et la salle d'exploitation. La salle technique regroupe : Une partie système, où elle reçoit des données radar SAACTA des cinq stations radar desservies par dix modems SAACTA, deux modems pour chaque station. La salle d'exploitation quant à elle reçoit ces mêmes données après un deuxième traitement.

- Une baie AMS, où elle reçoit les données radars AMS des cinq stations, sur dix modems AMS, deux modems pour chaque station. Chaque modem est

associé à une carte d'une entrée modem et de deux sorties, vers les CWP de la salle d'exploitation et le RCMS de la salle technique, voir figure (4.3).

- Le RCMS pour le contrôle des états des cinq stations.

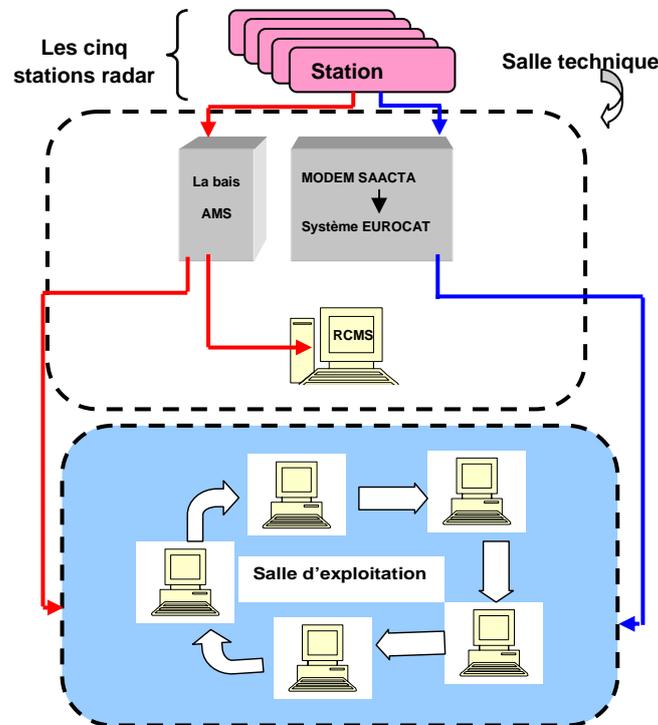


Figure 4.3 : Représentation du centre de contrôle régional (CCR).

#### 4.3.2 La station radar d'Alger

La station radar centrale d'Alger est équipée de plusieurs systèmes, voir ci-dessous. Pour une vision globale, la figure (4.4) [34], schématise la composition de cette station.

- Un système de surveillance radar secondaire mono pulsation (MSSR) avec une portée maximum de 250 NM.
- Un système de surveillance radar primaire (PSR), de portée maximum 80 NM.
- Deux antennes (MSSR et PSR) avec un joint tournant commun;
- 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.

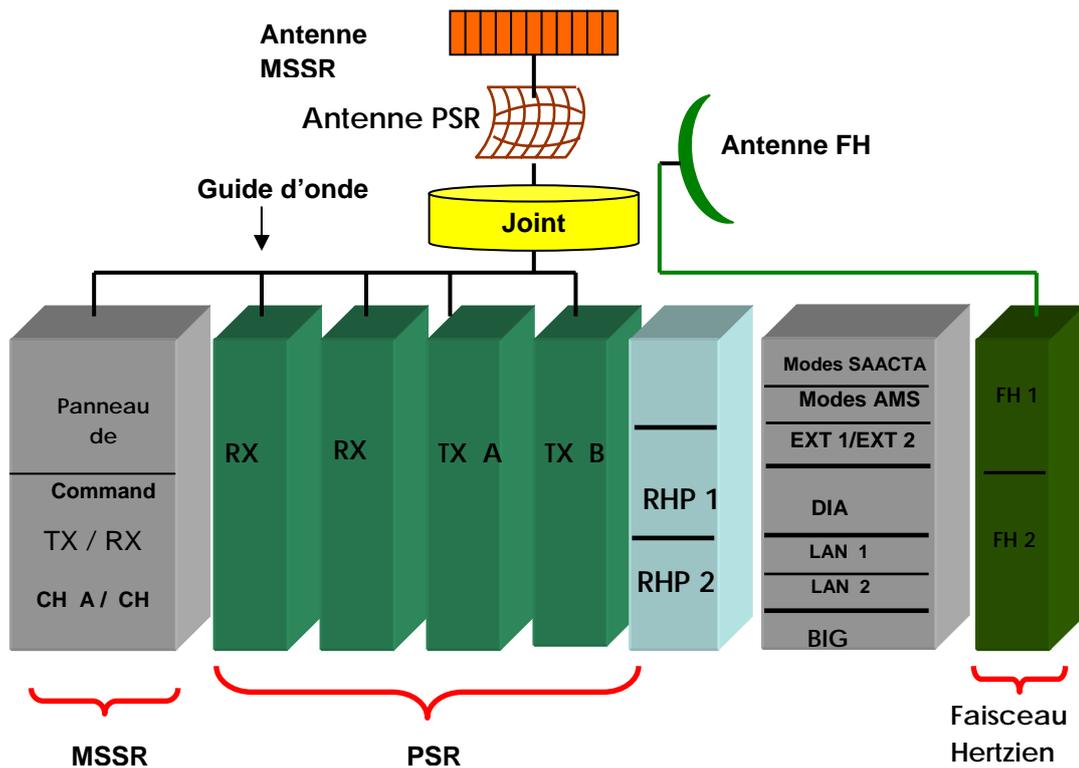


Figure 4.4 : Composition de la station radar d'Alger.

#### 4.3.3 Le flux d'information au niveau de la station

Au niveau de la station d'Alger, les données sont exploitées dans les différents composants du système, de la manière suivante, à savoir :

- Les données brutes, c'est-à-dire les plots représentant les avions détectés par le radar PSR et le radar MSSR sont envoyées au processeur de la tête de radar (RHP) à travers un réseau local (LAN).
- Le RHP manie les plots de PSR, MSSR ou les plots combinés pour produire des tracks locales appliquant un traitement mono radar.

- Les données locales sont transmises au centre de traitement et de visualisations (c'est-à-dire le CCR et l'APP), à travers des moyens de transmissions, comme les lignes téléphoniques, le faisceau Hertzien et fibre optiques.

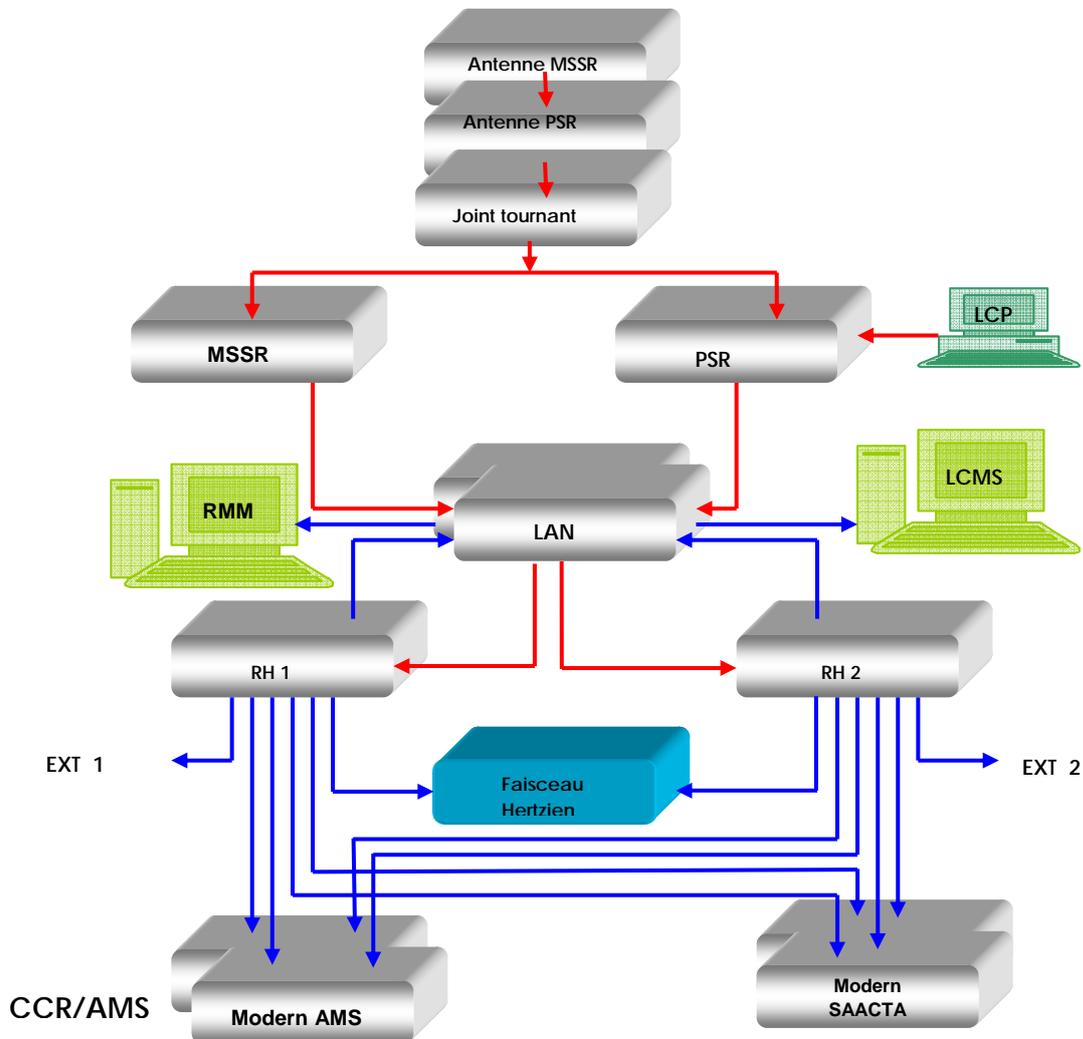


Figure 4.5 : Flux d'information dans la station d'Alger.

