

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Aéronautique

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN AERONAUTIQUE**

Option : Installation

THEME

**COUVERTURE DE LA COMMUNICATION VHF POUR LA
MISE EN ŒUVRE DE CONCEPT CNS/ATM EN ALGERIE**

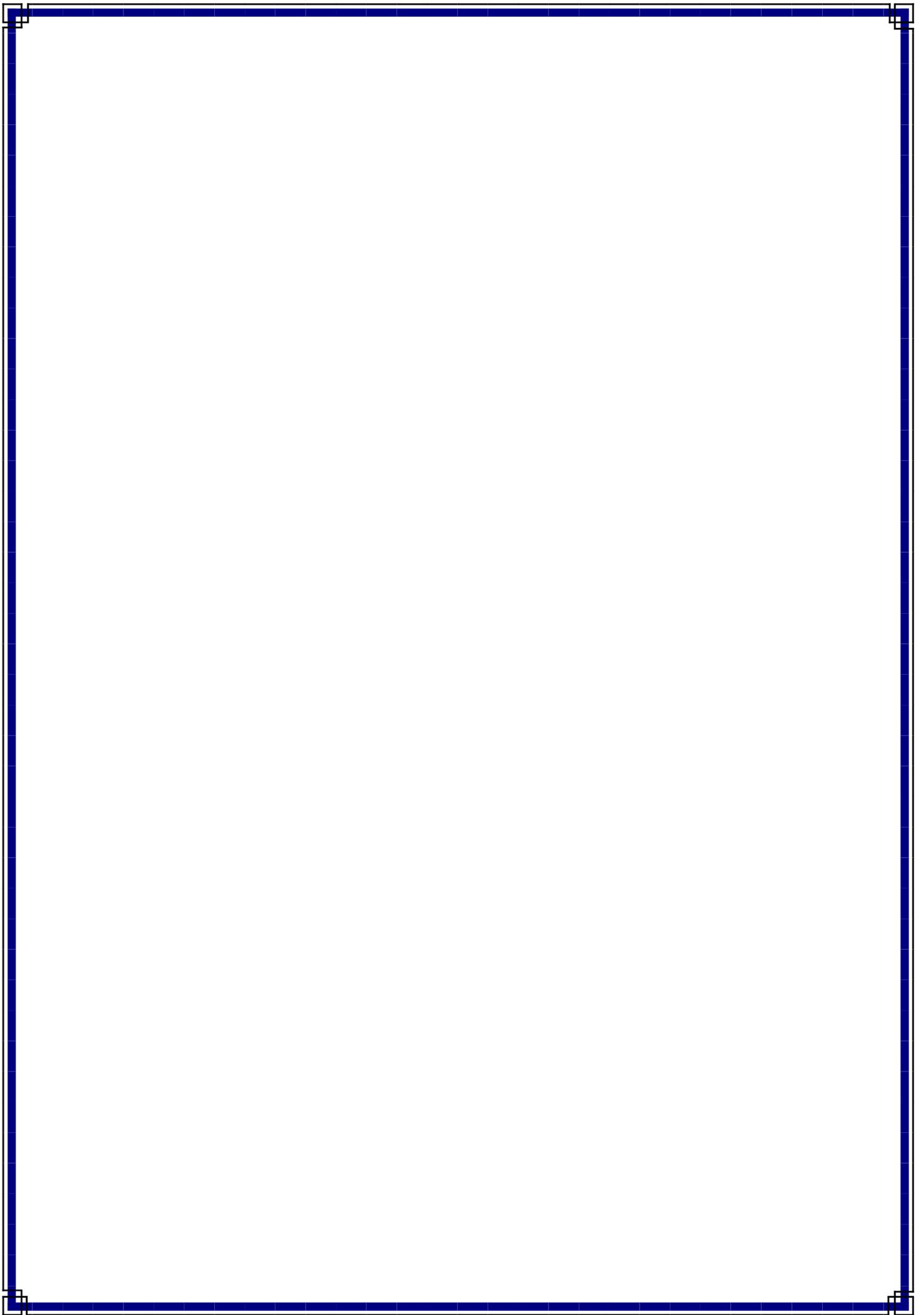
Par

MESSAADI Salah

Promoteur : M. **Lagha mohand**

Co-promoteur : M. **Zabot Amar**

Blida, Juillet 2011



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

A La Mémoire De Ma chère Maman Et A Mon Très Chèr Papa, Engage de la patience et du sacrifice dont ils ont fait preuve tout au long de mon cursus universitaire.

A mes très chères sœurs Radia et Imene

A toute la famille MESSAADI ET BENGHIDA.

A tous mes amis du monde de l'Aéronautique

A mon très cher frère, collègue et ami Belhadia Badr Eddine et sa famille

A mes chers amis aussi Ben Ammar Ahmed Chawki, Sadok Bilal, Larouci Amine

A toute la promotion 2011 du D.A.B.

A tous ceux qui connaissent SALAH.

*Sans oublier les gens du Bloc 02, avec qui j'ai passé les meilleurs moments
Majid, Pika, Lyes, Major, Fethi, Rachid et tous ceux que je n'ai pas cité.*

Je dédie le fruit de toutes mes années d'études.

M. Salah



Résumé

Mon projet de fin d'étude parle sur la couverture VHF en Algérie au concept CNS/ATM dans le but de faire une bonne installation des système sol pour augmenté la sécurité .

Sammury

My final project study speaks of VHF coverage in Algeria in the CNS / ATM concept in order to install a good ground system for increased security.

▪

المشروع النهائي يتحدث عن التغطية VHF
المفهوم تثبيت نظام أرضية جيدة زيادة الأ CNS / ATM.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	
CHAPITRE I : L'espace Aérien Algerien	
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 GENERALITES SUR LES ESPACES AERIENS	3
I.2.1 Division de l'espace aérien.....	3
I.2. 2 Classification des espaces aériens	6
I.2.3 Optimisation de l'espace aérien	6
I.3 SITUATION ACTUELLE DE L'ESPACE AERIEN ALGERIE	7
I.3.1 Introduction	7
I.3.2 Division de l'espace Aérien Algérien	8
I.3.3 Les zones déléguées à l'approche	10
1.4 MOYENS DE COMMUNICATION, NAVIGATION, SURVEILLANCE EN ALGERIE	13
1.4.1 Communication	13
1.4.2 Navigation	14
1.4.3 Surveillance	15
1.5. ANALYSE DE TRAFIC AERIEN EN ALGERIE.....	17
1.5.1 Introduction	17
1.5.2 Evolution du trafic aérodomes (1998-2007) (Appendice C-1).....	18
1.5.3 Evolution du trafic de route de 1994 à 2007 (Appendice C-2).....	19
1.5.4 Evolution du trafic par Secteur de 2002 à 2007.....	19

CHAPITRE II :

SOMMAIRE

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.

Introduction générale

INTRODUCTION

L'Algérie couvre une superficie de 2.37 M km². Elle occupe une position stratégique entre l'Europe et l'Afrique subsaharienne. En moyenne, 300.000 avions fréquentent annuellement son espace aérien. Plusieurs paramètres rendent évidente la décomposition de cet aérien en deux grandes parties Sud et Nord. Parmi ses paramètres, on peut citer : l'étendue géographique, les conditions climatiques, le volume et la complexité du trafic aérien [1]

Dans 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 VHF 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

Introduction générale

souffrent de beaucoup de contraintes. Notre but est de réaliser 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 VHF 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 communication en Algérien. On termine notre étude par une conclusion générale.

Chapitre I : l'espace aerien Algerien.

I.1 Introduction

Depuis le 17 décembre 1903, date à la quelle 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'avion 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.

I.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 étapes de vol et selon ces derniers interviennent les services de la circulation aérienne.

I.2.1 Division de l'espace aérien

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.

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 supérieur spécifiée.

Les limites latérales d'une zone de contrôle sont d'au moins 9.3 Km (5NM) à partir du centre de l'aérodrome ou des aérodromes concernés. Les CTR sont destinées à englober les trajectoires de décollage, d'atterrissage et de la circulation aérienne d'aérodrome Figure (1.3).

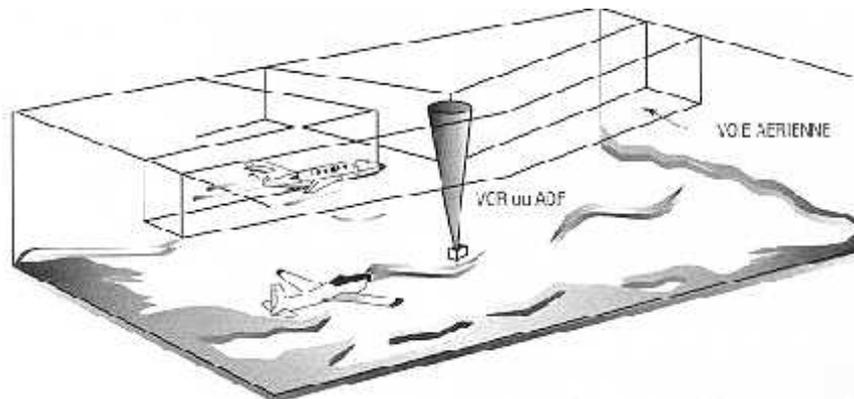


Figure I.1 : Les voies aériennes.

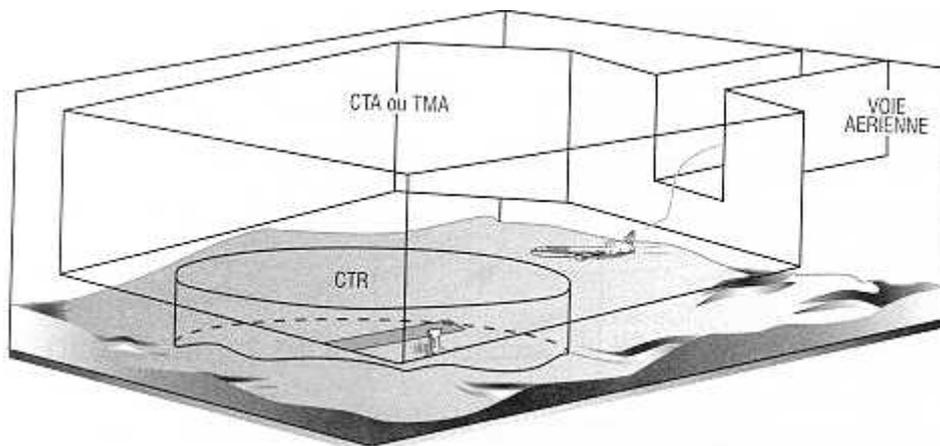


Figure I.2 : La structure CTA et CTR.

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.

I.2. 2 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, on effectue des vols en régime VFR a cause de la météo . 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.

I.2.3 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.

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].

	Le niveau de vol FL	La conversion en Km
FL430*		
FL410	410	12.4968
FL390	390	11.8872
FL370	370	11.2776
FL350	350	10.668
FL330	330	10.0594
FL310	310	9.4488
FL290	290	8.8392
FL280*		

Figure I.3 : Niveaux de Croisières RVSM

I.3 Situation actuelle de l'espace aérien Algérie

I.3.1 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).

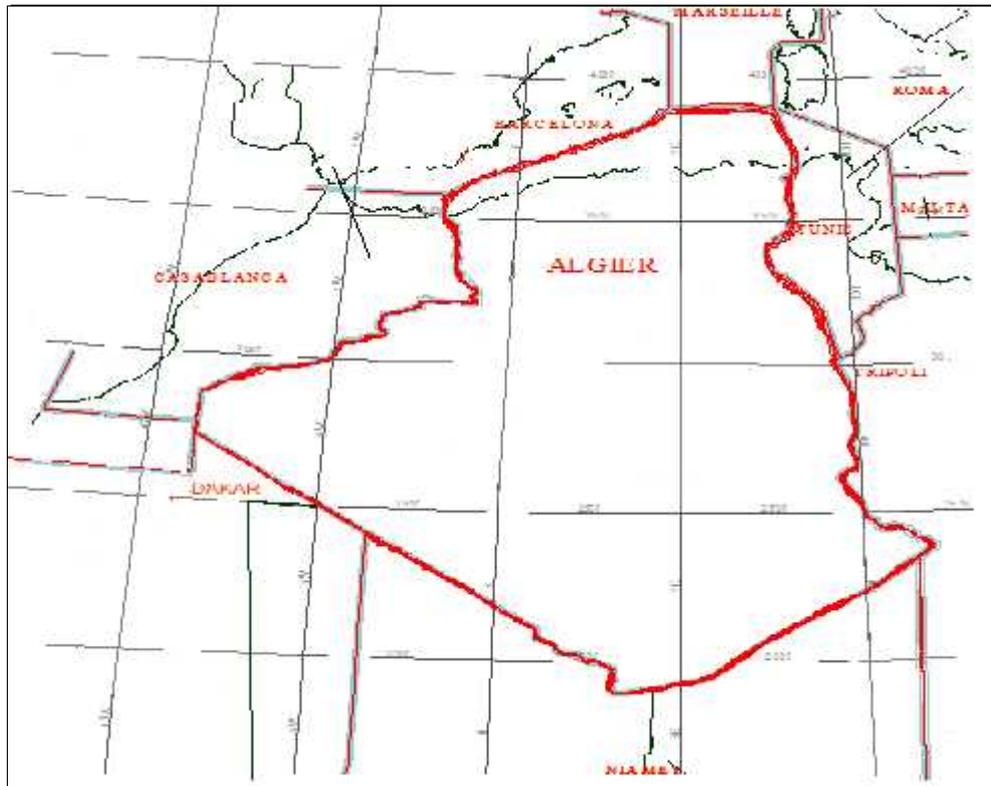


Figure I.4 : Représentation des limites de l'espace aérien algérien.

I.3.2 Division de l'espace Aérien Algérien

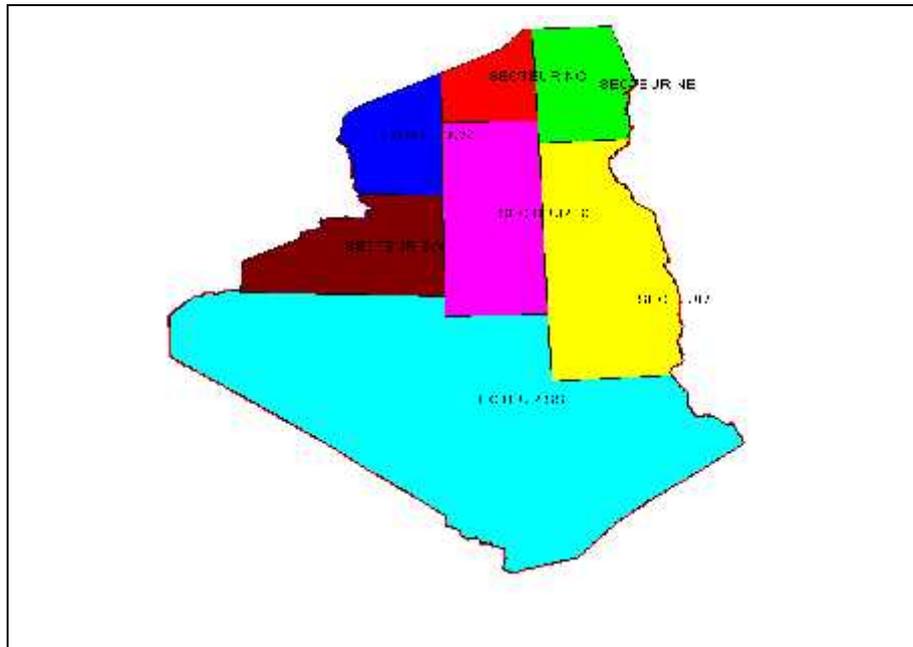
La F.I.R d'Alger est divisée en sept secteurs ayant le statut d'espace O.A.C.I (Figure 1.7). Les (07) secteurs de la F.I.R sont classés comme suit :

- 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

N° secteur	Secteur	Classe	Limite Inférieure	Limite Supérieure	Service de contrôle	Fréquence Hz
01	Centre Alger Supérieur	A	FL245	FL450	MAGHREB contrôle Alger	132.45/124.9
01	Centre Alger Inférieur	D	GND/MSL	FL245	MAGHREB contrôle Alger	127.3/124.9
02	Nord/Est	D	GND/MSL	FL450	MAGHREB contrôle Alger	125.4/124.6
03	Nord/Ouest	D	GND/MSL	FL450	MAGHREB contrôle Alger	125.7
04	Sud/Centre	E	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	131.3/124.6
05	Sud/Est	E	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	124.1/124.6
06	Sud/Ouest	E	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	128.1
07	Sud/Sud	F	GND/MSL	UNL	MAGHREB info Alger	124.1/123.8/128.1



FigureI.5: Sectorisation actuelle.

I.3.3 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/El Mellah	D	450m GND/MSL	FL85
CTA Constantine/Mohamed Boudiaf	D	450m GND/MSL	FL105
CTA Hassi Messaoud/Oued Irara Krim	E	900m GND/MSL	FL105
CTA Oran/Essania	D	450m GND/MSL	FL40

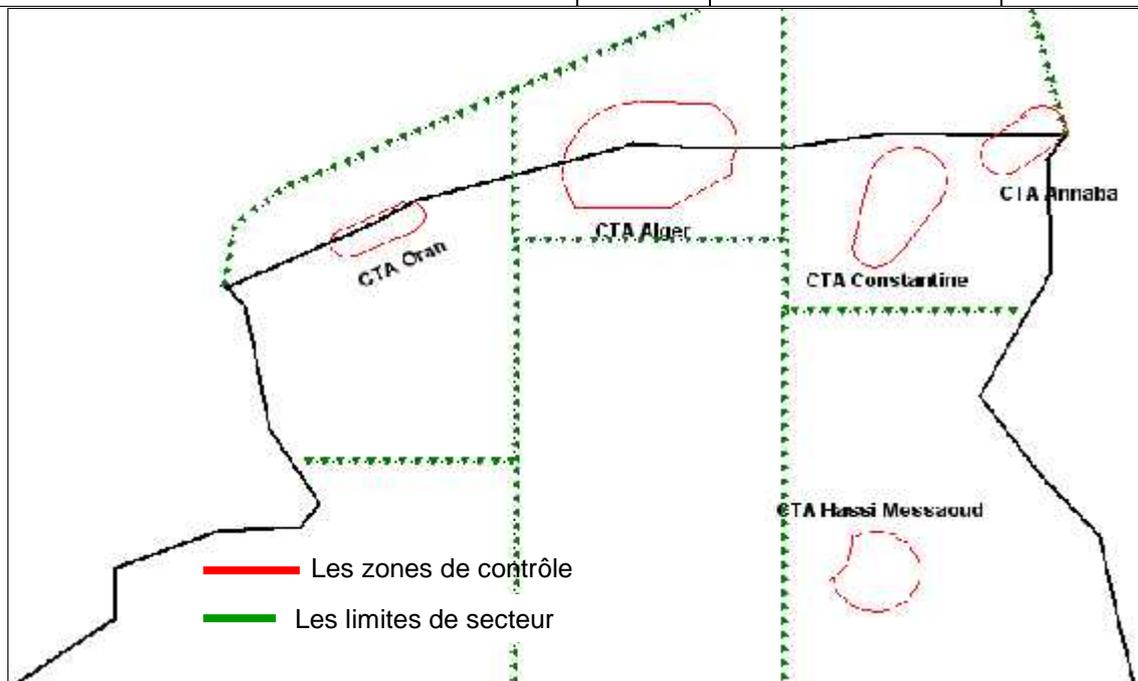


Figure I.6 : Représentation des zones de contrôle.