#### 4.3.4 L'équation de radar

L'équation de portée du radar est liée, d'une part, aux caractéristiques du radar et aux conditions de détection imposées, d'autre part. Elle est appelée « Équation générale du radar ».[35] Nous allons établir cette équation, pour cela, on considère un radar émettant un signal de longueur d'onde  $\lambda$ , de puissance

crête émise  $P_c$  à l'aide d'une antenne de gain  $G$ , une cible de surface équivalente  $\sigma$  et un signal minimum de détection.

Ce radar aura une portée  $R_{\max}$  correspondant à un signal minimum de détection  $S_{\min}$  par le récepteur. De ces données, l'équation générale du radar en espace libre, est (4.1) :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_c \cdot G_0 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot S_{\min}}} \quad (\text{m}) \quad (4.1)$$

Avec :

$P_c$  : C'est la puissance de crête ;

$G_0$  : est le gain de l'antenne ;

$\lambda$  : est la longueur d'onde ;

$\sigma$  : C'est la surface équivalente de la cible ;

$S_{\min}$  : Signal minimum de détection.

$$S_{\min} = B_0 + B_r$$

$$B_0 = kT_0 \cdot \Delta f$$

$$B_r = kT_e \cdot \Delta f$$

$$\Delta f = 1.2 / \tau$$

Avec  $B_0$  et  $B_r$  respectivement: puissance moyenne de bruit disponible à l'entrée du récepteur et bruit propre du récepteur.

Delà, l'équation de portée d'un radar générale devient sous la forme suivante :

$$R_{\max}^4 = \frac{P_c \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 K(T_0 + T_e)\Delta f} \quad (4.2)$$

## Facteur de bruit

Le facteur de bruit permet d'évaluer l'apport du bruit propre du récepteur. Il présente la dégradation du rapport signal à bruit entre l'entrée et la sortie du récepteur, due à l'apport en bruit de ce dernier :

$$F_B = \frac{(S/B)_e}{(S/B)_s} \quad (4.3)$$

En réalité, pour que la cible soit facilement détectable le niveau du signal utile devra être supérieur au bruit.

$$S_{\min} = B_0 \cdot F_B \cdot F_D \quad (4.4)$$

Donc, l'équation de radar s'écrira sous la forme ci-dessous :

$$R_{\max}^4 = \frac{P_c \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot \tau}{(4\pi)^3 K \cdot T_0 \cdot 1.2 \cdot F_B \cdot F_D} \quad (4.5)$$

Pour améliorer le rapport (signal/bruit) en utilisant un facteur  $g_N$  appelé gain d'intégration. Ce dernier est défini comme le rapport entre le rapport signal/bruit  $R_1$ , nécessaire pour détecter en une seule impulsion une cible et le rapport signal/bruit  $R_N$  nécessaire pour détecter la même cible avec  $N$  impulsions dans les mêmes conditions de détection, soit :

$$G_N = \frac{R_1}{R_N} = \frac{(S/N)_1}{(S/N)_N} \quad (4.6)$$

La portée dans le cas d'une intégration de  $N$  impulsions devient :

$$R_{\max}^4 = \frac{P_c \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot \tau}{(4\pi)^3 K \cdot T_0 \cdot 1.2 \cdot F_B \cdot (S/B)_N} \quad (4.7)$$

## Pertes à l'émission et à la réception

On peut ajouter un autre coefficient  $L_s$  qui englobe les pertes dues au radar. Ces pertes sont occasionnées par les composants des systèmes d'émission et de réceptions. Elles sont citées dans le chapitre 3, section (3.6.2).

En tenant compte des pertes dues au radar, la nouvelle équation du radar devient alors :

$$R_{\max}^4 = \frac{P_c \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot \tau}{(4\pi)^3 K \cdot T_0 \cdot 1.2 \cdot F_B \cdot (S/B)_N \cdot L_s} \quad (4.8)$$

#### 4.3.5 Les caractéristiques de radar

Le tableau (4.2) représente les caractéristiques d'un radar type de surveillance primaire, utilisé pour le contrôle du trafic aérien dans le territoire algérien.

Tableau 4.2 : Caractéristique d'un radar type de surveillance primaire en Algérie. [36].

<b>Bande</b>	<b>L</b>
Fréquence	1250 à 1350 Mhz
Puissance crête	5 Mw
Gain antenne	33.5 dB
Forme du faisceau	Cosec <sup>2</sup>
Balayage	Mécanique
La rotation antenne	12 tr/min
Facteur de bruit	4 dB

Le tableau (4.3) représente l'élévation par rapport au niveau de la mer des 5 cinq stations radars existantes en Algérie, par ailleurs, la hauteur de l'antenne de chaque station est de 30 m, selon les recommandations de l'O.A.C.I.

Tableau 4.3 : Élévation par rapport au niveau de la mer des stations radars algériennes. [37].

Type	Station radar	Site	L'élévation en (m)
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	55
SSR	Seraïdi	Annaba	873
SSR	Murdjadjo	Oran	570
SSR	Guemmar	El Oued	93
SSR	Bouderga	El Bayadh	902

#### 4.4. Élaboration des couvertures radars

##### 4.4.1 Élaboration des couvertures radar via le logiciel Radio mobile

Nous résumons dans le paragraphe suivant, les étapes nécessaires pour l'élaboration des couvertures radar du Nord Algérien à l'aide du logiciel Radio Mobile. C'est un logiciel reconnu par la communauté scientifique du domaine des télécommunications. [38].

Les étapes sont comme suit :

1. Lancer le logiciel Radio mobile (Radio Mobile.exe) ;
2. Choisir une région / site, lieu où, on doit faire l'étude de déploiement des moyens de surveillance, à savoir le radar dans le cas de notre d'étude. Pour rappel, ce dernier moyen de surveillance du trafic aérien fait partie du déploiement du concept CNS / ATM en Algérie.
3. Faire apparaître la grille d'altitude afin de connaître les élévations de chaque point de la région d'étude, comme représentée dans la figure (4.6) ci-dessous.



Figure 4.6 : Acquisition de la grille des altitudes sous Radio mobile pour le nord algérien.

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. On peut avoir aussi, l'élévation du dernier point par rapport au niveau moyen de la mer.

4. Des informations obtenues précédemment, on introduit les propriétés de la station radar à installer. La procédure à suivre est la suivante, là figure (4.7), représente les étapes nécessaires pour une telle démarche.

- On commence par donner le nom de la station en question ;
- On donne alors, l'altitude de cette station ;
- Concernant le positionnement de la station. Il peut s'effectuer de deux manières soit : i) par le placement de la station à la position du curseur, ii) par une méthode classique, à savoir, l'introduction des coordonnées géodésiques de cette position ;
- Choisir les propriétés de la station par exemple : la couleur, le fond et le symbole. L a figure (4.7), reprend ses caractéristiques.

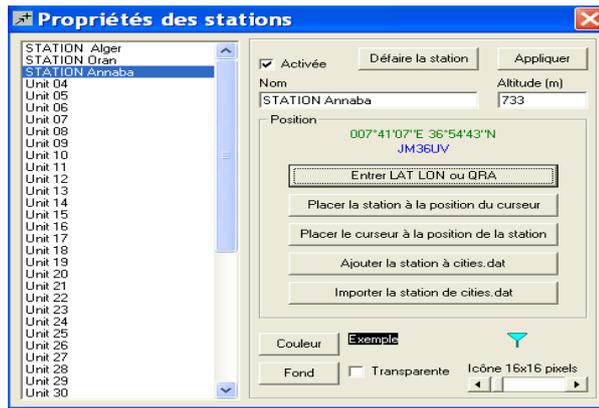


Figure 4.7: Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio mobile.

- Une fois l'étape de la mise en œuvre des paramètres des stations est terminée. On aborde l'étape du traçage des couvertures radars des stations déjà précitées.