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.

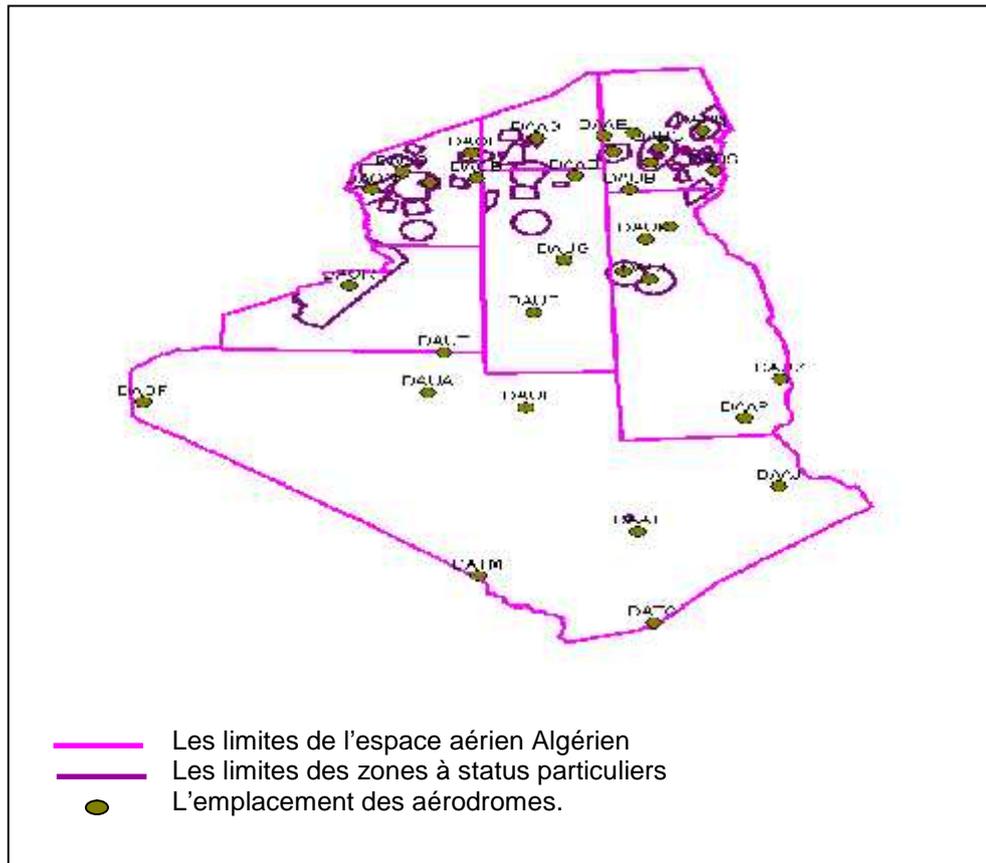


Figure I.7 : Les Espaces Restreints en Algérie.

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).

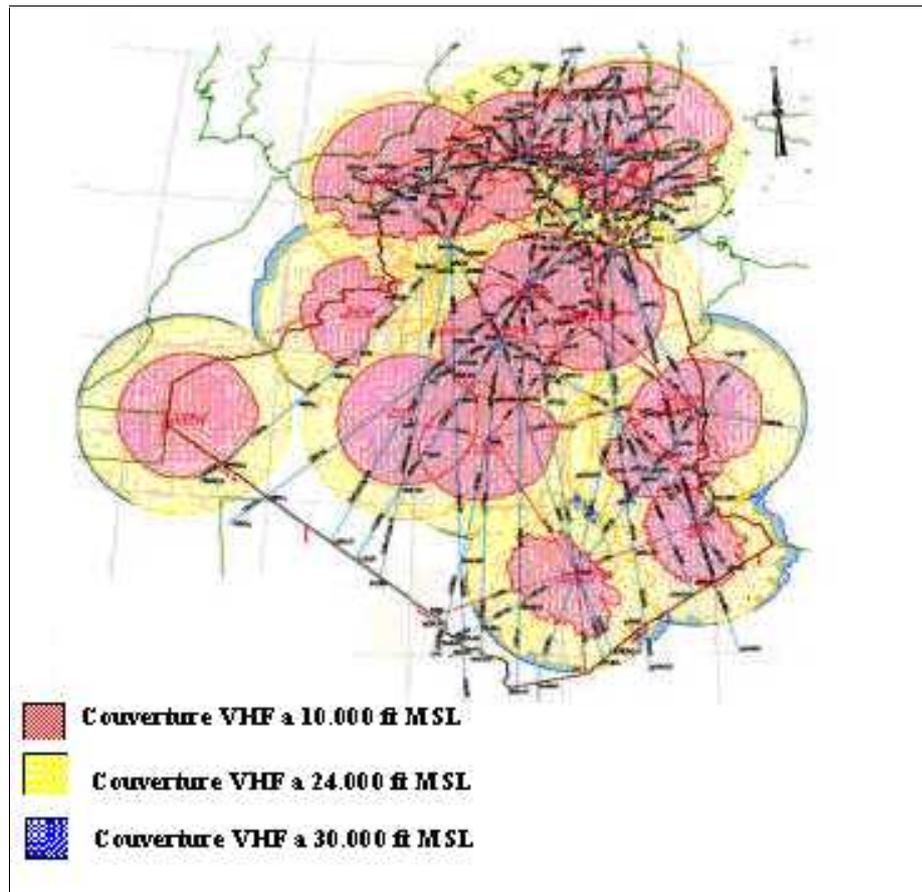


Figure I.8 : Couverture VHF actuelle.

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).

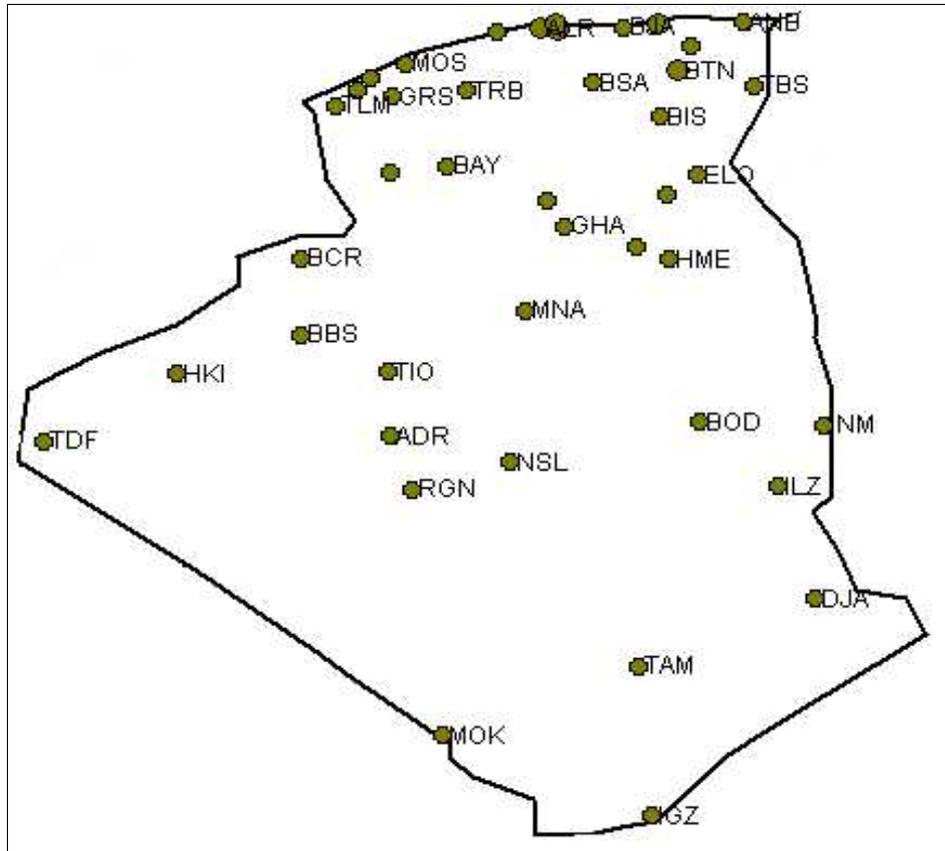


Figure I.9: L'emplacement des Aides de navigation en Algérie.

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.

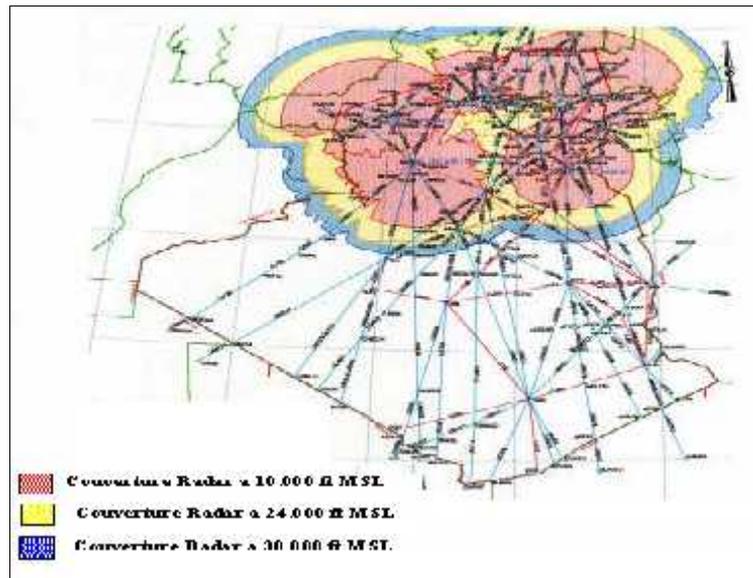


Figure. I .10: Couverture Radar actuelle en Algérie.

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 .

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.

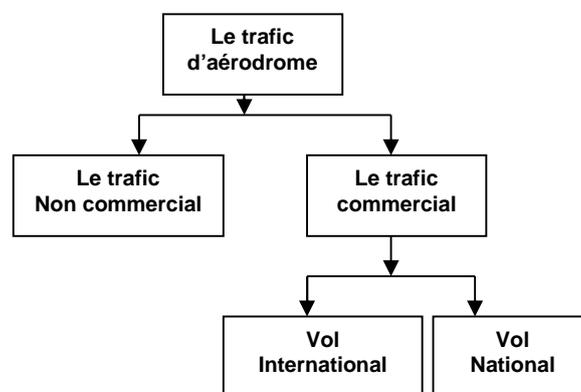


Figure 1.16 : L'organigramme de trafic d'aéroport Algérien.

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.

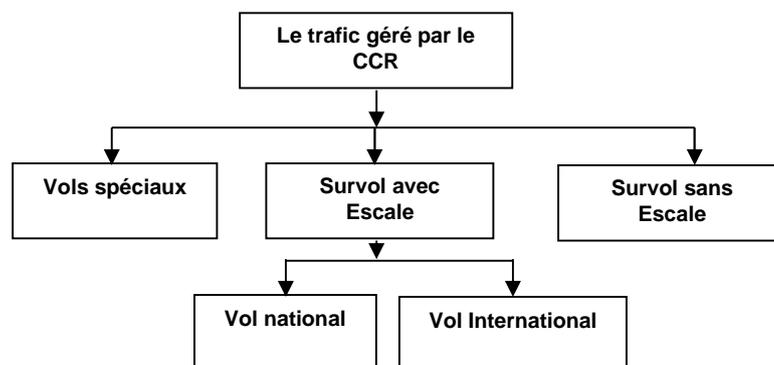


Figure I.10: L'organigramme de trafic géré par CCR d'Alger.

1.5.2 Evolution du trafic aéroports (1998-2007) (Appendice C-1)

Le tableau (1.4) représente l'évolution du trafic aérien d'aéroport 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

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 II :Etude de concept CNS-ATM.

II.1 Introduction aux systèmes CNS-ATM

II.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.

II.2 Le système CNS-ATM

II.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 (II.1).

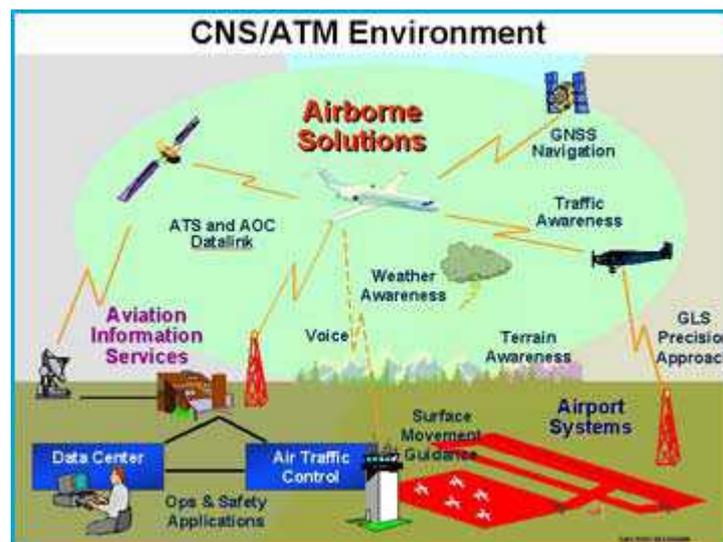


Figure II.1 : Différents utilisations du concept CNS-ATM.

II.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. 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 entre 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.

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.

II.3 Systèmes de navigation

II.3.1 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.

II.3.2 Systèmes de navigation par satellite (GNSS)

Le GNSS est un système mondial de détermination de la position et de l'heure, il se compose d'une ou plusieurs constellations de satellites, de récepteurs embarqués et d'un contrôle 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 (II.2).

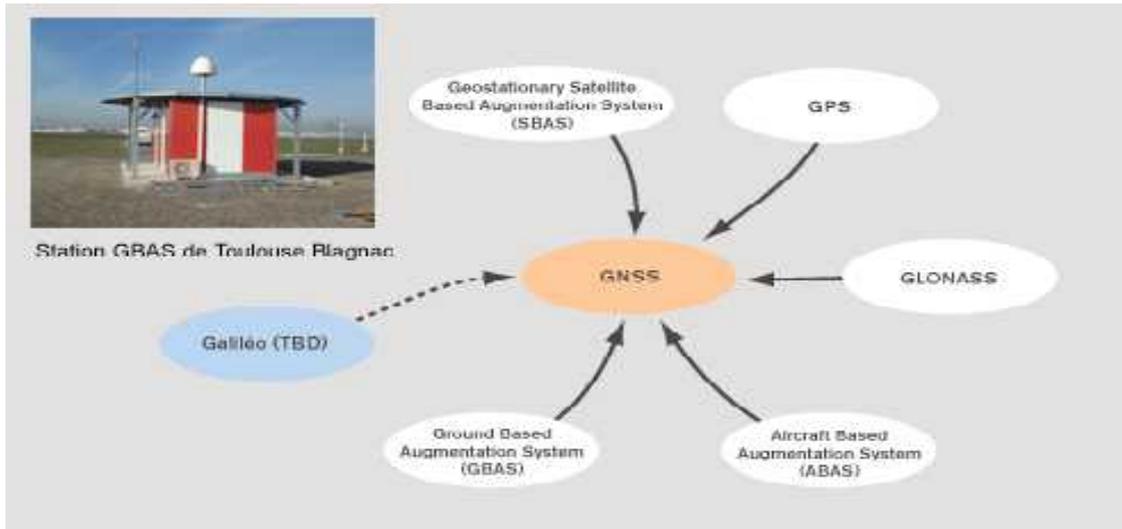


Figure II.2 : Représentation des systèmes de navigation par satellite (GNSS).

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° .

II.3.3 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.

II.3.4 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.

II.4. 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.

II.4.1 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.

II.4.2 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.

II.4.3 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.

II.4.4 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 remplacé 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 II.3 : Représente le système ADS-B.

II.4.5 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.

II.4.6 Tendances futures 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.

II.4.7 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.

II.5. Aspects économiques des systèmes CNS-ATM

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.

III .1 Introduction

Une antenne est un dispositif parcouru par un courant électrique dont l'effet est de rayonner dans l'espace une onde électromagnétique. On distingue l'antenne d'émission et l'antenne de réception.

– Emission : génération d'OEM (ondes électromagnétiques) provoquée par le courant dans l'antenne

– Réception : une OEM provoque l'apparition de courant dans l'antenne

Aussi, une antenne est un dispositif de transition pour l'énergie électromagnétique entre les guides d'ondes (coaxial, filaire) et les milieux libres (hertzien,...).

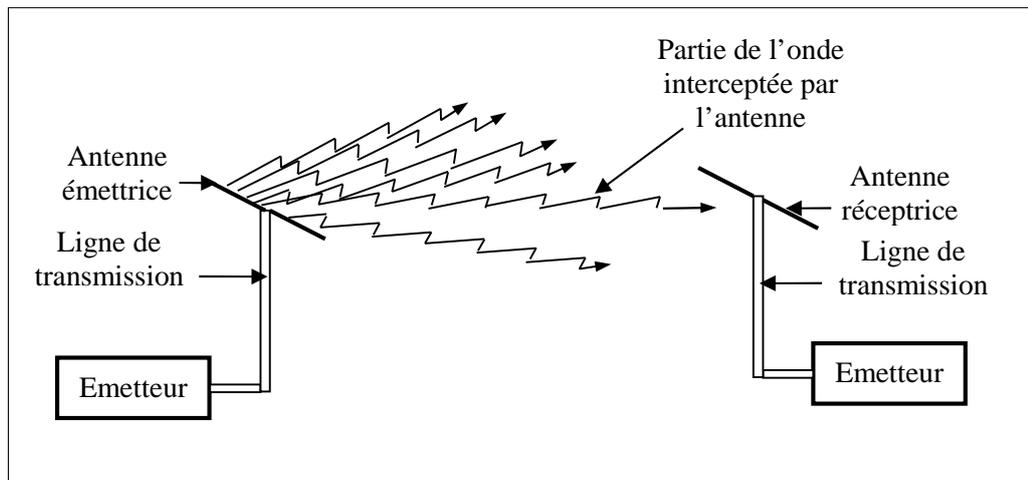


Figure III .1 :

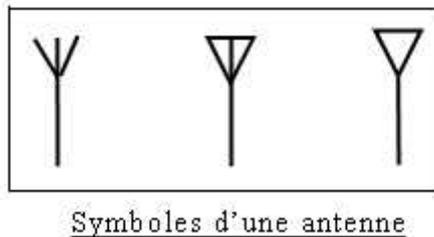


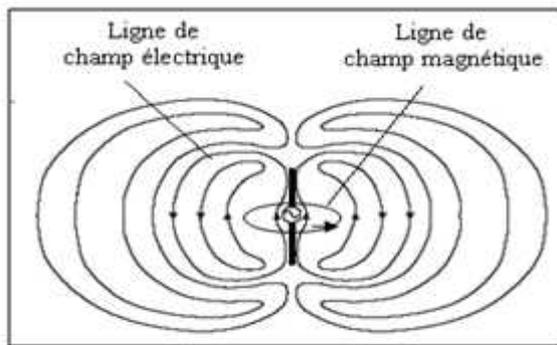
Figure III .2 : symboles d'une antenne

III.1.2 Mécanisme de rayonnement

Un conducteur dans lequel passe un courant I produit dans son entourage un champ magnétique H .

D'autre part, un courant circulant dans un conducteur correspond à un déplacement de charges dans le conducteur : accumulation de charges positives et négatives aux extrémités, celles-ci donnent lieu à des lignes de champs électriques.

Il existe donc des champs E et H perpendiculaires l'un à l'autre. Si les champs sont variables (courant variable), ceci donne naissance à une onde électromagnétique qui se propage perpendiculairement aux deux champs.



Mécanisme du rayonnement

Figure III. 3 : Mécanisme du rayonnement

III.1.3 Bref historique

Les premiers systèmes de communication furent la télégraphie introduite en 1844, suivie par la téléphonie en 1878. Dans ces systèmes, les signaux sont transmis par des lignes de transmission.

La théorie des antennes intervient après des développements mathématiques de James Maxwell, en 1854, corroborés par les expériences de Hertz en 1887 et les premiers systèmes de radiocommunication de Marconi en 1901 (première communication trans-océanique sans fils entre l'Angleterre et le Canada sur une fréquence de 820 kHz).

En 1916, Marconi réalisa des expériences avec des signaux de 2 à 3 m de longueur d'onde en utilisant des réflecteurs paraboliques.

Dans la décade 1910-1920, de nouvelles techniques ont vu le jour, comme les aides à la navigation aérienne, les communications sous-marines, les systèmes de commande à distance.

Les antennes sont utilisées dans beaucoup de domaines comme :

- la radiocommunication
- les radars
- la radioastronomie
- les télécommunications spatiales

Il existe une grande variété d'antennes adaptées aux divers domaines d'application :

- dipôles, monopôles,
- cornets,
- réflecteurs,
- lentilles,

- antennes imprimés,
- réseaux d'antennes...

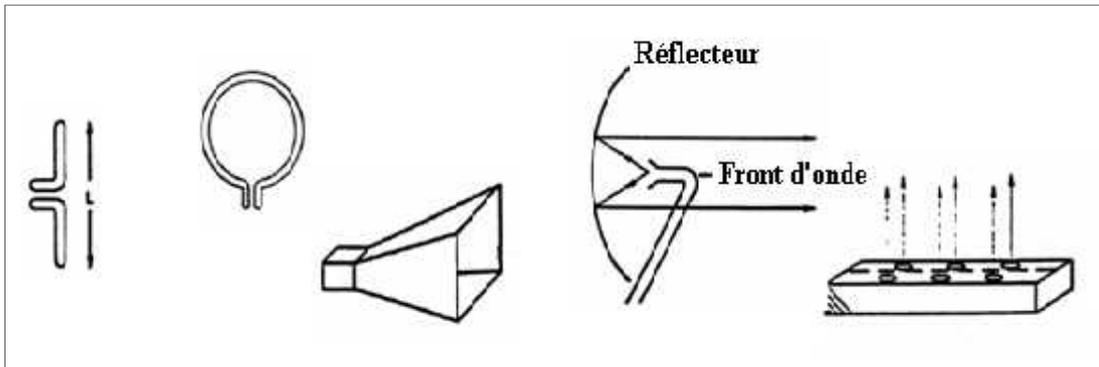


Figure III.4 :Exemples d'antennes

III.2 Mode de propagation des ondes Hertziennes

Les équations de Maxwell

Les quatre équations de Maxwell permettent de relier le champ électrique \vec{E} (V/m) et le champ magnétique \vec{H} (V/m) aux sources de courant J et charges ρ qui lui ont donné naissance. Elles sont données ici dans le vide.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(r,t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{H}(r,t)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}(r,t) = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(r,t) = \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}(r,t) + \vec{J}(r,t)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(r,t) = \frac{\rho(r,t)}{\epsilon_0}$$

où $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^{-9}} \text{ F/m}$ est la permittivité du vide et $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ la perméabilité du vide.

Dans le cas d'un diélectrique, on écrit $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ où $\epsilon_r \geq 1$ est la permittivité relative.

$c \approx 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, la vitesse de la lumière dans le vide.

Les variations temporelles du champ électrique engendrent des variations spatiales du champ magnétique et réciproquement si bien que le champ se répand dans tout l'espace, de proche en proche.

Résolution des équations de Maxwell en régime harmonique

Il est plus facile de résoudre un problème d'électromagnétisme dans le domaine fréquentiel. Pour ce faire, le champ est exprimé comme suit :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\vec{E}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right]$$

où $\omega = 2\pi f$ représente la pulsation des variations sinusoïdales considérées. Le même type de variations est supposé pour toutes les autres grandeurs.

Comme l'opérateur $\partial / \partial t$ peut être remplacé par $j\omega$, on peut donc écrire :

$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) = -j\omega\mu_0 \vec{H}(\vec{r})$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}) = 0$
$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) = j\omega\epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}) + \vec{J}(\vec{r})$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}) = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$

En prenant le rotationnel de la première équation et en appliquant la formule du double produit vectoriel, on obtient ainsi :

En utilisant les troisième et quatrième équations, on déduit :

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + k_0^2 \vec{E}(\vec{r}) = -\nabla(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r})) + \vec{\nabla} \times \vec{J}(\vec{r}) \quad \text{avec} \quad k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$$

De même, on a :

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) + k_0^2 \vec{H}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{J}(\vec{r})$$

En dehors des sources ($\vec{J}=0$ et $\rho=0$), ces équations se réduisent à :

$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + k_0^2 \vec{E}(\vec{r}) = 0$
$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) + k_0^2 \vec{H}(\vec{r}) = 0$

Les équations de propagation de Helmholtz obtenues sont vectorielles (la grandeur qui se propage est un vecteur) et tridimensionnelles (cette grandeur dépend des trois coordonnées spatiales x, y et z).

Pour simplifier le problème, on s'intéresse à une onde se propageant dans une seule direction d'axe (O,u). On parle alors d'*onde plane*. Les plans perpendiculaires à cet axe sont appelés *plans d'onde*.

On définit un vecteur unitaire de l'axe de propagation :

$$\vec{e}_u = \alpha \vec{e}_x + \beta \vec{e}_y + \gamma \vec{e}_z \quad \text{avec} \quad \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$$

Un point de l'espace est repéré par le vecteur : $\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z$

et il a pour coordonnée selon l'axe de propagation : $u = \vec{e}_u \cdot \vec{r} = \alpha x + \beta y + \gamma z$

Au final, l'équation d'onde se ramène à l'équation d'onde unidimensionnelle :

$$\nabla^2 \vec{E}(u) + k_0^2 \vec{E}(u) = 0$$

La solution de cette équation est de la forme :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\vec{E}_0 e^{j\omega t} e^{-jk_0 u} \right]$$

On définit :

- Le nombre d'ondes $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c}$ (rad / m)

- Le vecteur d'ondes $\vec{k}_0 = k_0 \vec{e}_u$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k}_0 \cdot \vec{r})} \right]$$

et on obtient

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\eta_0} \vec{e}_u \times \vec{E}(\vec{r}, t)$$

et

La constante de proportionnalité entre les deux champs est appelée impédance du vide et :

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377 \Omega$$

En résumé, ces résultats montrent que :

- les champs électrique et magnétique ne sont pas seulement orthogonaux à l'axe de propagation ; ils sont également orthogonaux entre eux;

- l'amplitude du champ électrique est 377 fois supérieure à celle du champ magnétique et ils vibrent en phase.

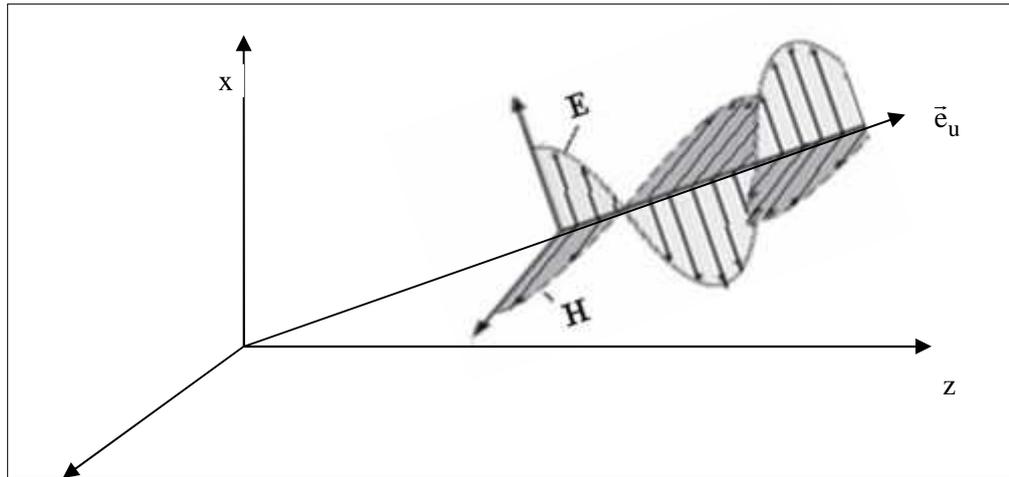


Figure III.5 : L'expression du champ électrique réel est $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - k_0 u)$

Dans un milieu avec pertes, ϵ devient complexe; on écrit la constante k_0 sous la forme :

$$k = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)} \quad \sigma \text{ est la conductivité du milieu}$$

La constante de propagation comporte donc une partie réelle et une partie imaginaire qu'on écrit sous la forme $jk = \alpha + j\beta$

Dans cette expression α (unité néper/mètre) est la constante d'atténuation et β (rad/m), la constante de phase.

L'expression du signal réel devient : $\vec{E} = \vec{E}_0 \text{Re} \left[e^{j(\omega t - ku)} \right] = \underbrace{\vec{E}_0 e^{-\alpha u}}_{\text{Amplitude}} \cos(\omega t - \beta u)$

Dans un milieu à pertes, l'amplitude des ondes s'atténue donc de façon exponentielle.

La distance parcourue par l'onde pendant une période est appelée longueur d'onde λ :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad \text{et} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Puissance transportée par une onde plane

On définit le vecteur de Poynting complexe par : $\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E}(r) \times \vec{H}^*(r) \quad (\text{W} / \text{m}^2)$

En régime harmonique, le flux de la partie réelle de ce vecteur à travers une surface fermée S correspond à la puissance moyenne (sur une période T) quittant le volume V délimité par S.

Polarisation d'une onde

La polarisation de l'onde définit la direction du champ électrique et surtout l'évolution de cette direction en fonction du temps.

Le champ peut se mettre sous la forme :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\vec{E}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right] = \vec{v} \cos \omega t + \vec{w} \sin \omega t$$

Dans le cas général, la polarisation est elliptique, avec les cas particuliers suivants :

- Lorsque v ou w sont nuls, la polarisation est linéaire
- Lorsque u et v sont orthogonaux et que $|v| = |w|$, la polarisation est circulaire

Propagation d'une onde EM dans un milieu réel

La propagation d'une onde dans un milieu réel dépend de la fréquence et de la topographie de la zone dans laquelle s'effectue la propagation.

Les ondes peuvent se propager de différentes façons.

L'atmosphère

Elle est divisée principalement en trois zones :

- La **troposphère** est la couche qui est en contact avec le sol; elle s'étend jusqu'à 10 km d'altitude et est le siège des phénomènes climatiques: nuages, vents, brouillard.
- La **stratosphère** s'étend de 10km à 40km d'altitude; elle intervient peu dans la propagation des ondes.
- L'**ionosphère** s'étend de 40km à 1000km d'altitude; elle est exposée au rayonnement solaire ainsi qu'aux rayons cosmiques et aux météorites qui provoquent l'ionisation des molécules, c'est-à-dire l'arrachement des électrons des couches extérieures de la molécule. Les particules chargées négativement (électrons) et positivement (ions) ont tendance à se regrouper en couches ionisées.

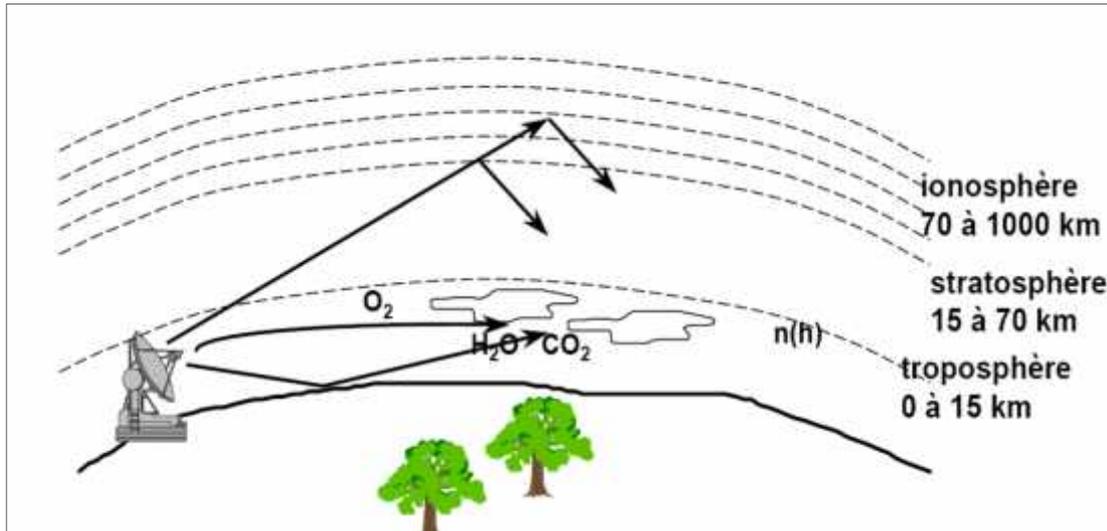


Figure III.6 : onde EM dans un milieu réel

Les types de propagation

Entre une antenne d'émission et une antenne de réception, situées au voisinage de la terre, une onde électromagnétique peut suivre trois chemins différents :

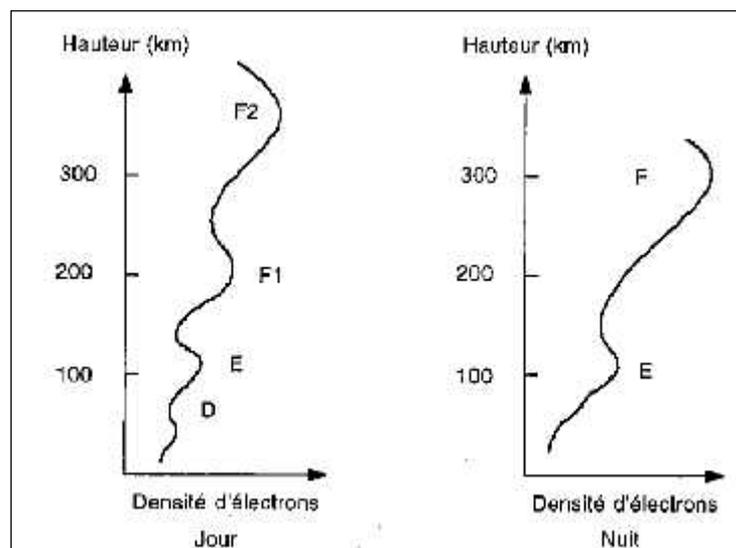
Propagation par onde de surface

L'onde de surface suit la courbure de la terre et se propage sans être gênée par les obstacles. La portée dépend de la nature du sol, de la fréquence et de la puissance de l'émission. La conductivité du sol influe sur la portée.

On peut atteindre quelques milliers de km en VLF et quelques centaines de km en MF.

La propagation ionosphérique

Les particules ionisées se concentrent en quatre couches :



– la couche D, de 10km d'épaisseur, située à 70 km d'altitude, elle est moins ionisée que les autres couches pendant la journée et elle disparaît pendant la nuit. Elle est incapable de réfléchir les ondes radio sauf les ondes longues. Pour les ondes de fréquence plus élevées, elle se comporte essentiellement comme une couche absorbante, donc gênante.

– la couche E, de 25km d'épaisseur, située à environ 100km, s'atténue la nuit. La couche E réfléchit les ondes moyennes mais absorbe un peu les ondes HF.

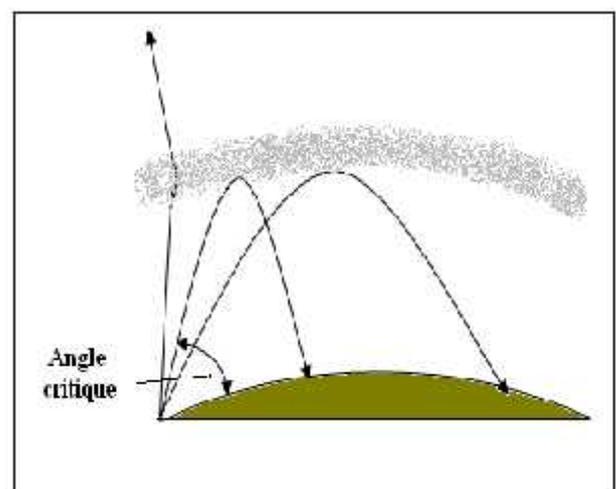
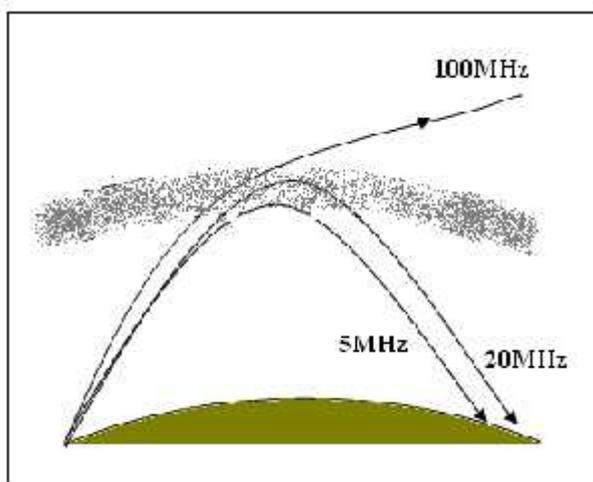
– la couche F1, de 20km d'épaisseur, est située à 180 km pendant la journée mais s'élève et rejoint la couche F2 pendant la nuit. La couche F1 réfléchit les ondes courtes de fréquence pas trop élevée mais absorbe partiellement les autres.

– la couche F2, d'une épaisseur atteignant 200 km, se situe entre 250km et 400km pendant la mais se trouve vers 300km pendant la nuit. C'est la couche la plus ionisée et c'est celle qui joue le rôle le plus important dans les communications radio. Les couches ionisées vont se comporter comme un véritable miroir sur les ondes de radio : il se produit un mécanisme de réflexion. La couche F2 est la couche de réflexion principale pour les ondes courtes.

Les couches ionisées sont caractérisées par un certain nombre de paramètres comme :

– la *fréquence critique* qui est la fréquence maximale réfléchiée par la couche en incidence verticale, elle dépend de la densité d'électrons et est donc maximale pour la couche F2,

– L'angle critique : au dessus de cet angle, pour une fréquence donnée, il n'y aura plus de réflexion.



- Les avantages de la propagation ionosphérique

Il est possible de communiquer avec n'importe quel autre point de la surface terrestre en choisissant convenablement la puissance, la fréquence et le type d'antenne. En effet l'onde peut être réfléchiée plusieurs fois et même faire le tour de la terre.

- Les inconvénients de la propagation ionosphérique

Ce type de propagation est moins fiable que les autres. De nombreux phénomènes peuvent faire varier l'intensité du signal reçu. C'est ce qu'on appelle l'évanouissement des ondes (fading). Cet évanouissement est dû à des interférences entre ondes arrivant par différents chemins après réflexions sur les couches dont la hauteur et la composition varient au cours du temps (variations lentes et irrégulières).