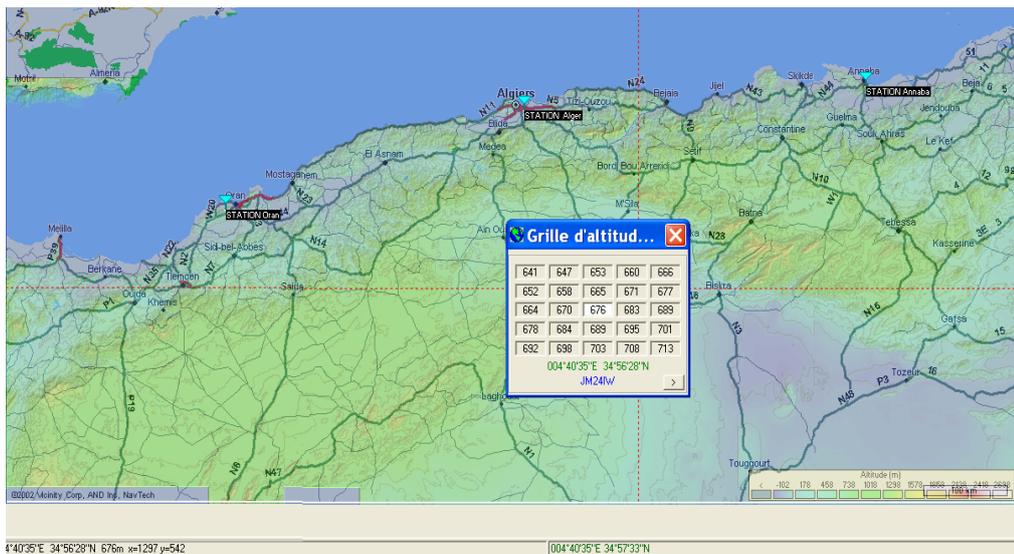


Figure 4.8 : Positionnement des stations radars sous l'environnement Radio mobile.

La figure (4.8) est l'aboutissement des différentes étapes d'élaboration des couvertures radars via le logiciel Radio mobile. Nous remarquons, le positionnement des stations radars concernées à savoir : Oran, Alger et Annaba ainsi que leurs bases de données topographiques.

Après avoir énoncé les différentes étapes de positionnement des stations radars concernées par notre l'étude. Nous résumerons ci-dessous, la procédure à suivre pour les étapes de traçage des couvertures radar, voir la figure (4.9) :

1. Sélectionner la station radar concernée ;
2. Introduire la hauteur du senseur (de l'antenne) par rapport au sol (en mètre) ;
3. Introduire la hauteur de la cible par rapport au sol (en m), c'est-à-dire le niveau de vol sur lequel se trouve les cibles;
4. Donner la valeur du pas de balayage de l'antenne radar, c'est-à-dire l'angle d'azimut en (degré°);
5. Donner la valeur de la portée de l'antenne radar en Kilomètres (Km);
6. Choisir la couleur de la surface de couverture.



Figure 4.9 : L'élaboration des couvertures radars

D'après les étapes citées précédemment, la figure ci-dessous représente la simulation des couvertures radar secondaire des régions d'Alger, Oran et Annaba pour un FL 100.

On remarque la non-couverture radar des régions d'Ain-Oussara, Boussaâda et Biskra.

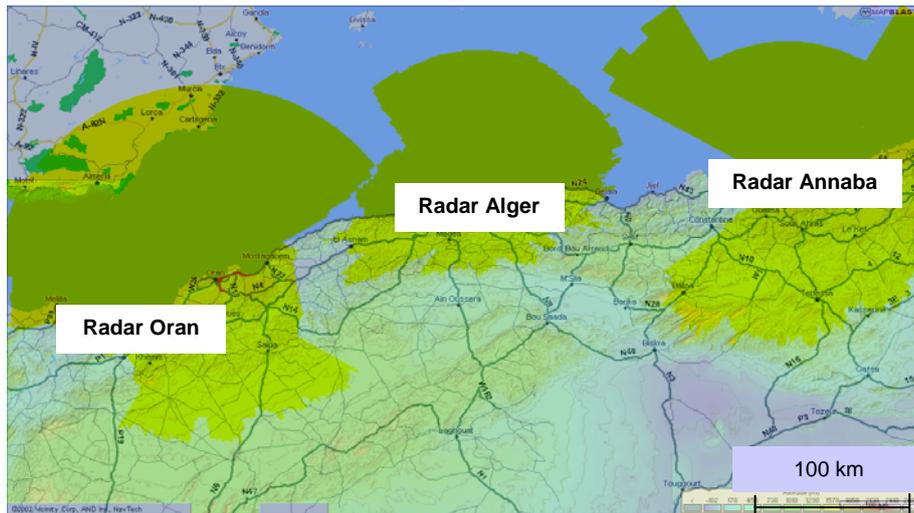


Figure 4.10 : Élaboration des couvertures radars d'Alger, d'Oran et d'Annaba pour FL100.

D'après la couverture radar existante, c'est à dire obtenu par les trois radars du nord du pays [39], en comparaison aussi avec la couverture élaborée par le logiciel radio mobile. On remarque qu'un trou de couverture apparaît pour le niveau de vol FL 100 sur la région de Boussaâda, voir la figure (4.10).

D'ailleurs, c'est la raison pour laquelle on s'est limité uniquement à cette couverture lors de notre étude.

Les figures (4.11) et (4.12) montrent séparément notre proposition d'implantation de deux radars, ceux 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, au niveau de vol bas.

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.

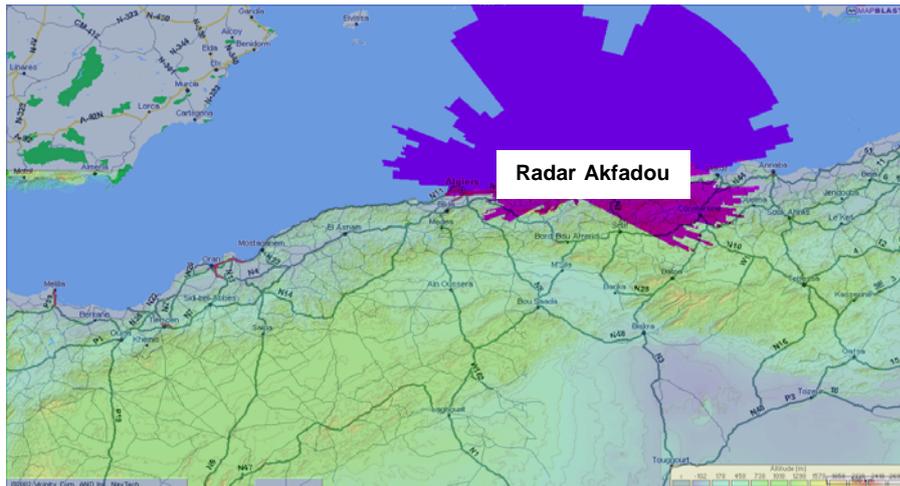


Figure 4.11 : Représentation de la couverture radar à FL100 pour le site AKFADOU.

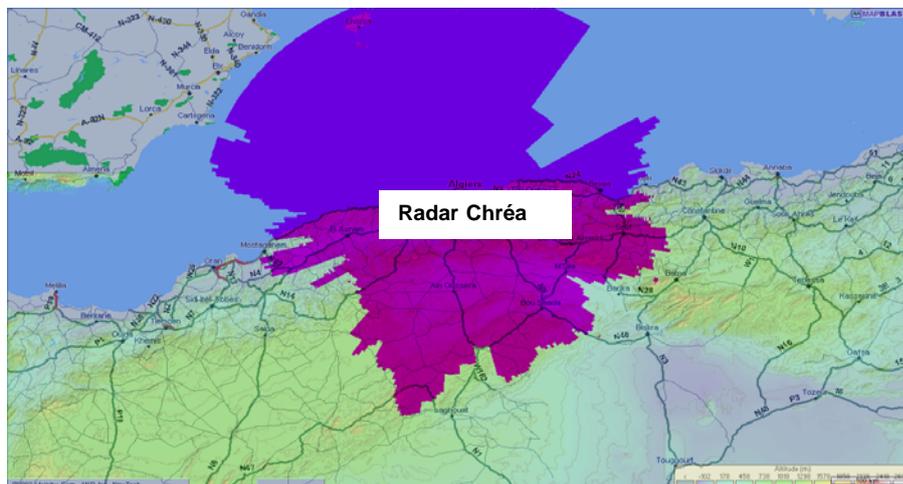


Figure 4.12 : La couverture radar au niveau de vol FL100 pour le site CHREA.

Afin de mieux visualiser la couverture radar du site de Chréa, nous avons reporté les diagrammes de couverture des radars déjà existants, en plus de la nouvelle station proposée (Chr ea).   la lumière des simulations obtenues, le site de Chr ea permet une couverture globale de l'espace aérien algérien nord, voir même une double couverture.