La propagation troposphérique (Ondes d'espace ou ondes directes)

A partir des fréquences VHF, les ondes se propagent en ligne droite dans le vide. Ces ondes accomplissent la totalité de leurs trajet dans la couche la plus basse de l'atmosphère, très près du sol. L'onde sera donc influencée par les phénomènes atmosphériques (pluie, brouillard, etc..) par les obstacles naturels (montagnes, forêts,..) et artificiels (bâtiments élevés). L'oxygène est la vapeur d'eau absorbent peu d'énergie aux fréquences radio. On a deux phénomènes :

- **Courbure des rayon's**

Comme l'indice de réfraction de l'air est variable, le trajet des ondes sera légèrement incurvé vers la terre. On considère une propagation rectiligne dans une terre fictive de rayon R entourée d'une atmosphère d'indice de réfraction n constant :

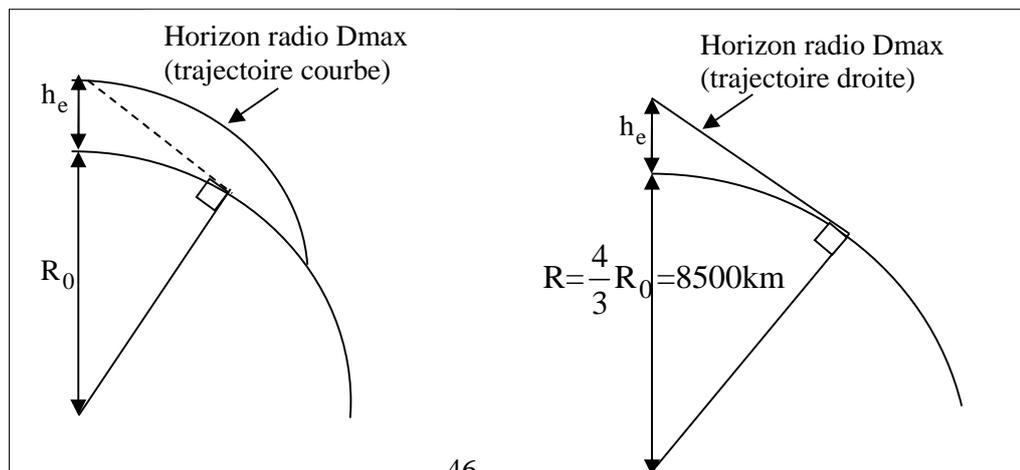
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{dn}{dh} \quad \text{avec} \quad \frac{dn}{dh} = -0,039 \cdot 10^6 \square - \frac{0,25}{R_0}$$

$$\text{d'où} \quad R = \frac{4}{3} R_0 = \frac{4}{3} \times 6370 \text{ km} = 8500 \text{ km}$$

- **Horizon radio**

L'horizon radio, c'est-à-dire la distance maximale à laquelle une antenne située au niveau du sol pourra recevoir le signal émis par une antenne située à une hauteur h_e est supérieur à

l'horizon optique. Il est donné par la formule : $D_{\max} = \sqrt{2Rh_e}$ avec $R = 8500\text{km}$

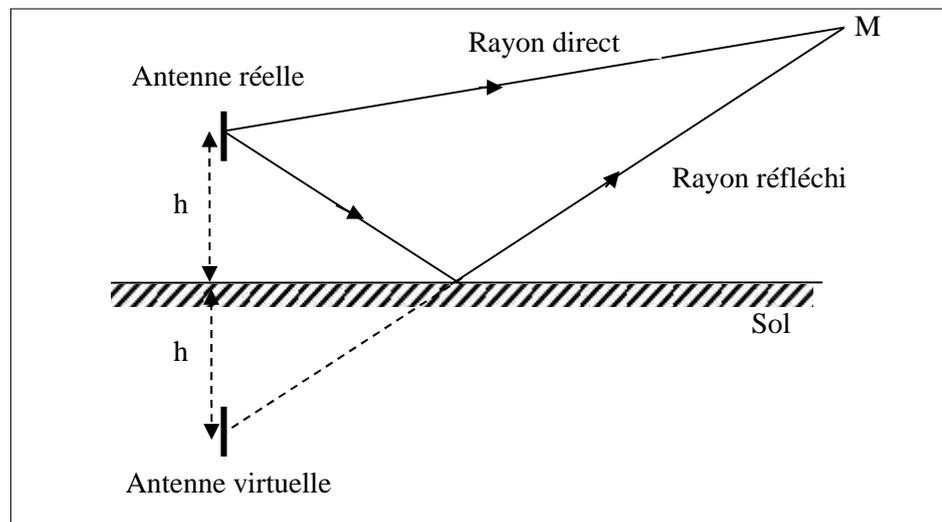


Si l'antenne de réception est à la hauteur h_r , la distance maximale pour une communication devient :

$$D_{\max} \approx \sqrt{2Rh_e} + \sqrt{2Rh_r}$$

Réflexion sur le sol

Lorsque le sol est conducteur, il y a réflexion de l'onde. L'onde directe et l'onde réfléchie vont donc arriver au récepteur avec un déphasage dû à la différence des trajets et à un déphasage éventuel lors de la réflexion. Si le déphasage entre l'onde directe et l'onde réfléchie est proche de 0 ou de 360 degrés, les ondes se renforcent mutuellement, mais si le déphasage est proche de 180 degrés, la présence de l'onde réfléchie diminue le signal reçu.



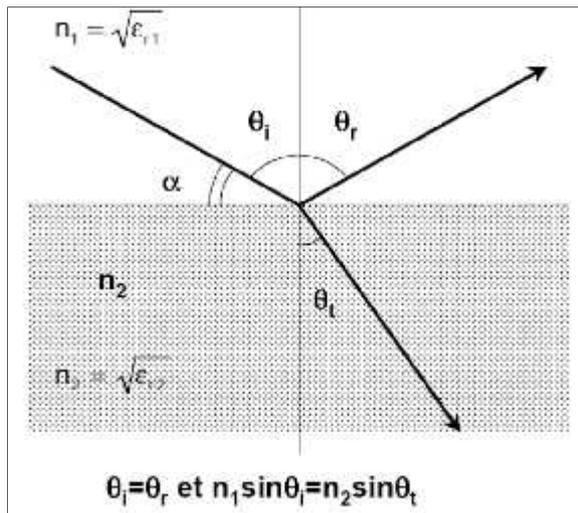
Les coefficients de réflexion en polarisation verticale ρ_v et horizontale ρ_H sur le sol valent :

$$\rho_v = \frac{\epsilon_r' \sin \alpha - \sqrt{\epsilon_r' - \cos^2 \alpha}}{\epsilon_r' \sin \alpha + \sqrt{\epsilon_r' - \cos^2 \alpha}}$$

où $\epsilon_r' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = \epsilon_r - j60\sigma\lambda$ est la permittivité relative

complexe

$$\rho_H = \frac{\sin \alpha - \sqrt{\epsilon_r' - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha + \sqrt{\epsilon_r' - \cos^2 \alpha}}$$



Les facteurs qui réduisent les interférences en diminuant l'intensité de l'onde réfléchi sont :

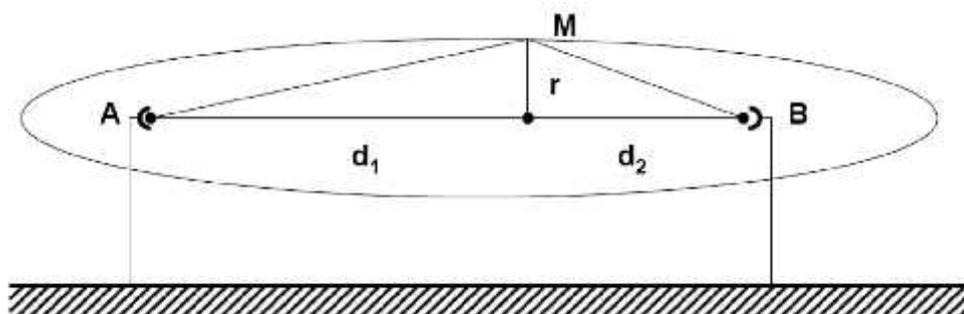
- sol peu conducteur dans la zone où s'opère la réflexion
- emploi d'antennes très directives qui envoient peu d'énergie en direction du sol, ceci n'est réalisable qu'aux très hautes fréquences.
- présence d'obstacles sur le trajet du chemin réfléchi : dégager le premier ellipsoïde Fresnel de tout obstacle :

Ellipsoïde de Fresnel $AMB - AB = \frac{n\lambda}{2} \quad n = 1, 2, \dots$

Le lieu de M est un ellipsoïde de foyers A et B appelé ellipsoïde de Fresnel.

N=1 : ellipsoïde qui délimite l'espace où la plus grande partie de l'énergie se propage entre A et B et doit être dégagé de tout obstacle.

$$r = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$



Température de bruit d'une antenne

Les ondes électromagnétiques sont souvent perturbées par des signaux électriques, nommés bruit, qui perturbe le signal qu'on veut traiter. Ces bruits se composent de :

✓ **Bruit atmosphérique**

Il provient principalement des décharges atmosphériques dans l'atmosphère (éclairs); ces décharges émettent des parasites dans une large bande de fréquences. Ces bruits sont particulièrement importants au dessous de 30 MHz, au delà, ils sont plus faibles car les éclairs émettent peu d'énergie à ces fréquences. gênants.

✓ **Bruit extraterrestre**

Le soleil et les galaxies émettent des ondes électromagnétiques dans une large bande de fréquences. Ce bruit extraterrestre est le bruit naturel dominant au-delà de 20MHz, en dessous de cette fréquence le bruit extraterrestre est arrêté par l'ionosphère.

✓ **Bruits liés aux activités humaines**

Les sources sont diverses, elles sont liées à l'activité industrielle(moteurs, lignes haute tension, dispositifs de commutation, etc..) ou domestique (éclairage fluorescent, gradateur de lumière, etc..) ainsi qu'aux transports : allumage des voitures, avions...).

Ces bruits sont plus importants que les bruits naturels, principalement dans les villes.

La température de bruit T_a d'une antenne dépend de la façon dont elle est orientée et caractérise le bruit capté. La densité de puissance de bruit supposé blanc se calcule par :

$$P_B = kT_a \text{ (W / Hz)}$$

T_a en K et $k = 1,38.10^{-23}$, la constante de Boltzmann

Fréquences	λ	Ondes	Gammes	Modes de propagation
>30kHz	>10km	Myriamétriques	VLF	Sol
30kHz à 300kHz	10km à 1km	kilométriques	GO/LF	Sol
300kHz à 3MHz	1000m à 100m	Hectométriques	PO/MF	Sol+ réflexion
3MHz à 30MHz	100m à 10m	Décamétriques	OC/HF	Réflexion
30MHz à 300MHz	10m à 1m	Métriques	VHF	Réflexion +direct
300MHz à 3GHz	1m à 10cm	Décimétriques	UHF	Direct
3GHz à 30GHz	10cm à 1cm	Centimétriques	SHF	Direct
30GHz à 300GHz	1cm à 1mm	Millimétriques	SHF	Direct

III.3 Propriétés générale des antennes

III.3.1 Densité de puissance rayonnée

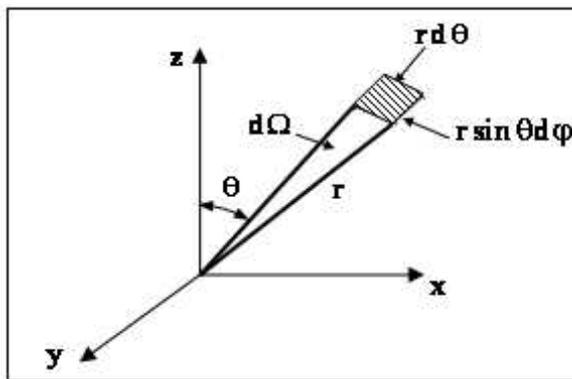
L'antenne rayonne "un spectre d'ondes planes", c'est-à-dire des ondes dans toutes les directions.

La densité de puissance rayonnée par une antenne se définit comme la puissance par unité de surface dans une direction donnée (unité Watts/m²). On peut la calculer à partir des valeurs efficaces des champs E et H :

$$\bar{P}(\theta, \varphi, r) = \bar{p} = R_e \left(\bar{E}_{\text{eff}} \times \bar{H}_{\text{eff}}^* \right) = \frac{|\bar{E}_{\text{eff}}|^2}{\eta} \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

La puissance totale rayonnée peut s'obtenir en calculant l'intégrale de la densité sur une sphère entourant l'antenne :

$$P_r = \iint \bar{p} dS = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \bar{p} \cdot r^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (\text{W})$$



$$dS \approx r^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

$$d\Omega \approx \frac{dS}{r^2} \approx \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

est la

L'intensité de rayonnement $U(\theta, \varphi)$

densité de puissance rayonnée par

unité d'angle solide dans une direction donnée (unité Watts/stéradian); c'est un paramètre indépendant de la distance.

La relation entre les deux densités est : $U(\theta, \varphi) = \bar{p} \cdot r^2$ (W/str)

$$\text{et } P_r = \iint U(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi$$

III.3.2. Directivité d'une antenne

La puissance rayonnée par une antenne n'est pas uniforme dans l'espace. Pour mesurer cette capacité de concentrer la puissance, on utilise la notion de directivité.

La directivité d'une antenne se définit comme la relation entre l'intensité rayonnée en une direction par l'antenne et l'intensité que rayonnerait dans la même direction une *antenne isotrope* à égale puissance totale *rayonnée*.

$$D_{\theta, \phi} = \frac{U_{\theta, \phi}}{U_{iso}} = \frac{U_{\theta, \phi}}{P_r / 4\pi r^2} = 4\pi r^2 \frac{U_{\theta, \phi}}{P_r}$$

$$D_{\theta, \phi} \cdot d\Omega = \frac{4\pi r^2}{P_r} U_{\theta, \phi} \cdot d\Omega$$

On a quelque soit l'antenne

Cela signifie qu'une antenne n'est pas un amplificateur de puissance. Une antenne se limite à répartir dans l'espace la puissance qui lui est fournie sous différentes formes selon la direction.

III.3.3. Gain d'une antenne

Le gain G d'une antenne est défini de la même manière que la directivité D , mais en remplaçant la puissance totale rayonnée P_r par la puissance totale P_F fournie à l'antenne, c'est-à-dire en tenant compte des pertes.

$$G_{\theta, \phi} = 4\pi r^2 \frac{U_{\theta, \phi}}{P_F}$$

qui peut s'écrire aussi $G(\theta, \phi) = \frac{4\pi r^2 p}{P_F}$:

p	\hat{r}
Densité en W/m ²	Gain de l'antenne
$\propto \frac{P_F}{4\pi r^2}$	$G_{\theta, \phi}$
Densité isotrope	Gain de l'antenne

Comme $p = \frac{|\vec{E}_{eff}|^2}{\eta} \Rightarrow |\vec{E}_{eff}| = \sqrt{\eta p} = \frac{1}{r} \sqrt{30 P_F G(\theta, \phi)}$

La différence entre la puissance fournie à l'antenne et la puissance rayonnée correspond aux

perdes ohmiques. Si on définit le rendement par $\eta = \frac{P_r}{P_F} \quad (0 \leq \eta \leq 1)$

$\eta = 1$: rendement maximum

$\eta = 0$: pas de rayonnement

$$\eta = \eta_{\Omega} \times \eta_d \dots$$

pertes dans conducteurs
désadaptation $(1-|\rho|^2)$

On a $G_{\theta, \phi} = N D_{\theta, \phi}$

Typiquement $\eta > 0,8$ pour la plupart des antennes

On exprime le gain en décibel : $G(\text{dB}) = 10 \text{Log} G$

Le décibel

Le décibel est une unité qui représente un rapport, par exemple un rapport de puissance ou de tension :

$$\text{AdB} = 10 \text{Log} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 20 \text{Log} \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = 10^{\text{AdB}/10} \quad \text{et} \quad \frac{V_1}{V_2} = 10^{\text{AdB}/20}$$

On l'utilise aussi par rapport à une référence, par exemple par rapport une puissance de 1W ou de 1mW :

$$A(\text{dBW}) = 10 \text{Log} \left(\frac{P}{1\text{W}} \right)$$

$$A(\text{dBm}) = 10 \text{Log} \left(\frac{P}{1\text{mW}} \right)$$

dB	Rapport de puissance
0	1
3	2
10	10
20	100
30	1000

III.3.4 Diagramme de rayonnement d'une antenne

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la représentation du gain $G(\theta, \phi)$ ou du gain normalisé $G(\theta, \phi) / G_{\text{max}}$ en fonction de θ et/ou de ϕ en coordonnées polaires, rectangulaires,...

On peut écrire aussi : $r_{\theta, \phi} = N \frac{G_{\theta, \phi}}{G_{\text{max}}} = N \frac{U_{\theta, \phi}}{U_{\text{max}}} = N \frac{p}{p_{\text{max}}}$

On utilise beaucoup le diagramme champ défini par : $F(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{E_{\max}} = \sqrt{r(\theta, \varphi)}$

Caractéristiques d'un diagramme

- **Lobe principal**

Le lobe principal du diagramme est dans la direction du gain max,

- **Lobes secondaires**

Ce sont des lobes indésirables (perte de puissance, interférences,...)

- **Ouverture entre nuls**

L'ouverture entre nuls (FNBW : First Nul Beam Wide) est l'ouverture entre les premiers nuls de part et d'autre du lobe principal.

- **Ouverture mi-puissance**

L'ouverture mi-puissance (HPBW : Half Power Beam Wide) est la partie du lobe principal qui a une puissance supérieure à la moitié de la puissance maximale, ou ce qui revient au même à un champ supérieur au champ max divisé par $\sqrt{2}$. On parle aussi d'ouverture à -3dB

$$\left(10 \log \left(\frac{P_{\max}/2}{P_{\max}} \right) = -3 \text{dB} \right)$$

La plus grande partie de la puissance rayonnée est contenue dans cette ouverture.

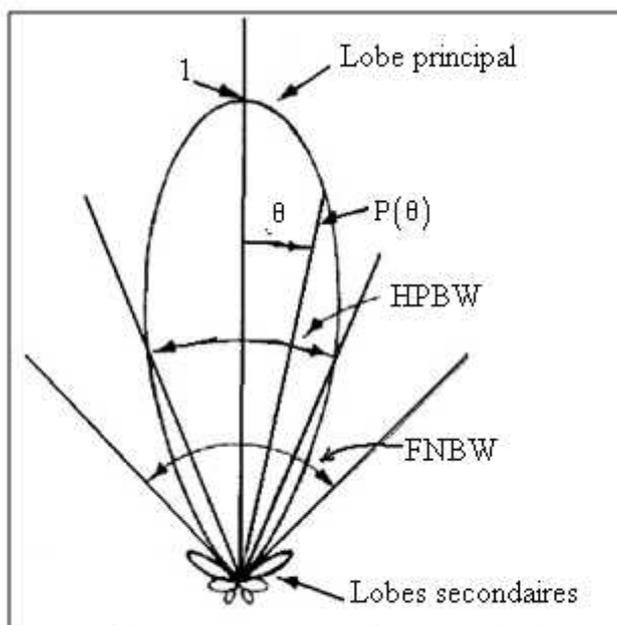


Diagramme en coordonnées polaires

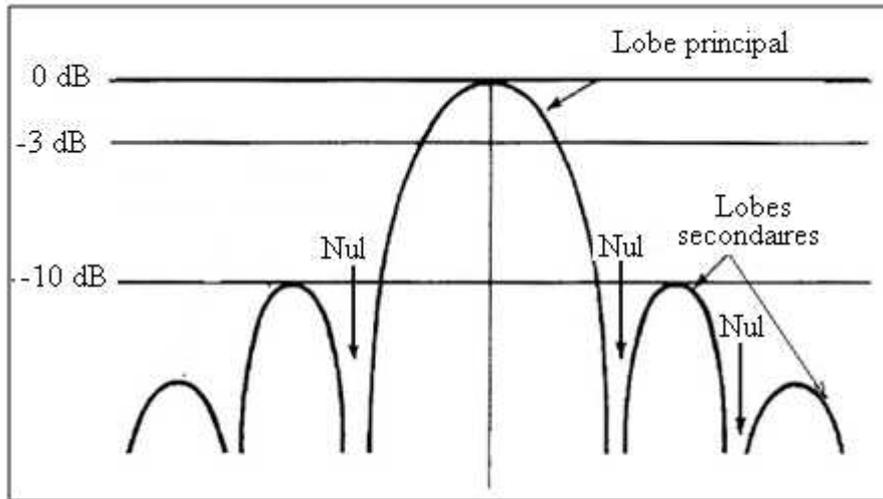
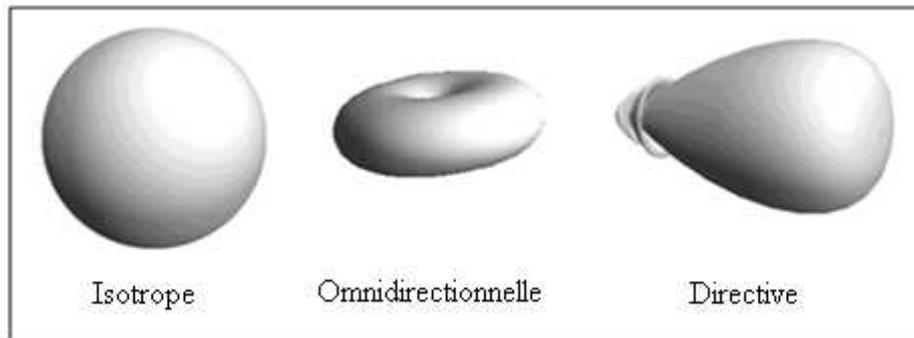


Diagramme en coordonnées cartésiennes (échelle log)

Il y a plusieurs types de diagrammes :



- Le diagramme omnidirectionnel est le plus populaire : le diagramme en azimut est circulaire, le diagramme en élévation a une certaine directivité.
- Le terme pencil beam est appliqué à une antenne très directive consistant en un lobe principal contenu dans un cône d'angle petit.
- Un fan beam est étroit dans un plan et large dans un autre.

La forme de représentation peut être tridimensionnelle ou bidimensionnelle avec une échelle linéaire ou logarithmique.

Vu la difficulté de représenter un diagramme tridimensionnel, on a l'habitude de représenter des coupes du diagramme en coordonnées polaires ou cartésiennes dans deux plans principaux orthogonaux passant par le maximum de rayonnement. Pour une antenne polarisée linéairement, un plan contient le champ **E**, l'autre le champ **H**.

Dans le cas d'antenne directive, avec un seul lobe principal et des lobes secondaires de niveaux négligeables, on peut donner une approximation du gain, en considérant que la puissance est rayonnée dans un angle solide défini à partir des ouvertures à -3dB dans deux plans principaux du diagramme de rayonnement.

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{\Omega_e} = \frac{4\pi}{\theta_E \theta_H}$$

Une bonne approximation $D_{\max} \approx \frac{32400}{\theta_E \theta_H}$

III.3.4 Relation entre gain max et diagramme de rayonnement

A partir des relations suivantes :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_r} \quad \text{et} \quad r(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{\max}} \quad \text{et} \quad P_r = \iint U(\theta, \varphi) d\Omega$$

on peut écrire : $P_r = U_{\max} \iint r(\theta, \varphi) d\Omega$ et donc :

$$D_{\max} \approx \frac{4\pi U_{\max}}{P_r} \approx \frac{4\pi}{\iint r(\theta, \varphi) d\Omega}$$

III.3.5 Impédance d'une antenne

L'impédance d'une antenne est un paramètre d'un grand intérêt, puisque il concerne l'alimentation de l'antenne de façon à obtenir un maximum de puissance rayonnée ou un maximum de puissance reçue. Sauf pour les cas simples, le calcul de l'impédance d'une antenne est un problème ardue. Il est préférable en général de la mesurer.

L'impédance d'une antenne se définit par le rapport entre la tension et le courant à son entrée.

En général, cette impédance est complexe : la partie réelle s'appelle résistance, la partie

imaginaire réactance. $Z_e = \frac{V}{I} = \underbrace{R_e}_{\text{résistance}} + j \underbrace{X_e}_{\text{réactance}}$

On définit la résistance de rayonnement R_r d'une antenne, comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par l'antenne et le carré de la valeur efficace du courant à son

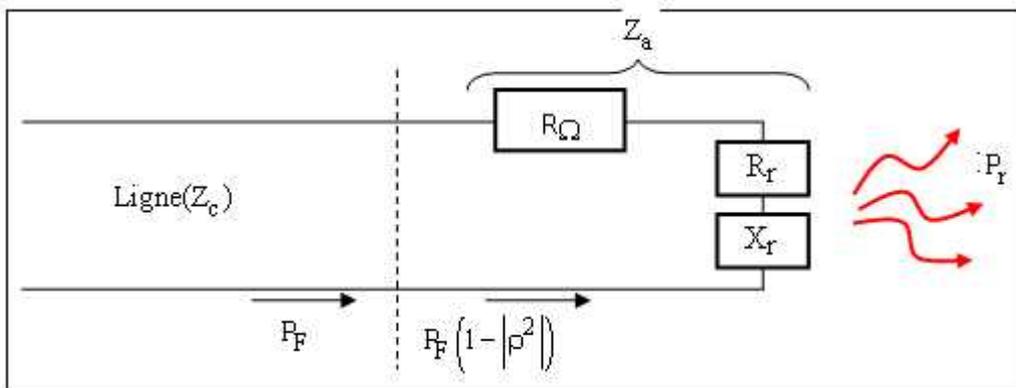
$$\text{entrée : } R_r = \frac{P_r}{I^2}$$

C'est une résistance fictive qui permet seulement de rendre compte de la puissance rayonnée.

On définit la résistance ohmique R_{Ω} d'une antenne, comme le rapport entre la puissance dissipée par effet Joule et le carré de la valeur efficace du courant à son entrée.

$$R_{\Omega} = \frac{P_{\Omega}}{I^2}$$

On a : $Z_e = R_e + jX_e = (R_r + R_{\Omega}) + jX_e$



On définit le rendement due aux pertes ohmiques de l'antenne par :

$$\eta_{\Omega} = \frac{P_r}{P_F} = \frac{P_r}{P_r + P_{\Omega}} = \frac{I^2 R_r}{I^2 R_r + I^2 R_{\Omega}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}}$$

On définit un rendement de désadaptation par :

$$\eta_d = 1 - |\rho|^2 \quad \text{où} \quad \rho = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \text{ est le coefficient de réflexion}$$

Le rendement global est $\eta = \eta_{\Omega} \cdot \eta_d$

Polarisation d'une antenne

La polarisation d'une antenne est la polarisation de l'onde rayonnée par cette antenne.

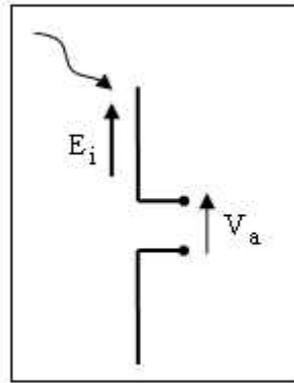
Surface effective et longueur effective d'une antenne

Longueur effective

La longueur effective d'une antenne linéairement polarisée en réception, est définie comme le rapport entre la tension induite sur l'antenne en circuit ouvert et le champ incident :

$$L_{\text{eff}} \approx \frac{V_a}{E_i} \text{ m}$$

Cette notion de longueur effective est surtout utilisée dans les antennes à une dimension.



est surtout utilisée dans les

Surface effective

La surface effective A_e d'une antenne en réception se définit comme le rapport entre la puissance reçue et la densité de puissance incidente sur l'antenne. La charge doit être adaptée à l'antenne et l'onde à la polarisation de l'antenne.

$$A_e = \frac{P_{rec}}{p_i} \text{ (m}^2\text{)}$$

↓ Puissance captée dans charge adaptée
↑ Densité de puissance incidente (W/m²)

Connaissant la densité de puissance au niveau d'une antenne, on peut donc calculer la puissance totale captée par :

$$P_{rec} = p_i A_e \text{ (W)}$$

Cette notion de surface équivalente est surtout utilisée dans les antennes à deux dimensions et on a alors $A_e \leq$ surface physique de l'antenne

Relation entre gain et surface équivalente

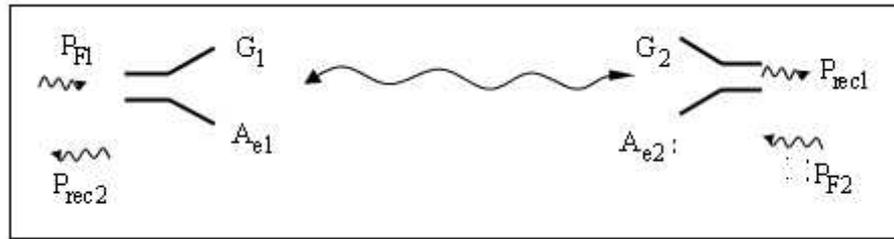
Théorème de réciprocité de Lorentz appliqué aux antennes

Si on considère deux distributions de courants I_1 et I_2 qui sont à l'origine de champs E_1 et E_2 , on

montre d'après les équations de Maxwell :

$$\iiint_v \vec{E}_2 \cdot \vec{I}_1 \cdot dv = \iiint_v \vec{E}_1 \cdot \vec{I}_2 \cdot dv$$

Soit une antenne 1 en émission émettant P_{E1} et une antenne 2 en réception qui reçoit P_{rec2} . En inversant le rôle des deux antennes, l'antenne 2 émet la puissance P_{E2} et l'antenne 1 reçoit P_{rec1} .



Le théorème de réciprocité appliqué aux deux antennes permet d'écrire :

$$\frac{P_{rec2}}{P_{E1}} = \frac{P_{rec1}}{P_{E2}}$$

avec $p_2 = \frac{P_{F1}}{4\pi r^2} G_1$ $p_1 = \frac{P_{F2}}{4\pi r^2} G_2$

et $P_{rec2} = p_2 A_{e2}$ $P_{rec1} = p_1 A_{e1}$

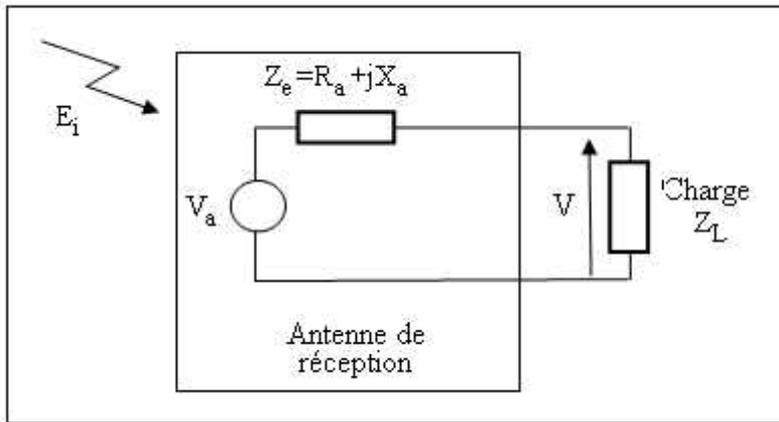
On trouve $\frac{G_1}{A_{e1}} = \frac{G_2}{A_{e2}} = \text{constante}$ quelque soit l'antenne

On peut montrer que cette constante est égale à $\frac{4\pi}{\lambda^2}$

On a alors la relation entre gain et surface équivalente $G = 4\pi \frac{A_e}{\lambda^2}$

Impédance d'une antenne en réception

Une autre conséquence du théorème de réciprocité est que l'impédance d'une antenne travaillant en émission ou en réception est la même : une antenne en réception apparaît comme un générateur d'impédance interne $Z_a = Z_e$.



La tension aux bornes de la charge s'écrit : $V = V_a \frac{Z_L}{Z_L + Z_a}$

On pose $Z_L = R_L + jX_L$

La puissance reçue par l'antenne est :

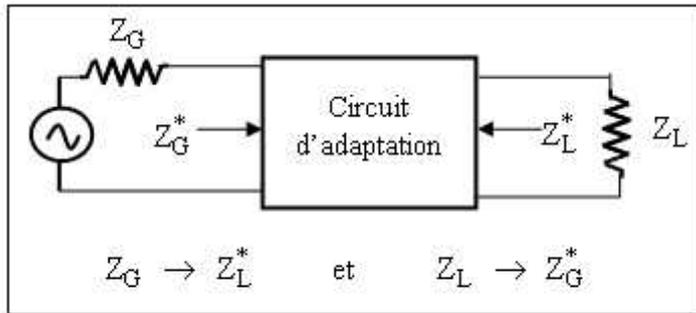
$$P_{\text{rec}} \propto \frac{|V_a|^2 R_L}{R_a^2 + R_L^2 + X_a^2 + X_L^2}$$

Cette puissance est maximale à l'adaptation, c'est-à-dire lorsque les impédances Z_a et Z_L sont conjuguées, soit $R_L = R_a$ et $X_L = -X_a$

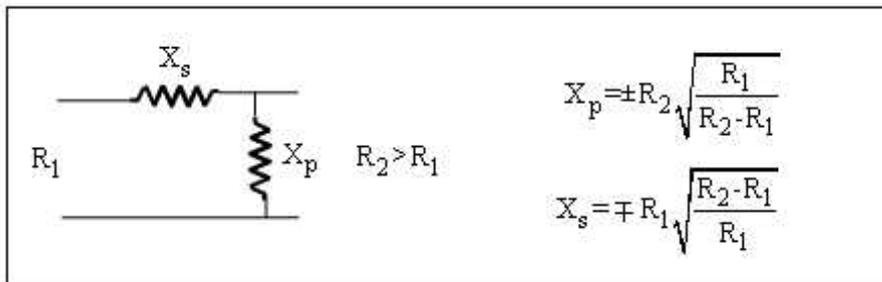
Méthode d'adaptation

On peut réaliser l'adaptation en insérant un circuit d'adaptation entre la source et la charge. Ce circuit transforme l'impédance de la source en conjugué de l'impédance de la charge et vice-versa.

Deux impédances complexes quelconques peuvent être adaptées par un simple circuit en L de deux réactances.



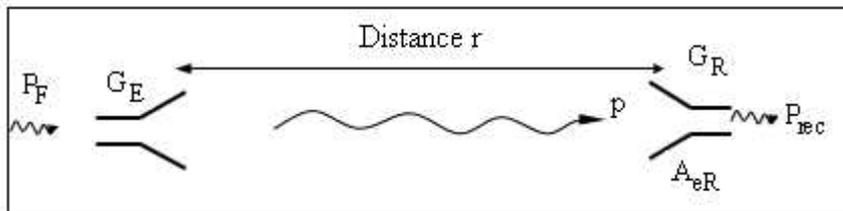
Circuit d'adaptation



Adaptation avec une section en L

Equation des télécommunications (Friis)

L'équation des télécommunications permet de calculer la puissance totale captée par une antenne en fonction des paramètres de la liaison.



Au niveau de l'antenne de réception, la densité de puissance est : $p = \frac{P_F}{4\pi r^2} G_E$

La puissance totale captée est donnée par $P_{rec} = p \cdot A_{eR}$

Ce qui donne $P_R = \frac{P_F}{4\pi r^2} G_E A_{eR}$ avec $G_R = \frac{4\pi A_{eR}}{\lambda^2}$

Finalement on trouve : $P_{rec} \approx P_F G_E G_R \left\{ \frac{\lambda}{4\pi r} \right\}^2$ (Formule de Friis)

La formule précédente suppose des charges adaptées et la même polarisation des antennes et n'inclut pas les pertes atmosphériques. Dans le cas contraire, on doit utiliser la formule suivante :

$$P_{rec} = P_F G_E G_R \frac{1}{4fR} \frac{1}{L} \eta_{pol} (1 - |\rho_E|^2) (1 - |\rho_R|^2)$$

ρ_E coefficient de réflexion antenne émetteur

ρ_R coefficient de réflexion antenne récepteur

L (>1) pertes atmosphériques

$$\eta_{pol} = |\hat{a}_W \cdot \hat{a}_i^*|^2 \quad \text{où} \quad \begin{cases} \hat{a}_W & \text{polarisation de l'onde incidente} \\ \hat{a}_i & \text{polarisation de l'antenne} \end{cases}$$

Expression logarithmique de la formule de Friis

Dans les calculs de bilan de liaison radioélectrique, l'équation de Friis est couramment remplacée par son expression logarithmique en décibels :

$$P_{rec} \text{ (dBW)} = P_F \text{ (dBW)} + G_E \text{ (dB)} + G_R \text{ (dB)} - \underbrace{20 \text{Log}(r_{km}) + 20 \text{Log}(f_{MHz}) + 32,44}_{\text{Pertes de propagation}} - L \text{ (dB)}$$

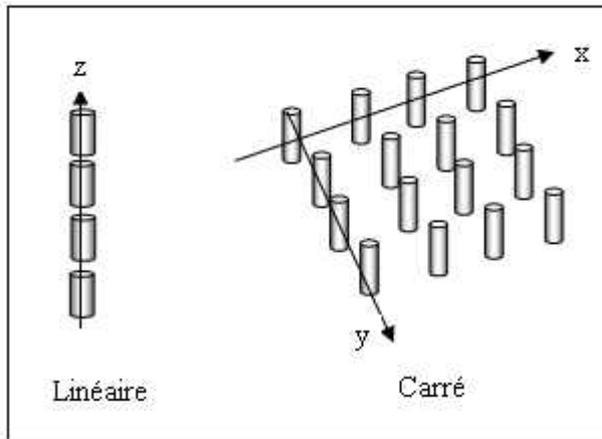
III.4 Groupements d'antennes

III.4.1 Les réseaux

Un objectif important en télécommunications est d'améliorer le rapport signal/bruit à la réception. Cette amélioration peut être obtenue en utilisant des antennes directives à grand gain en émission et en réception

Une des méthodes pour obtenir des antennes directives est d'utiliser des arrangements d'éléments rayonnants de même type régulièrement espacés de telle façon que leur contribution individuelles s'ajoutent dans certaines directions et s'annulent dans d'autres. Ces arrangements sont appelés des réseaux.

Les éléments du réseau peuvent être arrangés de plusieurs manières : en ligne, en rectangle, en cercle...