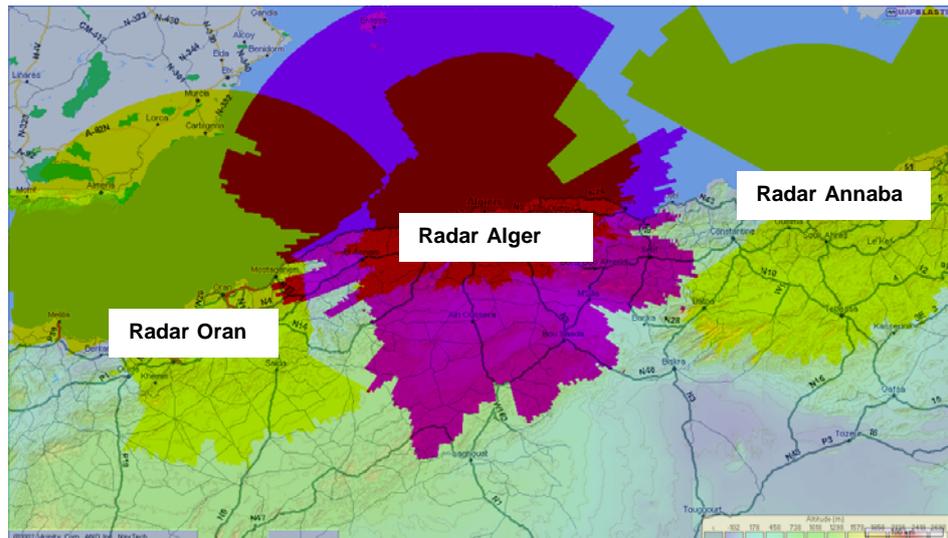


Figure 4.13 : Représente la couverture radar à FL100 pour le site proposé à CHREA.

Concernant cette notion de couverture radar, il existe un paramètre important qui peut avoir une influence directe sur les performances de cette dernière. Ce paramètre consiste en la topographie des zones où se trouveront les radars implantés.

#### 4.4.2. Élaboration des bases de données topographiques

L'élaboration d'une base de données topographique doit commencer premièrement par la délimitation de la surface concernée par la collecte de ces données topographique (latitude et longitude). En deuxième lieu, il faut répertorier l'ensemble des points dominant ou encore les reliefs et chaînes montagneuses de notre pays (Algérie).

Pour réaliser la base de données topographique, nécessaire à notre étude. Nous avons utilisé en parallèle :

- La carte internationale du monde à une échelle de 1/1000000 ; pour la partie nord de l'Algérie, [40].

- Un fichier de données numériques donnant les paramètres altimétriques de l'Algérie [41], à une échelle de 1/500000 avec une équidistance de 328,08 ft.
- Pour confronter nos résultats, nous avons utilisé le logiciel Google Earth disponible sur le net [42]. Deux résolutions ont été utilisées, une de 15 NM pour le nord de l'espace aérien algérien et une seconde de 30 NM pour le sud. Un balayage globale a été réalisé sur une surface (15x15 NM) afin d'avoir le point le plus élevé, c'est-à-dire, l'obstacle le plus pénalisant. Voir figure (4.14).

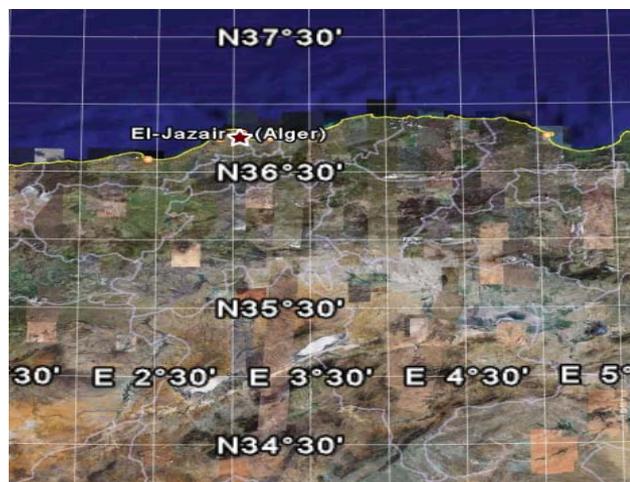


Figure 4.14 : Précision des données topographiques collectées [42]

Après collectes et vérifications, nous retenons uniquement les coordonnées des points pénalisant de chaque zone (latitude, longitude et hauteur par rapport au niveau de la mer).

Cette étape, nous a permis de recueillir environ (1600) points pénalisants sur le territoire national. Leurs traitements se fait sur deux étapes :

1°) La conversion de données (latitude, longitude) en coordonnées cartésiennes (X, Y).

$$X \text{ en degré} = \text{degré} + \text{minute}/60 + \text{seconde}/3600.$$

La même conversion est appliquée pour Y.

Ces résultats vont nous servir à construire une base de données structurées qui contient : (Latitude, longitude) en degrés et la hauteur en mètre.

2°) La projection de ces données sur une carte, et à l'aide d'un outil de dessin cartographique de type (MapInfo). [43] Nous avons pu établir une base de données topographique du territoire de notre pays, voir figure (4.15).

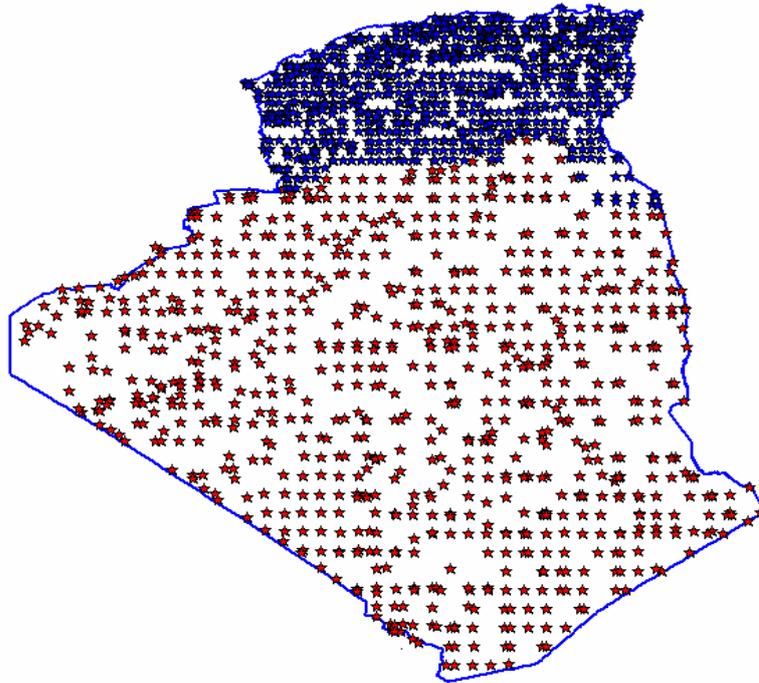


Figure 4.15 : Base de données topographique globale de l'Algérie. [43]

La figure (4.16) donne un aperçu général, sur les étapes entreprises pour la simulation de la couverture radar de l'espace algérien par les deux outils utilisés. S'en suit alors, la comparaison des résultats des deux simulations et enfin la sélection du meilleur site.