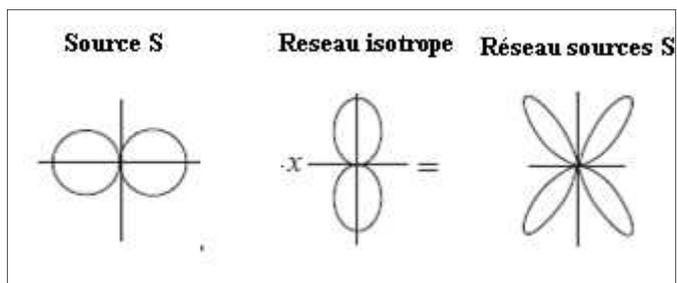
Réseaux d'antennes

Théorème de multiplication de diagrammes

Soit $E(\text{source})$ le champ rayonné par la source S

et soit $E(\text{réseau isotrope})$, le champ rayonné par un réseau de N sources isotropes

Alors le champ rayonné par N sources S identiques est donné par :



$E_{\text{total}} = E_{\text{source}} \times E_{\text{réseau isotrope}}$

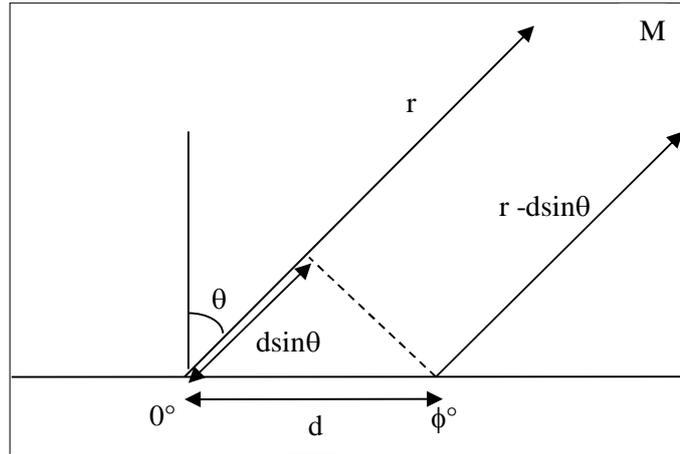
Théorème de multiplication

Exemple de deux sources

Le réseau le plus simple est constitué de deux sources identiques alimentées avec des courants de même amplitude et de même phase. Les deux sources produisent des ondes sphériques qui s'ajoutent de forme constructive dans des directions déterminées et qui s'annulent dans d'autres directions.

La distance entre les deux sources est d,

Les courants qui alimentent les deux sources sont dans un rapport $\frac{I_1}{I_0} = ae^{j\phi}$, ϕ étant la différence de phase entre les courants.



La différence de trajet entre les rayons supposés parallèles est $d \cos \theta$

Le champ rayonné à grande distance par les deux sources est :

$$E_M = I_0 \frac{e^{-jkr}}{r} + I_1 \frac{e^{-jk(r-d\sin\theta)}}{r-d\sin\theta} \approx I_0 \frac{e^{-jkr}}{r} + aI_0 e^{j\phi} \frac{e^{-jk(r-d\sin\theta)}}{r}$$

$$E_M = I_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \left(1 + a e^{jk(d\sin\theta + \phi)} \right)$$

Le Facteur de réseau des deux sources est :

$$F_r = \left| 1 + a e^{j(kd\sin\theta + \phi)} \right|$$

On définit un nouvel angle $\psi = kd \sin \theta + \phi$ qui représente la différence de phase entre les deux sources dus au à la différence de trajet et au déphasage des courants :

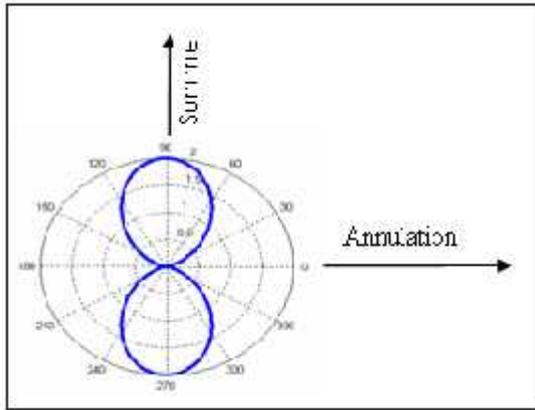
$$F_r = \left| 1 + a e^{j\psi} \right|$$

$$F_r = 2 \left| \cos \left(\frac{\psi}{2} \right) \right|$$

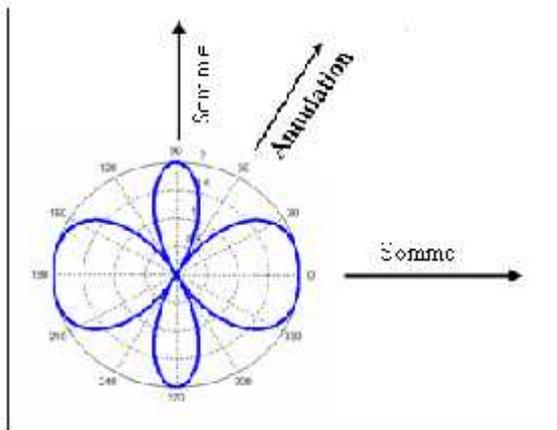
On suppose $a=1$, alors

On aura une interférence constructive lorsque la différence de trajet est un multiple de λ et une annulation lorsque cette différence est un multiple impair de $\lambda/2$.

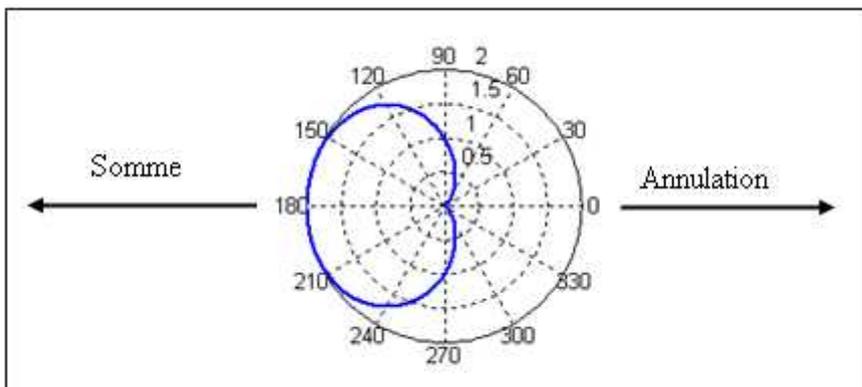
- Si la séparation entre les deux sources est de $\lambda/2$ et $\phi=0$, alors $F_r = \left| \cos \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \right) \right|$: on obtient un maximum dans la direction perpendiculaire à l'alignement et un nul dans la direction de l'alignement.



- Si la séparation entre les deux sources est de λ et $\phi=0$, alors $F_r = |\cos(\pi \sin\theta)|$: des maximums se produiront dans la direction perpendiculaire à l'alignement et dans la direction de celui-ci et des nuls dans les directions $e^{\pm 60^\circ}$ et $\pm 240^\circ$



- Si la séparation est de $\lambda/4$ et la différence de phase de $\pi/2$, alors $F_r = \left| \cos\left(\frac{\pi}{4} \sin\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right|$: les ondes s'ajoutent dans la direction des x, et s'annulent dans la direction opposée.



L'utilisation d'un réseau permet d'obtenir deux résultats :

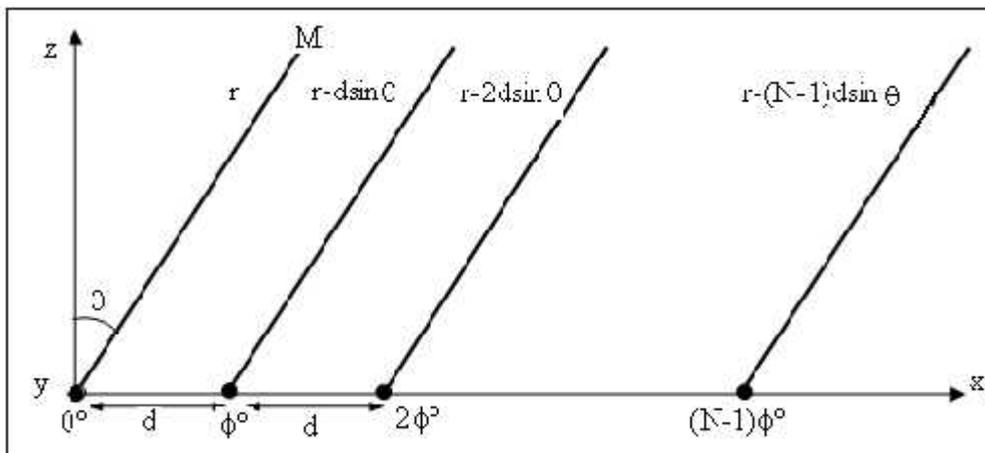
- Un diagramme directif
- Un déphasage relatif des courants alimentant les antennes permet d'orienter le diagramme dans des directions données : c'est le principe des antennes dites à *balayage électronique*.

Réseaux linéaires

L'alignement est constitué de N sources isotropes équidistantes (distance d), l'une située à l'origine. La déphasage des courants est progressif avec un pas ϕ .

Facteur de réseau d'un réseau linéaire

On considère un alignement de N sources isotropes séparées par une distance d et alimentées avec des courants déphasés de ϕ .



Le courant alimentant l'antenne N° n est de la forme : $I_n = a_n e^{jn\phi} I_0$

Le champ total rayonné par les N sources est de la forme :

$$\frac{e^{jkr}}{r} I_0 \left(a_0 + a_1 e^{j(kd \sin \theta + \phi)} + a_1 e^{2j(kd \sin \theta + \phi)} + a_1 e^{3j(kd \sin \theta + \phi)} + \dots \right)$$

Le facteur de réseau est :

$$F_r = \left(a_0 + a_1 e^{j(kd \sin \theta + \phi)} + a_1 e^{2j(kd \sin \theta + \phi)} + a_1 e^{3j(kd \sin \theta + \phi)} + \dots \right)$$

En posant $\psi = kd \sin \theta + \phi$, on aura :

$$F_r = \left(a_0 + a_1 e^{j\psi} + a_1 e^{2j\psi} + a_1 e^{3j\psi} + \dots \right)$$

III.4.2 Cas d'une distribution de courant uniforme

Dans le cas d'une distribution uniforme, tous les courants ont même amplitude ($a_i = Cte$).

Facteur de réseau

Le facteur de réseau est donné par :

$$F_r(\psi) = 1 + 1e^{j\psi} + 1e^{2j\psi} + 1e^{3j\psi} + \dots = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = \underbrace{e^{j\frac{(N-1)\psi}{2}}}_{\text{déphasage du au décentrage}} \underbrace{\frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}}_{\text{amplitude du réseau}}$$

Le facteur de réseau est $\left| F_r(\psi) \right| = N \frac{\left| \sin \frac{N\psi}{2} \right|}{\left| \sin \frac{\psi}{2} \right|}$ avec $\left| \psi \right| < \pi$

Diagramme de rayonnement

- Le diagramme est de révolution autour de l'axe de l'alignement.
- L'espace visible est défini par l'ensemble des valeurs de ψ qui correspondent à des directions de l'espace réel : comme $\psi = kd \sin \theta + \phi$ et que $-1 \leq \sin \theta \leq 1$, l'espace réel est tel que $\psi \in [-kd + \phi, kd + \phi]$
- Le maximum de champ se produit pour $\psi = 0$, soit $\phi = -kd \sin \theta_M$ et donc

$$\theta_M = \text{Arcsin} \frac{w}{kd}$$

- Les premiers nuls ont lieu lorsque $\frac{N\psi}{2} = m\pi$ ($m=1,2,\dots$)

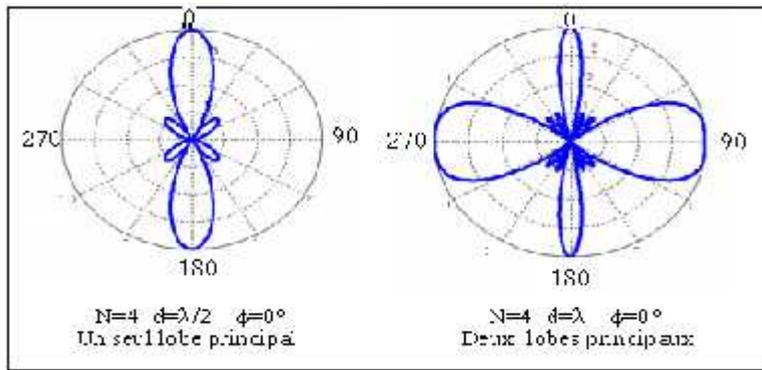
III.4.3. Influence des paramètres dans la conception des réseaux

Effet de la distance d

En général, on ne doit pas avoir un dédoublement du lobe principal dans la zone balayée. Le nombre de lobes principaux dans l'espace réel dépend de la distance d entre les sources :

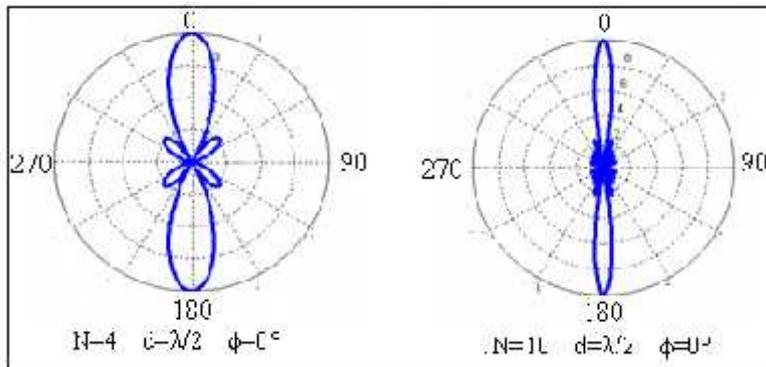
- Si $d \leq \lambda / 2$, il y a un seul lobe principal
- Si $d \geq \lambda$, il y a plus d'un lobe principal. Les lobes en plus s'appellent lobes de réseau.
- Lorsque $\lambda / 2 \leq d \leq \lambda$, l'apparition de lobes de réseau dépend du déphasage ϕ . Pour l'éviter,

on doit écrire $\psi < \pm 2\pi$, ce qui donne : $d < \frac{\lambda}{2 \left| \sin \theta_M \right|}$



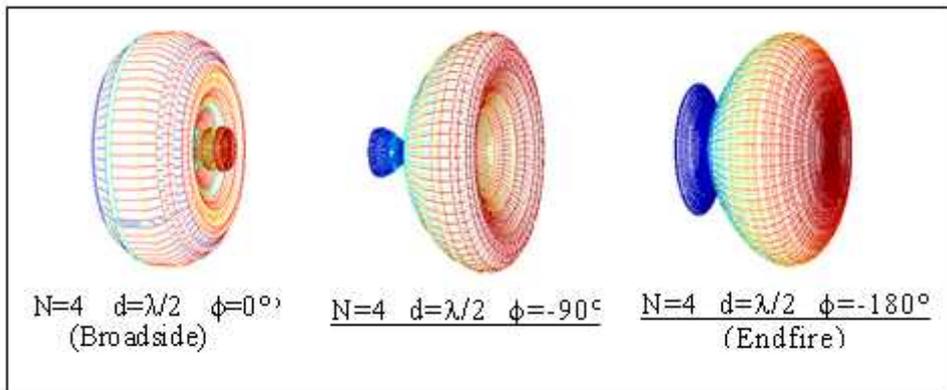
Effet du nombre N de sources

Pour une distance d constante, l'augmentation de N augmente la directivité et le nombre de lobes secondaires et diminue donc l'ouverture du lobe principal.



Effet du déphasage φ

Une phase variable permet d'orienter le lobe de broadside ($\theta_m = \pm 90^\circ$) à endfire ($\theta_m = 180^\circ$).



Cas particuliers de réseaux linéaires

Réseau broadside

La direction de rayonnement max est dirigée perpendiculairement à l'alignement. Il est obtenu lorsque tous les éléments sont alimentés avec des courants en phase ($\phi = 0$).

Ñ Ouverture entre les premiers nuls (FNBW)

FNBW = 2θ₁ avec $\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{Nd}$ d'où $\boxed{\text{FNBW} \approx 2 \text{Arctan} \frac{\lambda}{Nd}}$

Pour des réseaux grands (N>>1), on aura $\text{FNBW} = \frac{2\lambda}{Nd} \approx \frac{2\lambda}{L}$ (rad)

Ñ Ouverture mi-puissance (HPBW)

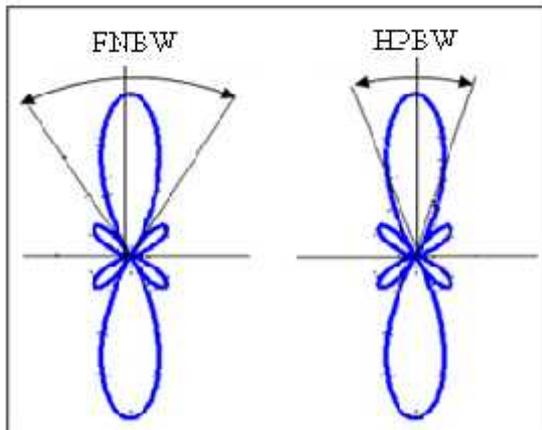
Pour calculer l'ouverture mi-puissance, il faut résoudre l'équation : $\frac{\sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} = \frac{N}{\sqrt{2}}$

Pour N grand, on peut utiliser l'approximation suivante : $\frac{\sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{N\frac{\Psi}{2}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$

Comme $\frac{\sin u}{u} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ pour u=1,39, on peut écrire : $N\frac{\Psi}{2} = 1,39$, soit $\sin \theta_0 = 0,44 \frac{\lambda}{Nd}$

$\boxed{\text{HPBW} \approx 2 \text{Arctan} 0,44 \frac{\lambda}{Nd}}$

Lorsque N>>1, on aura $\text{HPBW} \approx 0,88 \frac{\lambda}{Nd} \approx 0,88 \frac{\lambda}{L}$ (rad)



Ñ Lobes secondaires

Les positions des max des lobes secondaires se situent approximativement entre les nuls. La position angulaire du lobe secondaire N°k est donnée par :

$$\in \mathbb{N} \frac{2m < 1}{N} f \quad \text{ou} \quad \boxed{N \text{ Arcsin } \frac{2m < 1}{N} \frac{1}{d}}$$

Les niveaux relatifs des lobes secondaires approchent $20 \text{Log} \left(\frac{2}{(2m+1)\pi} \right)$ dB pour N grand.

Le niveau relatif du premier lobe secondaire est à -13,46 dB.

Ñ Directivité

Pour un réseau linéaire uniforme broadside, la directivité est donnée par :

$$D_{\text{broadside}} \approx \frac{N \cdot \text{kd} \cdot N^2}{N \cdot \sum_{m=1}^{N>1} \frac{1}{m} \sin^2 \theta m \text{kd}}$$

On remarque que lorsque $d = p \frac{\lambda}{2}$ ($p=1,2,\dots$), on a $D=N$

Pour des distances $d \leq 0,8\lambda$, la directivité peut être approchée par une droite : $D_{\text{broadside}} \approx \frac{2dN}{\lambda}$

Dans le cas d'une distribution non uniforme :

$$D_{\text{broadside}} \approx \frac{\left(\sum_{i=1}^N I_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N I_i^2}$$

Réseau end-fire

C'est un réseau dont la direction de rayonnement max est dirigée selon l'alignement ($\phi = -kd$).