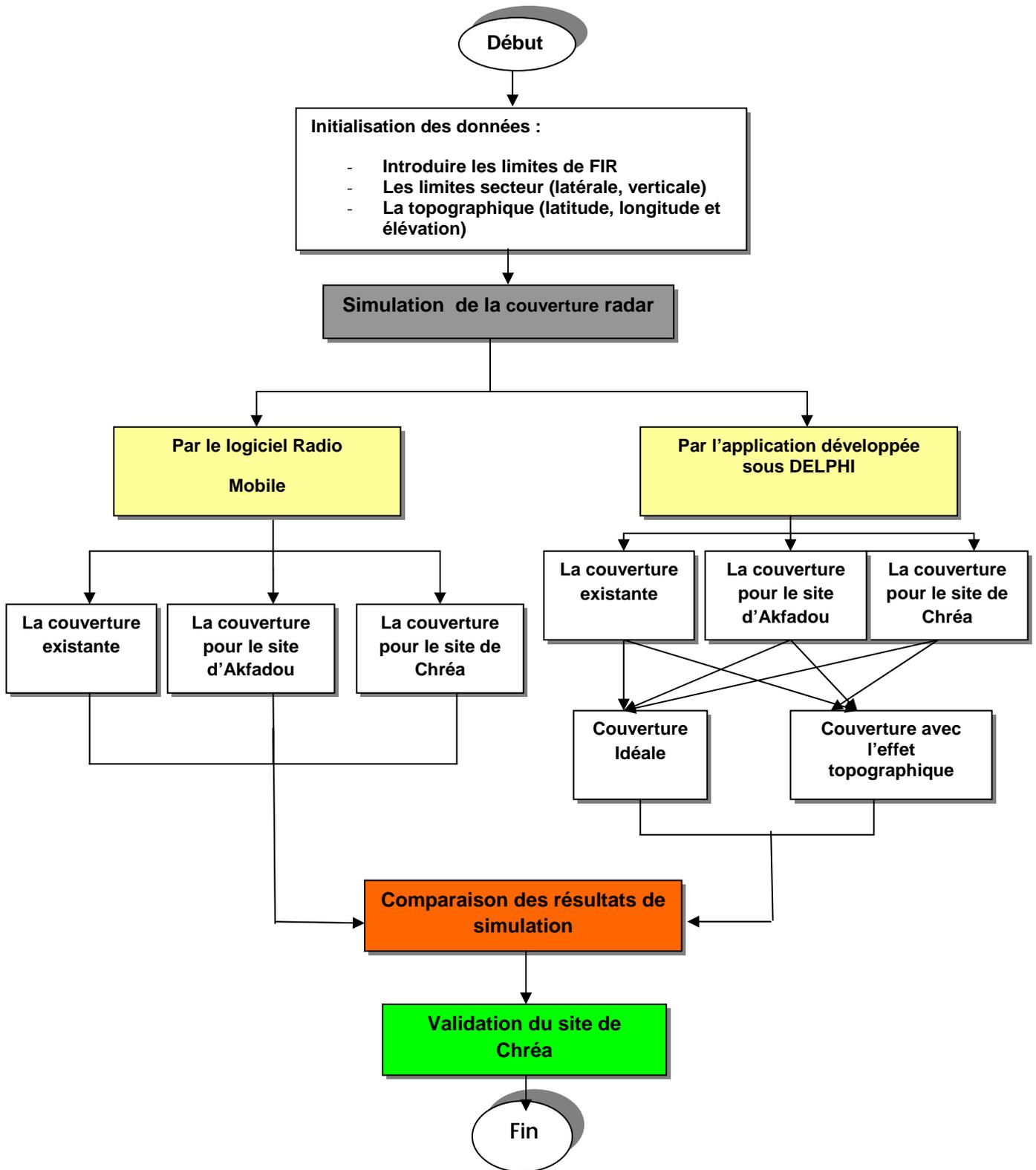


Figure 4.16 : L'algorithme de simulation de la couverture radar

La couverture radar est intimement liée à l'effet du relief, afin de mieux visualiser ce dernier sur la couverture idéale. Nous avons élaboré un programme sous MATLAB. [44]. Il permet de tracer la couverture radar en tenant compte : De la portée du radar et les données de la station (latitude et longitude), voir la figure (4.17).

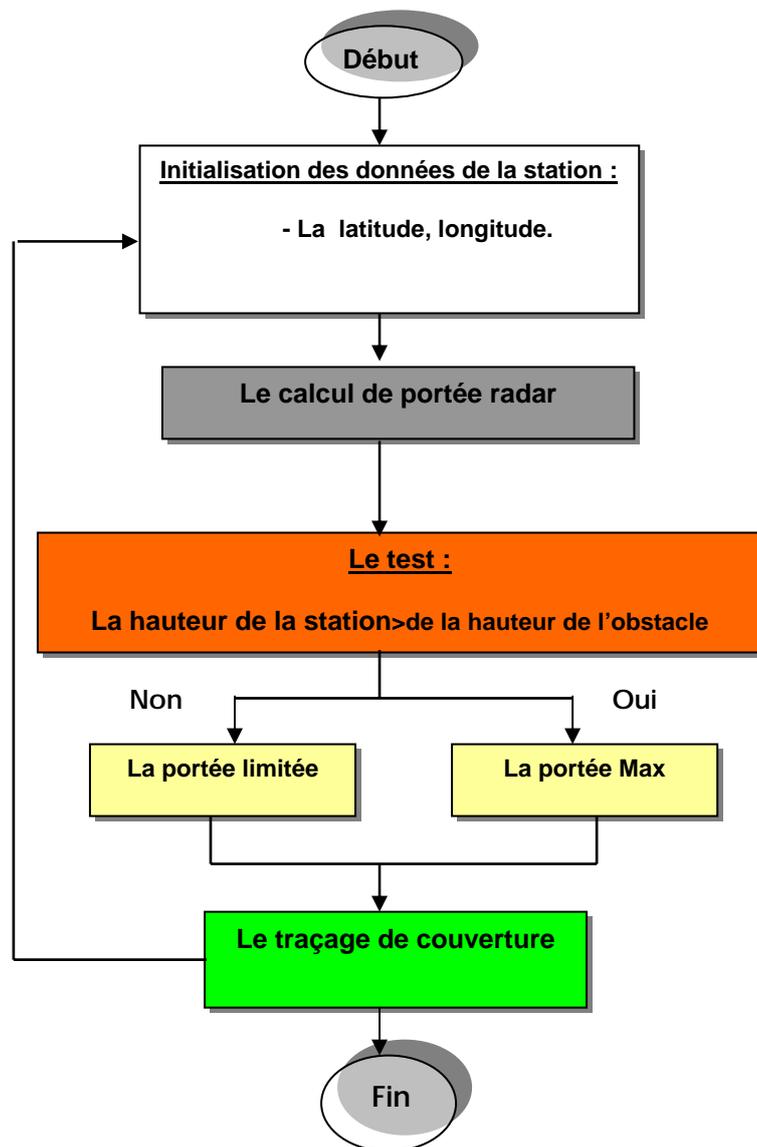


Figure 4.17 : Processus de traçage de la couverture radar.

À titre d'exemple, nous avons positionné une même station radar sur deux hauteurs différentes (800 et 1200 m), nous avons obtenu deux représentations différentes de l'effet du relief sur la couverture radar, figures (4.18 et 4.19).

Les coordonnées de la station sont :

- Latitude  $36^\circ$  ;
- Longitude  $3^\circ$  ;
- Portée radar 200 NM.

**1<sup>er</sup> Cas** : Hauteur de la station (site) par rapport au niveau de la mer : 800 m.

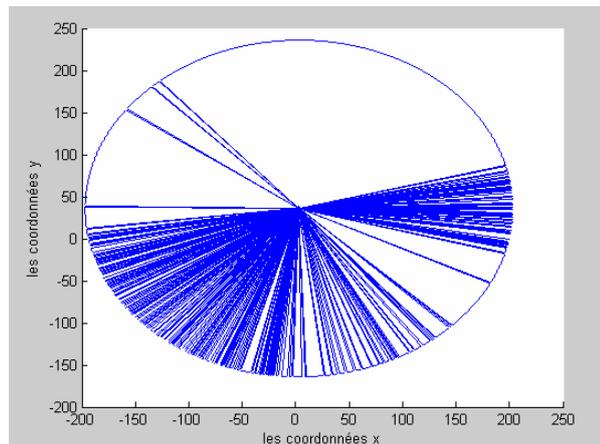


Figure 4.18: L'effet du relief sur la couverture idéale du radar pour  $h=800\text{m}$ .

Sur la figure ci-dessus, on remarque qu'avec la hauteur de 800 m, la couverture radar est insuffisante, à cause des reliefs qui l'entourent. Pratiquement, la moitié du champ de la station radar est obstruée.

**2<sup>ème</sup> Cas** : Hauteur de la station (site) par rapport au niveau de la mer : 1200 m

La même station radar positionnée à une hauteur de 1200 m, nous donne une couverture radar pratiquement globale voir figure (4.19).

En conclusion, nous pouvons affirmer que plus le site de la station radar est élevé par rapport au niveau de la mer, plus la couverture radar est meilleure.

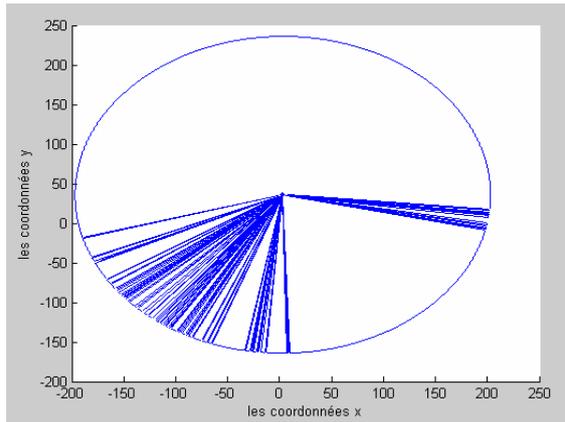


Figure 4.19 : L'effet du relief sur la couverture idéale du radar pour  $h=1200m$ .

#### 4.5. Conception de l'application et des interfaces graphiques

Afin de procéder à une présentation de toutes les stations radars existantes en Algérie ainsi que leurs caractéristiques. Nous avons développé une application sous DELPHI. [45]. Cette dernière nous permet d'une part d'avoir la couverture de toutes les stations, d'autre part, elle nous permet de procéder à différentes comparaisons dans le but d'obtenir la couverture radar idéale. Dans cette étape, nous avons procédé de la manière suivante :

1. On a préparé une carte de l'Algérie avec ses différentes limites terrestres ;
2. Même opération qu'au premier point, mais cette fois avec les limites de l'espace aérien Algérien ;
3. Mise en place, de la sectorisation actuelle (proposée) de la FIR Algérienne ;
4. La projection de la base de données réalisée ;
5. La représentation de la couverture idéale des cinq stations radar actuellement opérationnelles en Algérie.

Après ces différentes étapes, la figure (4.20) qui est une fenêtre du programme élaboré. Cette dernière permet l'affichage de plusieurs données nécessaires à l'implantation des stations radars, à titre d'exemples (limites terrestres, effet topographie, etc.). Ces informations peuvent être obtenues soit indépendamment, soit en groupe.

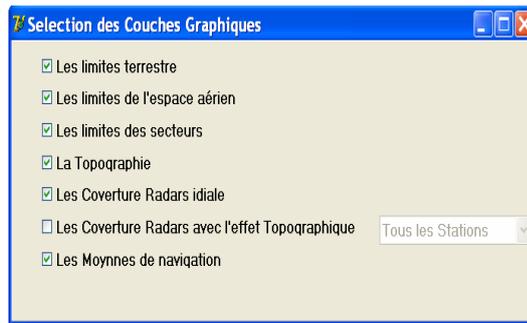


Figure 4.20 : Sélection des informations à afficher.

Concernant la partie sud du pays, il n'existe aucune station opérationnelle pour le moment. On peut prévoir une/plusieurs nouvelles stations, on introduit leurs coordonnées (latitude, longitude, l'élévation de la station, le nom, portée du radar, etc.) comme présentées dans la fenêtre suivante, voir figure (4.21).

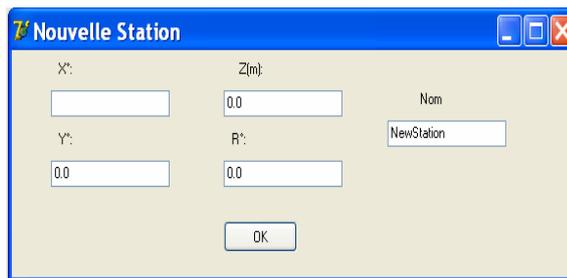


Figure 4.21 : Les informations à introduire pour implanter une nouvelle station radar.

La figure (4.22), représente la couverture idéale des six 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. Cette représentation est obtenue à l'aide du logiciel élaboré.

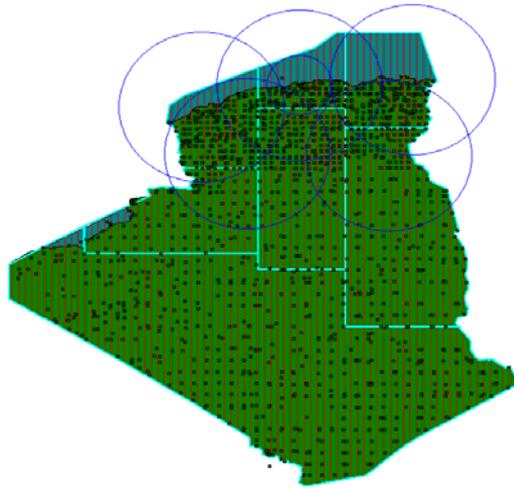


Figure 4.22 : La couverture radar pour cinq stations existantes à la FIR Alger.

#### 4.6. Influence des niveaux de Vol sur la couverture radar.

Généralement, les niveaux de vol standards utilisés par l'entreprise nationale de la navigation aérienne sont : FL 100, FL 200 et FL 300. Ces derniers sont choisis suivants:

- Type de vol ;
- Conditions météorologiques ;
- Type d'aéronef ;
- Densité du trafic aérien.

##### **a) Niveau de vol FL 100**

La figure (4.23) représente la même couverture radar du nord de l'Algérie, en tenant compte cette fois-ci, de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 100. Nous remarquons qu'à ce niveau de vol pour la partie nord de notre pays. D'une part, la couverture radar est insuffisante. D'autre part, la région située au niveau de BOUSSAADA se trouve sans aucune couverture radar.

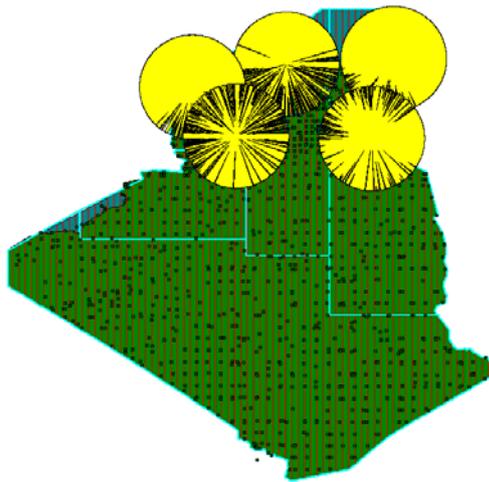


Figure 4.23 : La couverture radar en tenant compte de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 100.

#### **b) Niveau de vol FL 200**

Par contre, si on augmente le niveau de vol à FL 200 en comparaison avec le FL 100. On remarque que la couverture radar est relativement meilleure, malgré la persistance à un degré moindre du trou au niveau de la région de Boussaâda, comme représenté sur la figure (4.24).

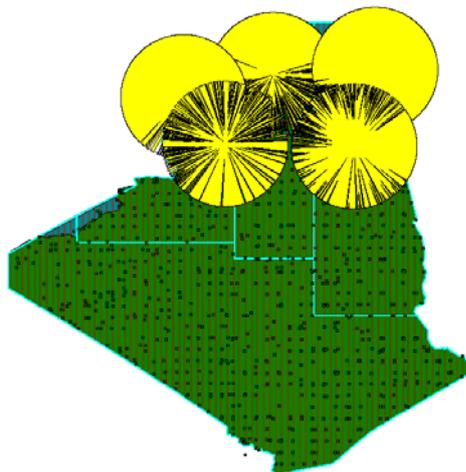


Figure 4.24: La couverture radar en tenant compte de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 200.

### c) Niveau de vol FL 300

Pour un niveau de vol FL 300 et pour les mêmes conditions opérationnelles que pour les deux autres cas cités précédemment. La couverture radar est meilleure avec la disparition quasi complète du trou situé au niveau de Boussaâda.

En conclusion, avec les six stations radars actuellement installées au nord de l'Algérie. La couverture radar est proportionnelle au niveau de vol, plus on augmente le niveau de vol, plus la couverture radar est meilleure. La figure (4.25) représente la couverture radar pour un niveau de vol FL 300.

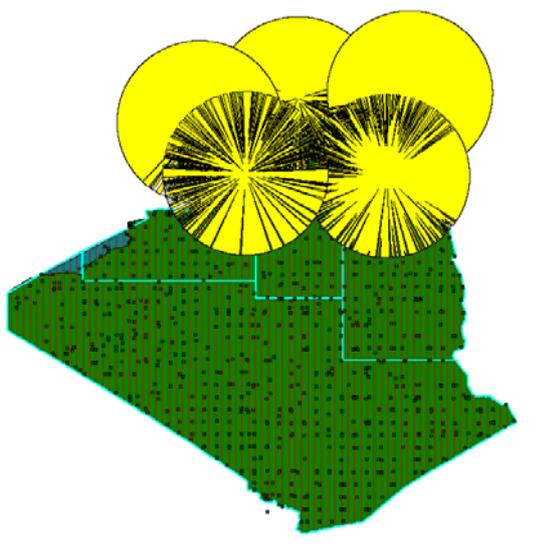


Figure 4.25 : La couverture radar en tenant compte de l'effet topographique pour un niveau de vol FL 300.

#### 4.7 Couverture radar région BOUSSAADA.

L'insuffisance de couverture radar autour de la région de Boussaâda pour des niveaux de vol inférieur à FL 300. La croissance du trafic national et international traversant cette région, voir figure (4.26). [46].

La figure (4.26), représente en rouge les limites exactes de la région de Boussaâda (latitude  $34^{\circ}$  à  $36^{\circ}15'$  N et longitude  $2^{\circ}30'$  à  $6^{\circ}30'$  E), qui n'est pas couverte par les stations radar.

A fait que, l'entreprise nationale de la navigation aérienne (E.N.N.A) réfléchit à l'installation d'une nouvelle station radar qui couvrira cette dernière.

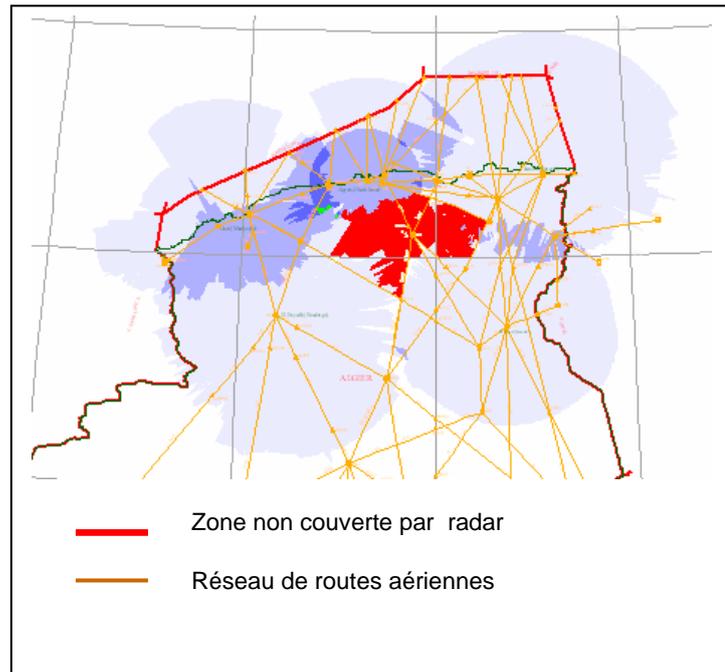


Figure 4.26 : La position de trou de couverture région Boussaâda.