Ñ Ouverture entre les premiers nuls (FNBW)

Les positions des nuls sont données par $\cos \theta_m = \frac{m}{N} + 1$

On trouve $\text{FNBW} \approx 2 \sqrt{\frac{2}{Nd}}$ (rad)

Ñ Ouverture mi-puissance (HPBW)

On trouve $\text{HPBW} \approx 2 \sqrt{0,88 \frac{\lambda}{Nd}}$

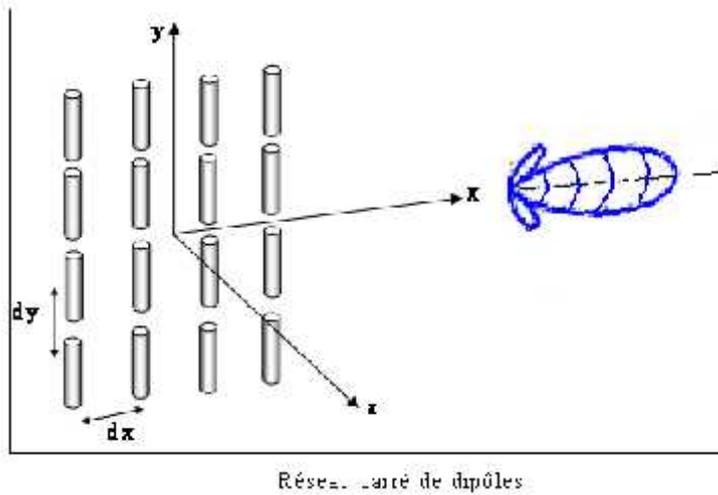
Ñ Directivité

$$D_{\text{Endfire}} \approx \frac{N \cdot \text{kd} \cdot N^2}{N \cdot \sum_{m=1}^{N>1} \frac{1}{m} \sin^2 \theta 2m \text{kd}}$$

On remarque que lorsque $d = p \frac{\lambda}{4}$ ($p=1,2,\dots$), on a $D=N$

Réseaux plans

Un réseau plan est un réseau à deux dimensions formé par des rangées parallèles. Il permet d'obtenir un faisceau en forme de pinceau (pencil beam).



Facteur de réseau

Si le courant alimentant l'élément N° (mn) est séparable, c'est-à-dire, s'il peut s'écrire comme le produit de deux courants :

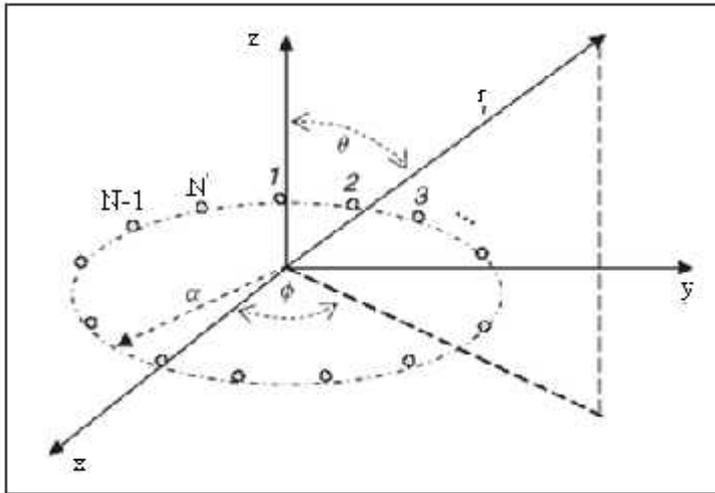
$$I_{mn} = a_{mn} e^{j(m\phi_x + n\phi_y)} = b_m e^{jm\phi_x} c_n e^{jn\phi_y}$$

Réseaux circulaires

Les réseaux circulaires sont des réseaux dont les antennes élémentaires sont situées sur un cercle. C'est l'antenne fixe la plus simple qui permette de rayonner (ou de recevoir) sur un angle de 360°.

Si chaque source est munie d'un déphaseur, on peut pointer dans n'importe quelle direction du plan horizontal un faisceau qui garde les mêmes caractéristiques (contrairement à un réseau linéaire dont le diagramme s'élargit d'autant plus que l'on pointe le faisceau loin de la normale).

On peut aussi former simultanément des faisceaux par FFC (formation de faisceau par calcul) dans toutes les directions.



Réseau linéaire

Réseaux non uniformes

Les réseaux non uniformes sont des réseaux dans lesquels les courants d'excitation sont variables. Il y a différentes manières d'exciter les éléments d'un réseau pour obtenir certaines caractéristiques (gain largeur de faisceau, niveaux de lobes secondaires...). Il existe plusieurs méthodes de synthèse :

Méthode de Schelkunov

La méthode de Schelkunov permet la conception d'un diagramme de réseau possédant des nuls dans des directions déterminées. Le facteur de réseau d'un réseau linéaire de N antennes s'écrit :

$$F(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n z^n = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_{N-1} z^{N-1} \quad \text{avec } z = e^{j\psi}$$

qui peut se mettre sous la forme: $F(z) = a_{N-1} (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_{N-1})$

Connaissant l'emplacement des nuls, on peut développer le polynôme précédent et obtenir les courants d'excitation a_i .

Méthode binomiale

Les excitations sont obtenues en développant le polynôme suivant : $F(\psi) = (1 + e^{j\psi})^{N-1}$

	1						N=1	
	1	1					N=2	
	1	2	1				N=3	
	1	3	3	1			N=4	
	1	4	6	4	1		N=5	
	1	5	10	10	5	1	N=6	
	1	6	15	20	15	6	1	N=7

Coefficients binomiaux

L'avantage de cette méthode est d'obtenir des lobes secondaires de niveaux très bas (nuls si $d=\lambda/2$). L'inconvénient, c'est la largeur du lobe principal et la grande plage de variation des amplitudes des courants d'excitation.

Méthode de Dolph-Tschebyshev

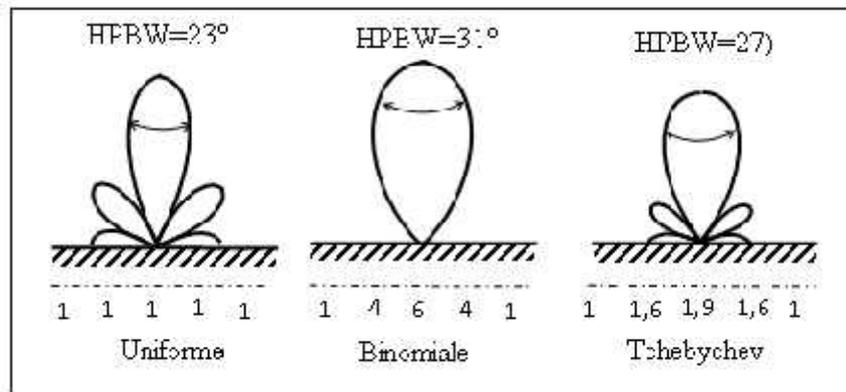
Cette technique est un compromis entre les distributions uniforme et binomiale. L'idée est que pour un niveau de lobes secondaires donné, on obtienne une ouverture minimale.

Les courants d'excitation sont obtenus en identifiant le facteur de réseau de l'alignement à un polynôme de Tschebyshev de degré N-1.

Les polynômes de Tschebyshev sont reliés par la relation de récurrence suivante :

$$T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x)$$

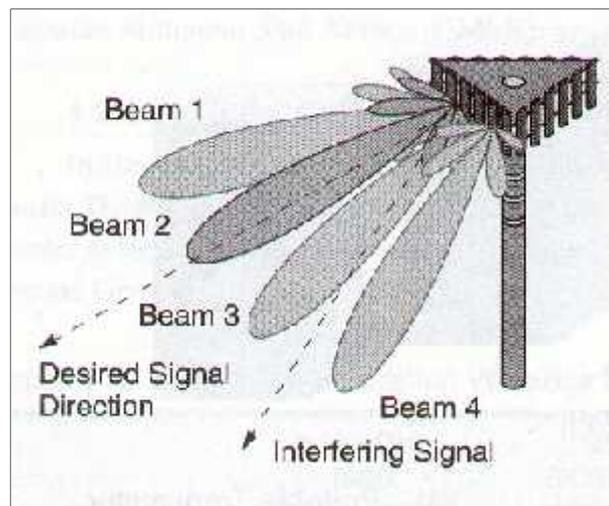
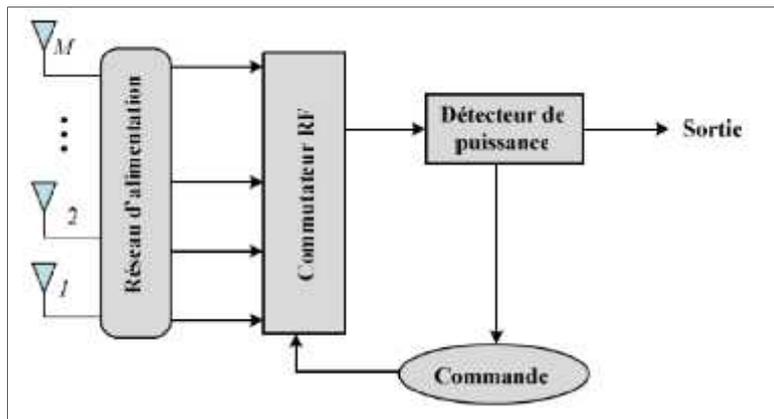
Dans cette méthode, les lobes secondaires ont le même niveau. On l'utilise lorsque le nombre d'éléments n'est pas élevé.



Les systèmes d'antennes à commutation de faisceaux

Ces systèmes divisent l'espace angulaire en micro secteurs chacun contenant un diagramme de rayonnement prédéterminé. Lorsque l'utilisateur entre dans la zone de couverture du système, l'antenne détermine dans quel secteur se situe l'utilisateur et commute sur le faisceau correspondant (matrice de Butler)

La limitation principale de ces systèmes vient du fait qu'ils utilisent des faisceaux prédéterminés car ils ne permettent pas de minimiser l'influence du signal interférent qui pourrait se trouver autour du centre du faisceau principal, on aura donc une dégradation des performances du système.



Systèmes à commutation de faisceaux

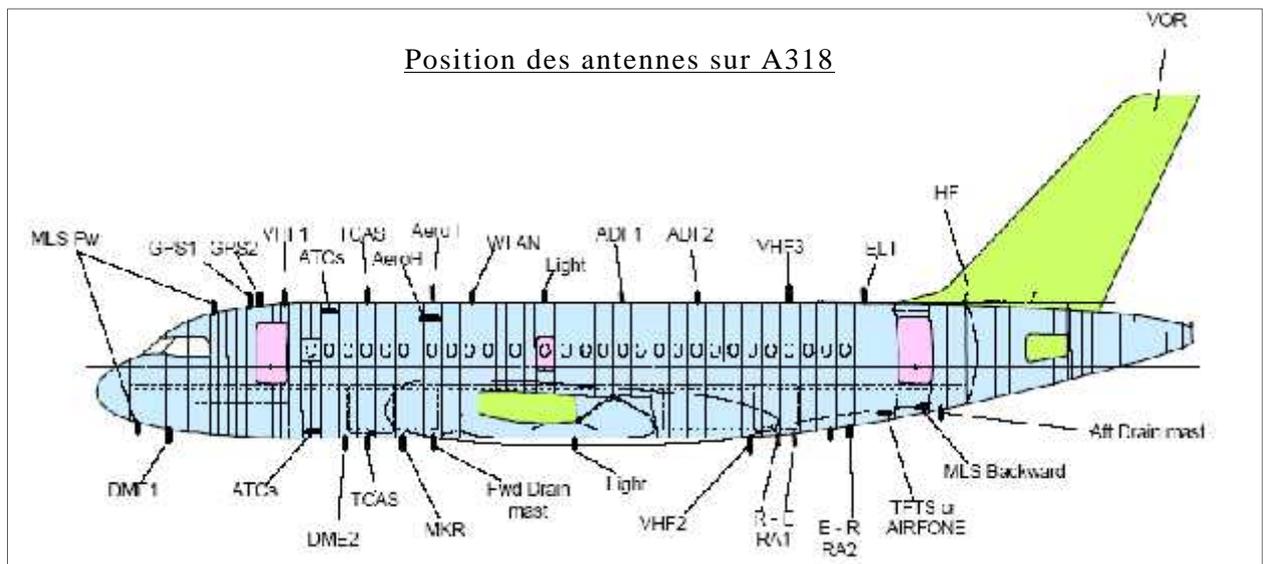
Antennes d'avions

La conception d'antennes pour les avions diffère des autres applications. Les antennes d'avions doivent supporter de sévères efforts et la taille et la forme du fuselage jouent un rôle important dans la détermination des caractéristiques de l'antenne.

Spectre de fréquence utilisé par les systèmes d'avions

- Communication
 - VHF Communication 118 -136.975 MHz
 - HF Communication 2 -30 MHz
 - SATCOM (Inmarsat) TX : 1.6265 -1.6605 GHz RX : 1.530 - 1.559 GHz
 - Emergency Locator Transmitter 121.5 MHz -243 MHz- 406 MHz
- Navigation
 - ADF 190 kHz -1.75 MHz
 - VOR 108 -117.95 MHz
 - Marker 75 MHz

- ILS-Loc/VHF Data Broadcast 108.1 -117.95 MHz
- ILS -Glide/Slope 329.15 - 335 MHz
- DME TX : 1.025 -1.15 GHz RX : 0.962 - 1.212 GHz
- MLS 5.031 - 5.0907 GHz
- GPS 1.57542 GHz
- Radio Altimeter 4.2 -4.4 GHz
- Surveillance
- Radar Météo 9.330 – 9.354 GHz
- ATC Mode S TX : 1090 MHz RX : 1030 MHz
- T.CAS TX : 1030 MHz RX : 1090 MH



IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de simulation de la couverture VHF pour le nord algérien, on' a choisie le nord car il est plus dense et ce n'est pas facile de faire une simulation de tout le territoire Algérien car sa prend beaucoup de temps, et de données.

IV.1.Élaboration des couvertures VHF

IV.1.1. Élaboration des couvertures VHF via le logiciel Radio mobile

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

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 communication, à savoir la VHF dans le cas de notre d'étude. Pour rappel, ce dernier moyen de communication 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 IV.1 : 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 VHF 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. La figure (4.7), reprend ses caractéristiques.

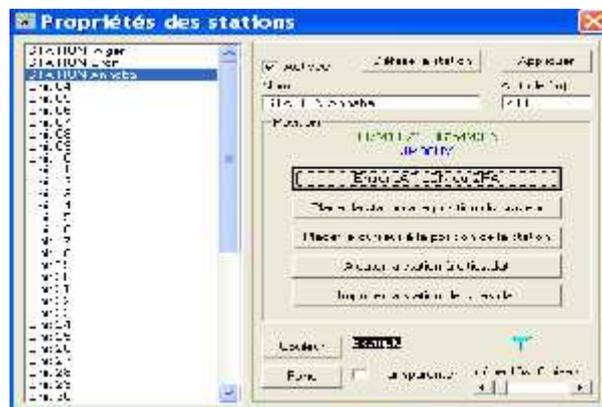


Figure IV.2: Positionnement des stations VHF sous l'environnement Radio mobile.

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



Figure IV.3: Positionnement des stations VHF sous l'environnement Radio mobile.

Les coordonné géographiques

Les régions	Alger	Annaba	Constantine	Oran
Latitude	36° 41' 40" N	36°49'20"N	36°17'07" N	35°37' 38"N
Longitude	3°13'01"E	7°48'34"E	6°37'09"E	0°36'41 "W
Altitude	25m (82ft)	5m (16ft)	706m (2316ft)	91m (299ft)

Les régions	Bou Saâda	Chlef	Tlemcen	Béjaia
Latitude	35°19'53"N	36°13'01"N	35°00'55"N	36°42'43"N
Longitude	4°12'16" E	1°20'24" E	1°27'03"W	5°04'10"E
Altitude	459m (1506ft)	153m (502ft)	248m (814)	6m(20ft)

Tableaux des coordonnés géographiques

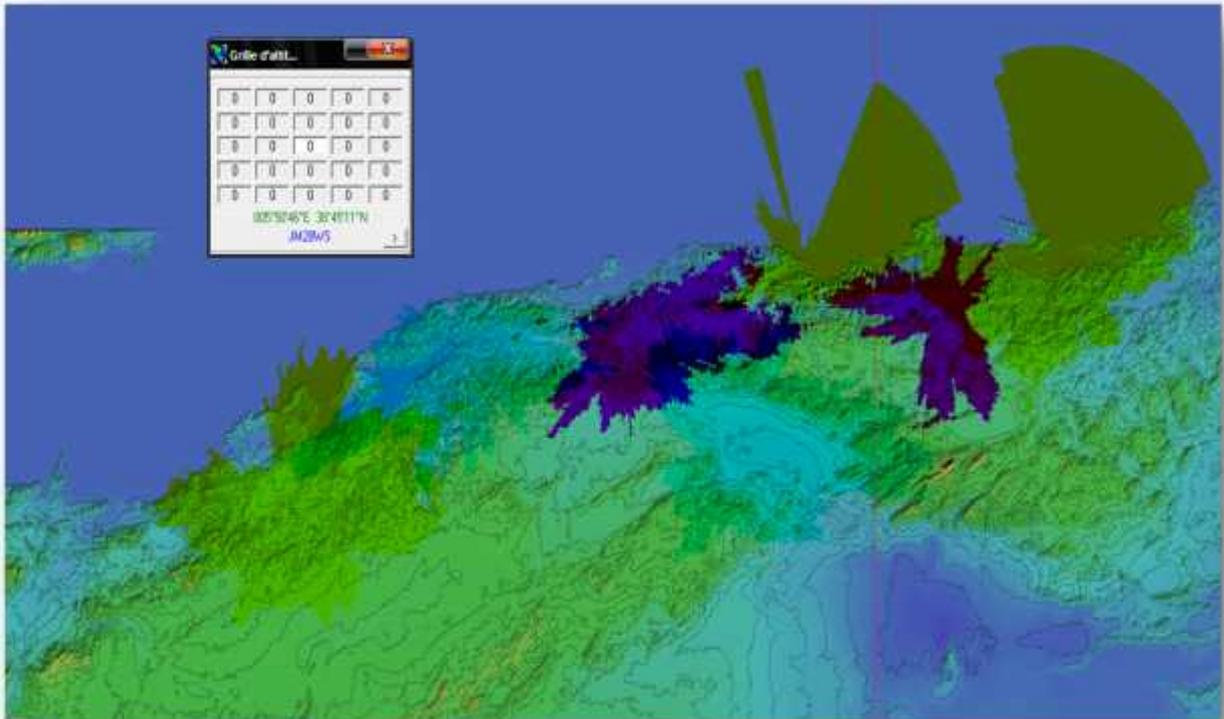


Figure IV.4: Couverture VHF a une Altitude de 1000m

Commentaire : en remarque que la couverture a 1000m est mauvaise car on trouve beaucoup d'obstacle.

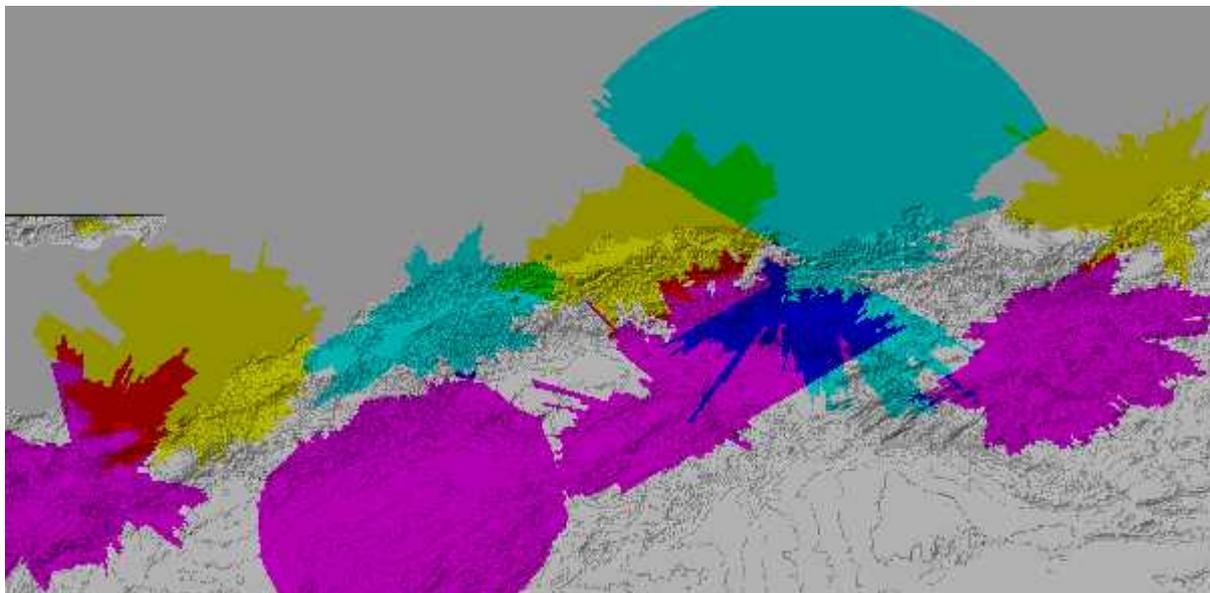


Figure IV.5 : Couverture VHF a une Altitude de 1500m

Commentaire : ici a 1500m il ya une a amélioration concernant la porté

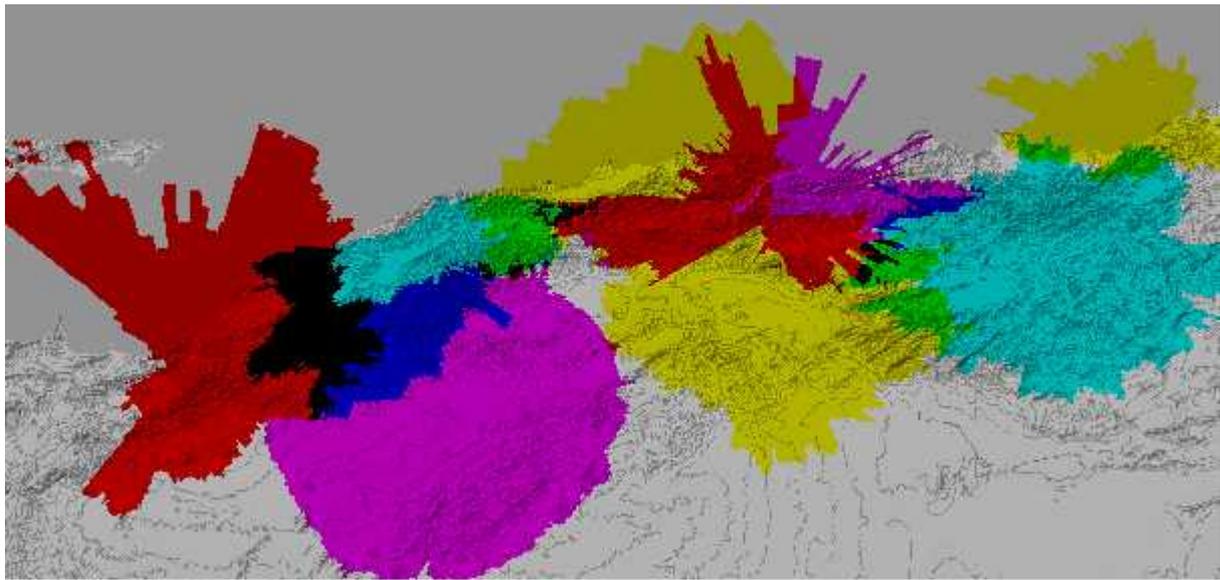


Figure IV.6: Couverture VHF a une Altitude de 2000m

Commentaire : a 2000m on remarque qu'on a une couverture idéale si on compare avec les résultats réels. En plus on remarque même au niveau de la mer il y a des reliefs due au logiciel qui prend en considération l'humidité et des autres facteurs.

. IV.2.1 Élaboration des couvertures VHF via le logiciel MapInfo

Nous résumons dans le paragraphe suivant, les étapes nécessaires pour l'élaboration des couvertures VHF du Nord Algérien à l'aide du logiciel **MapInfo**. C'est un logiciel reconnu par la communauté scientifique du domaine de la science de la terre.

Le système de gestion de base de données localisées MapInfo créé par MapInfo Corporation, un logiciel qui vous donne les moyens d'accéder et d'analyser des données d'intérêt organisationnel par la cartographie

La technologie développée Par Mapinfo permet de réaliser, sur micro-ordinateur, des opérations Jusque là réservées aux gros Systèmes.

La clé d'accès, un dénominateur commun la localisation géographique. En utilisant la géographie, vous Pouvez mettre en corrélation des données qui proviennent de différentes bases de données dans une seule vue cartographique.

Avec MapInfo, vous serez rapidement en mesure de découvrir des relations, tendances ou modèles qui autrement seraient passés inaperçus. Utiliser des solutions géographiques, c'est se permettre de voir entre les lignes et les colonnes d'un tableur ou d'un rapport qui provient d'une base de données

Si vous avez à prendre des décisions dans des temps limités, désirez approfondir vos analyses, améliorées L'efficacité de vos opérations à l'intérieur de votre organisation ou augmenter votre compétitivité. Il est temps de passer au pouvoir de la géographie avec MapInfo.



Figure IV.6.couverture a une altitude de 1000m

Commentaire : ici en remarque que cette couverture a une altitude de 1000m, montre le relief des obstacles qui existent.

Alors cette couverture ca nous intéresse pas il faut qu'en augmente l'altitude.

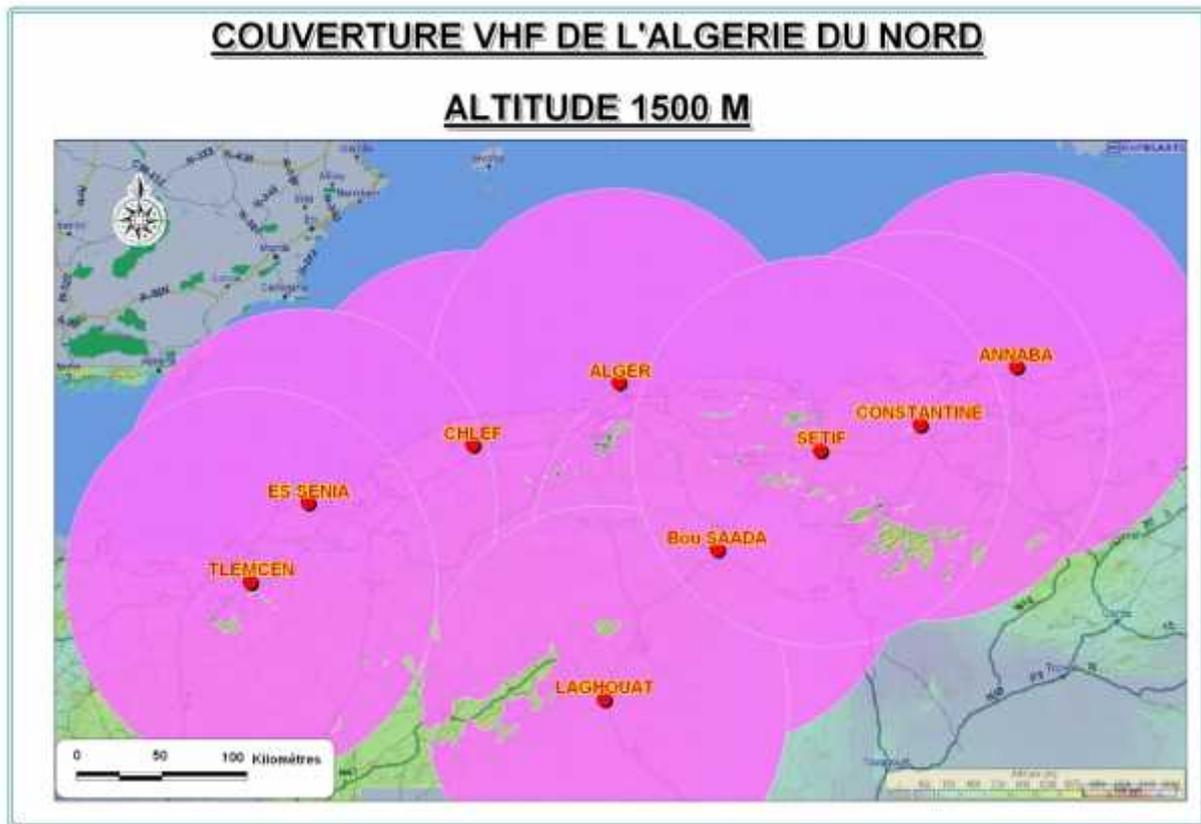


Figure IV.7 couverture a une altitude de 1500m

Commentaire : ici en remarque qu'il ya une amélioration dans la couverture due au minimum d'obstacles.

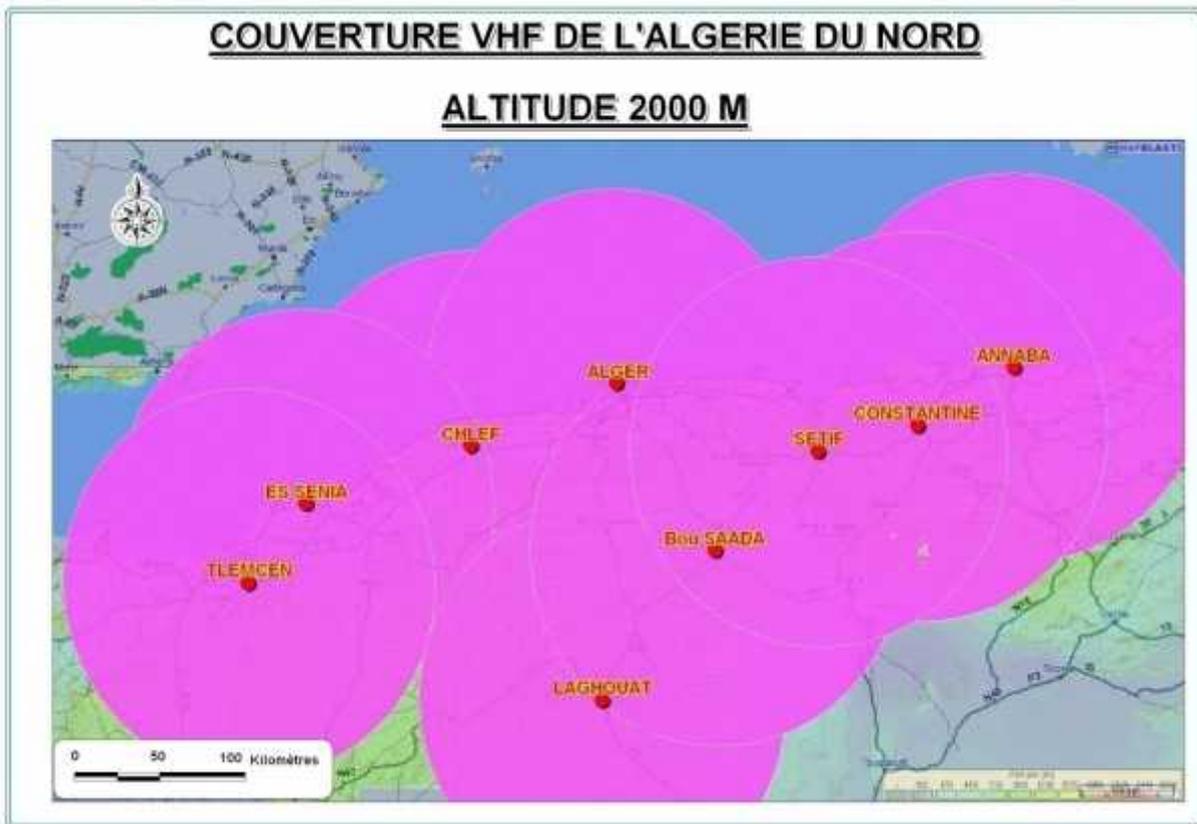
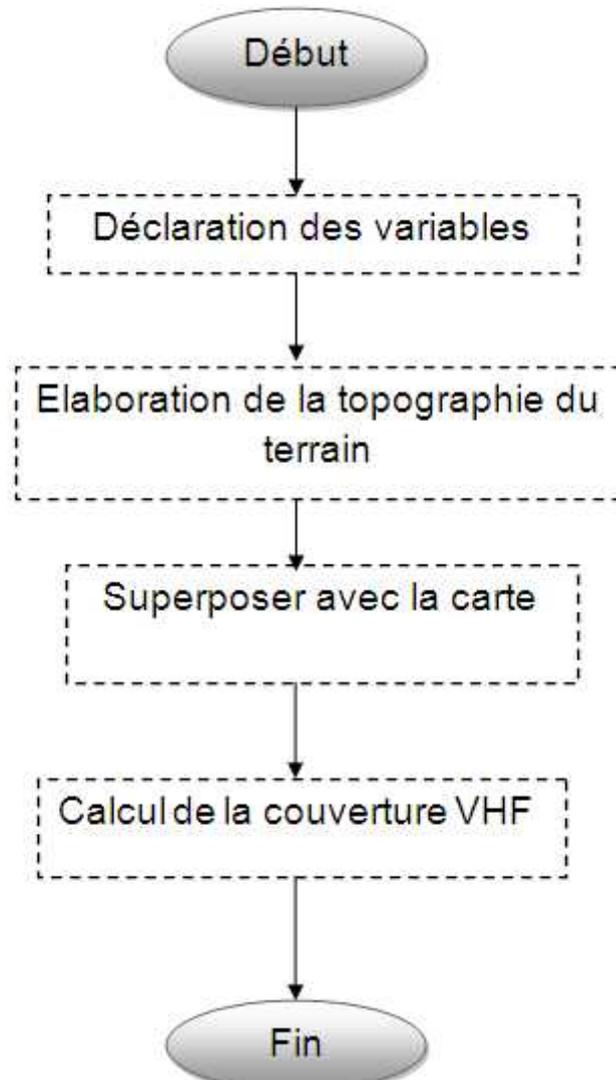


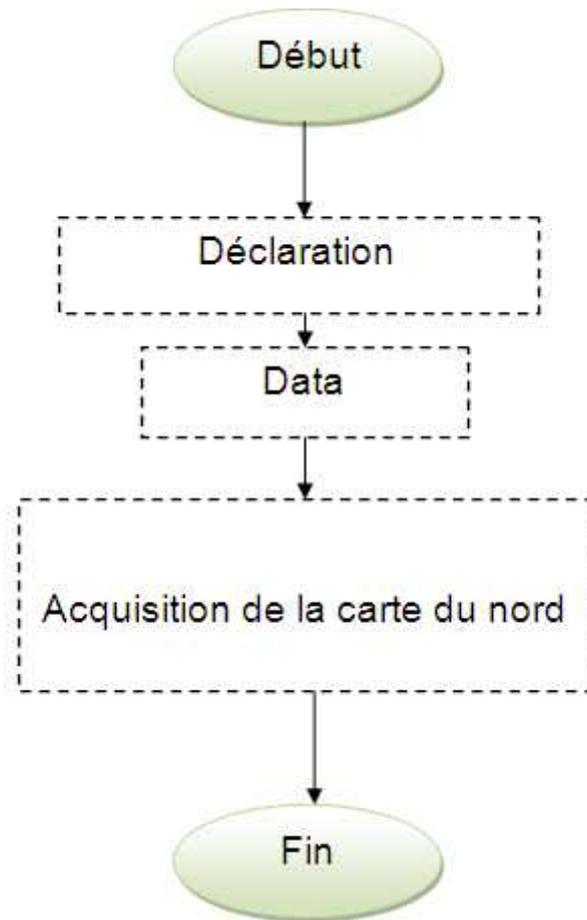
Figure IV.8 : couverture a une altitude de 2000m

Commentaire : ici on obtient une couverture parfaite à 2000m, car il n'y a pas des obstacles a 2000m sauf quelle que point au niveaux de sud-est de Sétif.

IV.3. Elaboré une interface avec le MATLAB

L'organigramme





Affichage :

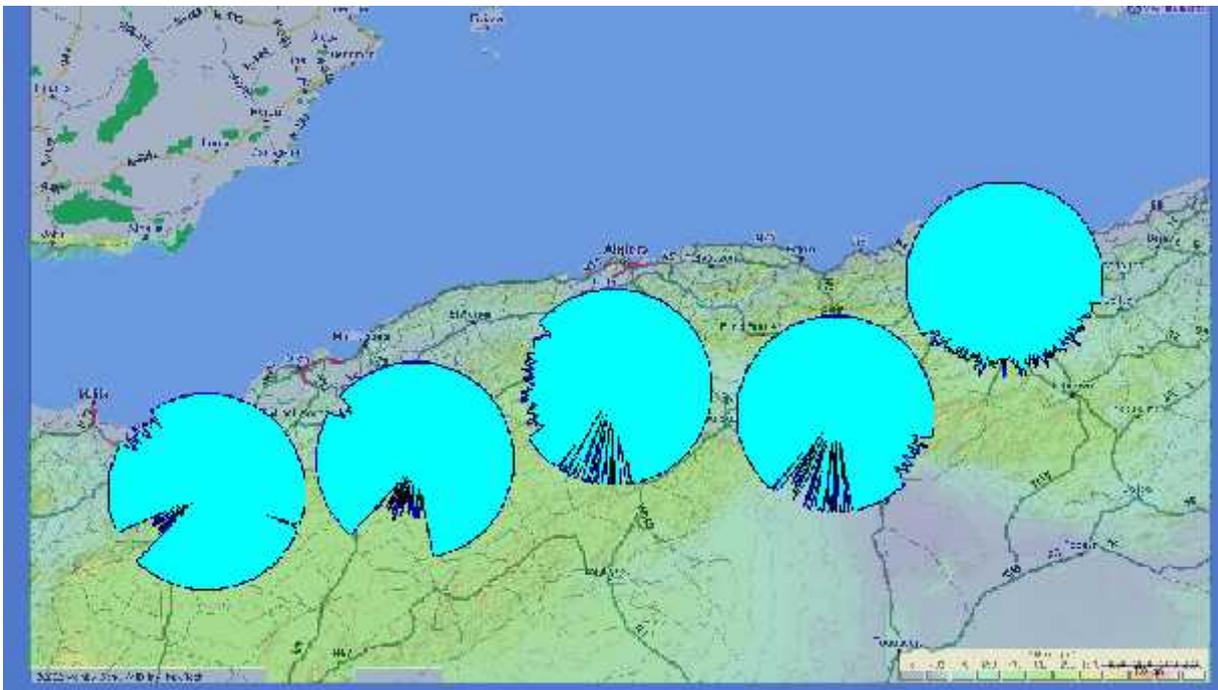


Figure IV.9. la couverture de la VHF

IV.4 .Conclusion

Après notre étude et nos simulations on trouve que les résultats sont proches de la réalité (les résultats qui existe). Malgré il ya une différence ente le Radiomobil et le MapInfo due a la base de donné de chaque logiciel.

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 VHF
- L'utilisation de nouvelles technologies de surveillance, à savoir: l'ADS, MSSR, etc...

Et on trouve que ce n'est pas facile de faire une couverture VHF en Algérie à cause de la difficulté des reliefs.

Mon travail est une base pour les étudiants qui veulent faire n'importe quelle couverture au concept CNS/ATM ;

Bibliographie