Grâce aux programmes élaborés par nos soins, nous avons pu simuler les différents sites susceptibles de répondre à cette exigence. Deux sites ont été sélectionnés, à cause de leur topographie et leur hauteur par rapport au niveau de la mer, à savoir : (Chrèa et Akfadou).

#### a) Station d'Akfadou.

Après différentes simulations, on constate que la couverture radar assurée par la station AKFADOU est très bonne du côté de la mer, par contre elle est mauvaise à l'intérieure du pays. Voir figure (4.27).

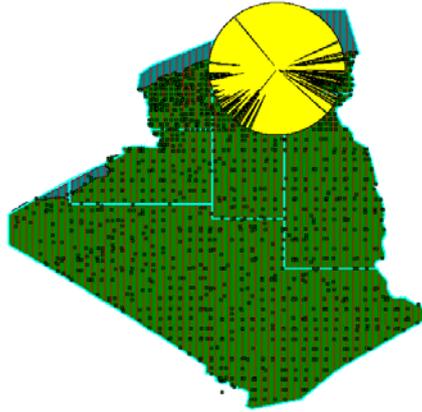


Figure 4.27 : La couverture radar (Station d'AKFADOU).

**b) Station de Chr ea.**

La figure (4.28), nous permet de constater que l'installation d'une station radar   CHREA présente une meilleure couverture radar, tant sur la région de Boussaâda que sur la mer.

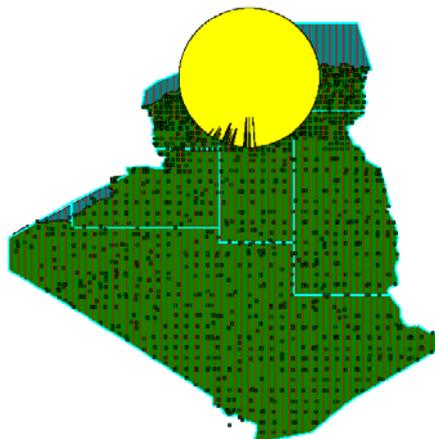


Figure 4.28 : Couverture radar (Station de CHREA).

**c) Couverture radar idéale.**

La figure (4.29) reprend les couvertures des stations radars existantes, en plus de celle de Chr ea que nous proposons. On remarque que la superposition des différentes couvertures radars permet de couvrir la région de Boussaâda, et ce, pour n'importe quel niveau de vol adopté.

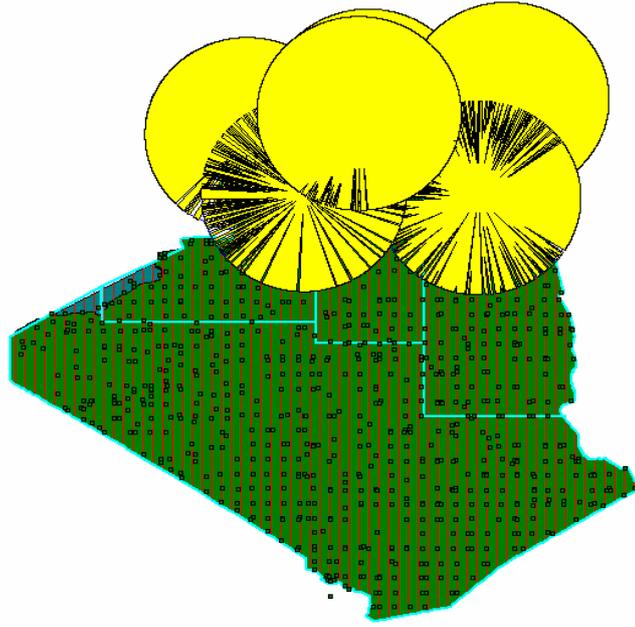


Figure 4. 29 : La couverture radar proposée.

## CONCLUSION

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis d'étudier la problématique de la couverture de l'espace aérien algérien par les moyens CNS-ATM. Ces nouveaux systèmes permettent une interaction très étroite entre le système au sol et les usagers de l'espace aérien.

La gestion du trafic aérien à l'aide de ses moyens 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 installés 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, à savoir: l'ADS, MSSR, 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 radars. 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, à 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 radars 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.

## REFERENCES

1. Rapport de l'ENNA « Les Future Systèmes de Navigation Aérienne. FANS- CNS-ATM » 1994.
2. Annexe 11 à la convention relative à l'aviation civile internationale « Service de la Circulation Aérienne », Treizième édition, juillet 2001.
3. ENNA, service d'information aéronautique (AIP), 2007, d'Alger.
4. Doc 4444, Procédures pour les services de navigation aérienne , « Gestion du trafic aérien », Quatorzième édition, 2001.
5. M.DJAMMALI, « Support à la mise en œuvre de CNS-ATM en AFIMID », Mémoire de fins d'étude 'Master en Exploitation Aéronautique et Gestion du Trafic Aérien,( ENAC promotion Déc 2005).
6. ZITOUNI Nesrine , ELFEKIR Hadia . « Sectorisation de l'espace aérienne Algérien et amélioration du réseau de route », Mémoire d'ingénieur ; Promotion -2008.
7. Document de ENNA, « étude Northrop Grumman », 2001, d'Alger.
8. La carte de croisière de l'Algérie échelle de 1/3000.000.
9. Circulaire d'information aéronautique, AIC série A, JAN 2005.
10. [http://www.enna.dz/Vhf\\_Radar.htm](http://www.enna.dz/Vhf_Radar.htm).
11. Le projet de TRAFCA en Algérie l'année 2000.
12. ENNA, Bulletin des statistiques, Année1998- 2007.

13. Article, Examen du rapport de l'équipe de travail sur la mise en œuvre de CNS- ATM dans la région AFI ((APIRG /15 )), Nairobi ,kenya ,26-30 sep 2005 .
14. P. CAISSO, « Sécurité des nouvelles technologies et des futurs concepts Embarqués de maintien des séparations entre avion », Journée d'Etude STNA 3ES ONERA -Toulouse 27 janvier 2005.
15. DJEDID Abdelaziz, « Application du concept RNP à la route RNAV en Algérie », Mémoire d'ingénieur. Promotion -2006.
16. AFI Planning and Implementation Regional Group, Thirteenth meeting APIRG/13, ICAO, Sal, Cape Verde, 25-29 Juin 2001.
17. Rapport APIRG/13, « Plan AFI de la mise en oeuvre du CNS-ATM (1999-2015) », Doc 003, 5ème Edition, Janvier 2000.
18. D. SOTIROVSKI, "Anatomy of a CNS/ATM System", 14 March, 2002.
19. Circulaire 308 de L'OACI, « Prévisions du trafic et autres prévisions à Moyen et à long terme », 2007.
20. Circulaire 304 de L'OACI Prévisions à l'horizon 2015, Edition 2007.
21. AIP CANADA sur des procédures internes « aides à la navigation Aéronautique », CPI 2204.1<sup>er</sup> août 2001.
22. Navy Electricity and Electronics Training Series Module 18—Radar Principles NAVEDTRA 14190, SEPTEMBER 1998.
23. Faul F. Combes, « ondes métriques et centimétriques ».Université Paul sabatier (Toulouse).3eme Edition.
24. L.CADORET, « Technique Radar Appliquée » tome 1, ENAC, 3eme Edition 1981.

25. L.THOUREL. « Initialisation Aux Techniques Modernes Des Radars », Sup aéro N° :d'édition 95.
26. [Http: // www .radar.basique .org](http://www.radar.basique.org).
27. C. Fabrice, « Détection, Localisation, et Identification de cibles radar par imagerie Détection, électromagnétique bistatique », Université de Bretagne occidentale (Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs des Etudes et Techniques d'Armement), l'année 2005.
28. J.Philippe, H. philippe. LACOMME, « Radars Aéroportés et Spatiaux ». Edition 1995.
29. M. CARPERTIER, « Radars Bases Modernes 6eme Edition 1990.
30. Revue de l'ENAC, « Principes Radar primaire » LR.1993.page 9
31. A. MORONI, « Basic of Modern Radar Techniques,(Alenia).
32. B.LABOZZETTA, « Civil Radar System Division Customer Training »2000.
33. Le projet TRACA, partie SAACTA Projet SAACTA Algérie, « projet de mise en oeuvre du contrôle radar dans la FIR Algérie », CIA série NR 02 / 06 - 19 JAN 06.
34. Rapport d'activité de ENNA 2001.
35. H .CARPERTIER, « Radars Bases Modernes ».Masson paris milan Barcelon 1990.
36. Manuel d'utilisation, Alenia 2001.
37. Siting Report, Alenia Marconi Systems, E195-01-0950RT Rev.B, Date 30/09/1999.
38. Radio Mobile Freeware by VE2DBE, [www.cplus.org/rmw/english1.html](http://www.cplus.org/rmw/english1.html). (Email: [arjun\\_gps@yahoo.com](mailto:arjun_gps@yahoo.com)).

39. <http://www.sia-nna.dz/PDF/AIP/AD/AD2/.pdf>, 2008.
40. La carte internationale du monde à une échelle de 1/1000000.
41. Base de données topographique.INC échelle de 1/500000.
42. Google Earth. Version 4.3.
43. MapInfo, Version 7.5.
44. MATLAB, Version 7.0.
45. DELPHI, Version 7.
46. Article de ENNA, « Présentation de couverture radar mars 2003 ».

**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 la circulation aérienne.
CCR	: Centre de contrôle régional.
CA	: Circulation aérienne.
CNS	: Communications 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 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.

**APPENDICE B**  
**LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS**

$\vec{z}$	: La direction de propagation.
$\vec{E}$	: Le champ électrique.
$\vec{H}$	: Le champ magnétique.
$\varepsilon$	: La permittivité.
$\mu$	: La perméabilité.
$\sigma$	: La conductivité.
$\rho$	: La densité volumique des charges électriques.
$\vec{D}$	: L'excitation du champ électrique.
$B$	: L'excitation du champ magnétique.
$j$	: La densité de courant.
$\omega$	: La pulsation.
$\nabla$	: Opérateur gradient.
$\alpha$	: Est la constante d'atténuation.
$\gamma$	: La constante de propagation.
$\beta$	: La constante de phase.
$c$	: La vitesse de propagation.
$f$	: La fréquence.
$T$	: La période.
$\lambda$	: La longueur d'onde.
$Z$	: L'impédance d'onde.
$P_z$	: L'énergie transportée par l'onde.
$\lambda_0$	: La longueur d'onde un milieu infini.
$\lambda_g$	: La longueur d'onde à l'intérieur du guide.
$\lambda_c$	: La longueur d'onde de coupure.
$\tau$	: 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 $R_{\min}$ (distance aveugle).
$TMES$	: Temps de mise en service du récepteur.
$H$	: l'hauteur de l'avion par rapport de la terre.
$R_T$	: Le rayon de la terre.
$\beta$	: L'angle de site.
$v_r$	: La vitesse radiale.
$\Delta R$	: La résolution en distance.
$\Delta f$	: 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.
$\sigma$	: 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.

## APPENDICE C-1

Tableau1.4 : Evolution du Trafic Aérodrome 1998-2007.

<b>L'année</b>	<b>Trafic National</b>	<b>Trafic International</b>	<b>Trafic commercial</b>	<b>Trafic non commercial</b>	<b>Trafic total</b>
1998	59843	18661	78504	44611	123115
1999	58893	19530	78423	50916	129339
Var 99/98	-1.613%	4.656%	-0.103%	14.133%	5.055%
2000	76669	22915	99584	53240	152824
Var 2000/99	30.18%	17.332%	26.983%	4.564%	18.157%
2001	116609	28351	144960	47635	192595
Var 01/00	52.09%	23.721%	45.565%	-10.527%	26.02%
2002	109315	31518	140833	55624	196457
Var 02/01	-6.255%	11.17%	-2.846%	16.771%	2.005%
2003	62837	31507	94344	55894	150238
Var 2003/2002	-42.51%	0.034%	-33.010%	0.485%	-23.52%
2004	58600	33699	92299	56884	149183
Var 2004/2003	-6.742%	6.957%	-2.167%	1.771%	-0.702%
2005	55888	35900	91788	57333	149121
Var 2005/2004	-4.627%	6.531%	-0.553%	0.789%	-0.04%
2006	52816	36380	89196	58720	147916
Var 2006/2005	-5.496%	1.337%	-2.823%	2.419%	-0.808%
2007	51293	38627	89920	60365	150285
Var 2007/2006	-2.883%	6.17%	0.811%	2.80%	0.016%

## APPENDICE C-2

Tableau1.5 : Evolution du Trafic de Route 1994-2007.

	Nationaux	Internationaux	Survols sans escale	Vols spéciaux	Total
1994	30741	21369	27328	13472	92910
1995	32510	17430	27386	14875	92201
Var%95/94	5,8	-18,4	0,2	10,4	-0,8
1996	31661	17045	28449	15498	92653
Var%96/95	-2,6	-2,2	3,9	4,2	0,5
1997	35222	18914	28606	14613	97355
Var%97/96	11,2	10,1	0,5	-5,7	5,1
1998	30887	19393	32722	13277	96279
Var%98/97	-12,3	2,5	14,4	-9,1	-1,1
1999	43691	28629	34173	14984	121477
Var%99/98	41,5	47,6	4,4	12,8	26,2
2000	54027	33242	35010	12040	134319
Var%00/99	23,6	16,1	2,4	-19,6	10,6
2001	61657	39925	33444	12480	147506
Var%01/00	14,1	20,1	-4,5	3,6	9,8
2002	51343	54562	33774	13101	152780
Var%02/01	-16,7	36,6	0,1	4,1	3,6
2003	47506	38440	36581	13241	135768
Var%03/02	-7,5	-29,5	8,3	1,1	-11,1
2004	51162	36144	41310	13149	141765
Var%04/03	7,7	-5,1	12,9	-0,7	4,4
2005	46032	36187	44957	15004	142180
Var%05/04	-10,1	0,1	8,8	14,1	0,3
2006	57952	43758	49470	15800	166980
Var%06/05	25,9	20,01	10,03	5,3	17,4
2007	58836	45404	54268	16000	174508
Var%07/06	1,5	3,8	9,7	1,3	4,5
Var%moy	<b>6,3</b>	<b>7,9</b>	<b>5,5</b>	<b>1,7</b>	<b>5,3</b>

### APPENDICE C-3

Tableau1.6 :l'évolution de trafic par secteur entre 2002-2007.

Secteurs	2002	2003	Var% 03/02	2004	Var% 04/03	2005	Var% 05/04	2006	Var% 06/05	2007	Var% 07 /06
<b>Secteur Centre</b>	88528	71619	-19,1	47434	-34	46966	-1	47000	0,89	47500	0,01
<b>Secteur Est</b>	55288	50480	-8,7	53755	6,5	59272	10	59500	0,003	58000	-0,02
<b>Secteur Sud Est</b>	43607	42886	-1,6	45888	7	47046	2,5	47700	0,01	48877	0,02
<b>Secteur Ouest</b>	40046	34598	-13,6	32873	-5	35178	7	35800	0,01	37090	0,03
<b>Secteur Sud Sud</b>	32778	33133	1,1	38906	17,4	41499	6,7	42400	0,02	43999	0,03
<b>Secteur Sud Centre</b>	33544	28763	-14,2	33479	16,4	32289	-3,5	33400	0,03	34877	0,04
<b>Secteur Sud Ouest</b>	8236	6948	-15,6	12324	77,4	13279	7,8	14600	0,09	14800	0,01
<b>Total</b>	302027	268427	-11,1	264659	-1,4	275529	4,1	2804000	9,17	285143	0,9

## APPENDICE D

Les indicatifs des Aérodrômes d'Algérie.

ID	Nom/Localité desservie
DAAD	BOUSAADA
DAAE	BEJAIA/Soummam-Abane Ramdane
DAAG	ALGER / Houari Boumediene
DAAJ	DJANET/Tiska
DAAP	ILLIZI/Takhamalt
DAAS	SETIF / 8 MAI 45
DAAT	TAMMANRASSET/Aguenar
DAAV	JIJEL/Ferhat ABBAS
DABB	ANNABA/Rabah Bitat
DABC	CONSTANTINE/Mohamed Boudiaf
DABS	TEBESSA/Cheikh Larbi Tébessi
DABT	BATNA/Mostépha Ben Boulaid
DAOB	TIARET/Abdelhafid Boussouf Bou Chekif
DAOF	TINDOUF
DAOI	CHLEF
DAON	TLEMCEN/Zenata-Messali El Hadj
DAOO	ORAN/Es Sénia
DAOR	BECHAR/Boudghene Ben Ali Lotfi
DAOV	GHRISS
DATG	IN GUEZZAM
DATM	BORDJ MOKHTAR
DAUA	ADRAR/Touat-Cheikh Sidi Mohamed Belkebir
DAUB	BISKRA/ Mohamed KHIDER
DAUE	EL GOLEA
DAUG	GHARDAIA/Noumérat-Moufdi Zakaria
DAUH	H.MESSAOUD/Oued Irara-Krim Belkacem
DAUI	IN SALAH
DAUK	TOUGGOURT/Sidi Mahdi
DAUO	EL OUED/Guemar
DAUT	TIMIMOUN
DAUU	OUARGLA/Ain Beida
DAUZ	ZARZAITINE/In Amenas