

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
-----  
**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**  
-----  
**DEPARTEMENT TELECOMMUNICATION**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention

du DIPLOME d'INGENIEUR

*Spécialité* : Télécommunication

*Option* : Réseaux et Systèmes (R.S.)

*par* : **ANDRIANANDRASANA Hélène Espérance**

***ETUDE DE L'AMELIORATION DE L'INFRASTRUCTURE  
DU CONTROLE AERIEN A MADAGASCAR***

Soutenu le 08 janvier 2009 devant la Commission d'Examen composée de :

Président :

M. ANDRIAMIASY Zidora

Examineurs :

M. RATSIHOARANA Constant  
M. RAZAFINDRADINA Henri Bruno  
Mlle ANDRIANTSILAVO Haja

Directeurs de mémoire :

Mme RABEHERIMANANA Lyliane

M. RAKOTOARIMANANA Nirison

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont rendu ce travail possible par leur aide et leur contribution.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) ainsi que Monsieur le Professeur RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste, Chef du département Télécommunication, pour m'avoir permis de travailler dans de meilleures conditions durant ces cinq années d'études.

Je remercie également tous les enseignants chercheurs du Département Télécommunication de l'ESPA, en particulier Monsieur ANDRIAMIASY Zidora, qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance, Monsieur RATSIHOARANA Constant, Monsieur RAZAFINDRADINA Henri Bruno et Mademoiselle ANDRIANTSILAVO Haja, qui ont bien voulu consacrer de leur temps pour juger ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Madame RABEHERIMANANA Lyliane, mon encadreur pédagogique, Monsieur RAKOTOARIMANANA Nirison, Expert en ATM du Département de la Navigation Aérienne à l'Aviation Civile de Madagascar, mon encadreur professionnel, pour m'avoir guidée dans mes travaux de recherche et dans les moments difficiles. Mes remerciements chaleureux à l'endroit de mon père, BOTO ANDRIANANDRASANA Jean Espérant, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication.

J'adresse mes sincères remerciements également à tout le personnel de l'ASECNA, en particulier Monsieur RAZAFY Petera, Chef du bureau Réseaux et Systèmes, Monsieur RAKOTOSON Benjamin, Chef du bureau Maintenance Radioélectrique, Monsieur ANDRIANIERENANA Nary, Ingénieur, Monsieur Lala RAKOTOSON Christian, Technicien du bureau RAD. Je ne saurai oublier Messieurs les Coordonateurs de la gestion des fréquences à l'Office Malagasy d'Etudes et de Régulation des Télécommunications, pour leur accueil chaleureux et toute leur aide malgré leurs occupations.

J'adresse mes vifs remerciements à tout le corps professoral de l'ESPA en général et celui du Département Télécommunication en particulier, sans leurs efforts notre formation n'a pu atteindre cette étape.

Je n'oublierai pas ma mère, mes sœurs ainsi que ma famille pour leurs soutiens bienveillants et leurs encouragements pour ce mémoire et durant mes longues années d'études.

Enfin je réserve mes remerciements les plus chaleureux à mes compagnons de l'équipe Fenitra, nous nous sommes toujours entourés et soutenus pendant les moments difficiles. Sans oublier mes amis, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.



## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>i</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>ii</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>vi</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CONTROLE AERIEN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Organisation de l'espace aérien.....</b>	<b>3</b>
<i>1.1.1.Définition d'un espace aérien .....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.2. Les différents organismes touchant à la navigation aérienne.....</i>	<i>3</i>
1.1.2.1. Au niveau international.....	3
1.1.2.2. Organismes existant à Madagascar.....	4
<i>1.1.3. Types de vols .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.4. Routes aériennes .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.5. Division de l'espace aérien .....</i>	<i>5</i>
<b>1.2. Contrôle du trafic aérien .....</b>	<b>6</b>
<i>1.2.1. Catégories de contrôle.....</i>	<i>6</i>
<i>1.2.2. Services rendus.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.3. Charges du contrôleur .....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.4. Communication aéronefs-sol.....</i>	<i>8</i>
1.2.4.1. Schéma synoptique de la liaison de données.....	8
1.2.4.2. Outils strip et écran radar .....	8
1.2.4.3. Outil <i>data link</i> .....	9
<b>1.3. Contrôle aérien à Madagascar .....</b>	<b>11</b>
<i>1.3.1. Réseaux concernés.....</i>	<i>11</i>
1.3.1.1. Le réseau ATN .....	11
1.3.1.2. Système ADS/CPDLC Madagascar ou SAMAD.....	15
1.3.1.3. Le réseau SITA/ACARS .....	17
<i>1.3.2. Communications .....</i>	<i>19</i>
1.3.2.1. Communications par voix .....	19

1.3.2.2. Communications par données (CPDLC) .....	20
1.3.3. Procédures d'entrée et de sortie et transfert de communications des aéronefs.....	20
1.4. Etude comparative des systèmes utilisés à Madagascar .....	21
1.5. Conclusion .....	21
<b>CHAPITRE 2 : CONCEPT D'AMELIORATION DU CONTROLE AERIEN MALGACHE .....</b>	<b>23</b>
2.1. Sectorisation du territoire .....	23
2.1.1. Motivation .....	23
2.1.2. Contraintes de la sectorisation de l'espace aérien .....	24
2.1.2.1. Contrainte de temps de passage minimum .....	25
2.1.2.2. La contrainte de distance minimum (au sens des routes) .....	25
2.1.2.3. Contrainte de convexité (au sens des routes) .....	25
2.1.2.4. Contrainte de connexité de secteur .....	26
2.1.3. Cas de Madagascar.....	26
2.1.3.1. Procédure de sectorisation .....	27
2.1.3.2. Résultats de la sectorisation .....	28
2.2. Emetteurs VHF .....	29
2.2.1. Les stations VHF déportées .....	29
2.2.2. Synoptique de la communication pilote-contrôleur .....	31
2.2.3. Le dispositif de sélection DS900 .....	32
2.2.3.1. Présentation.....	32
2.2.3.2. Description du fonctionnement de la carte de compensation CCTP12126 .....	33
2.2.3.3. Traitement numérique du signal .....	33
2.2.4. Le multiplexeur MOL2P : multiplexage de voix et de données.....	34
2.2.4.1. Le multiplexage en fréquence .....	35
2.2.4.2. Le multiplexage temporel.....	35
2.2.4.3. Codage de la voix .....	35
2.2.5. Le système FASTCOM.....	37
2.2.5.1. Types de liaisons FASTCOM.....	38
2.2.5.2. Types d'accès utilisateur d'un réseau FASTCOM.....	39
2.2.5.3. Modes de fonctionnement .....	40

2.2.5.4. Mode d'accès au réseau .....	40
2.2.6. Antennes VHF .....	41
2.2.6.1. A la réception .....	41
2.2.6.2. A l'émission .....	41
2.2.7. Conclusion de l'implantation de la couverture VHF.....	43
2.2.7.1. Couverture VHF de la FIR géré par Madagascar .....	43
2.2.7.2. Calcul de la puissance des émetteurs .....	44
2.3. Communications par satellite .....	48
2.3.1. Architecture globale de l'AMSS.....	49
2.3.2. Le protocole X25 .....	49
2.3.2.1. Définitions .....	50
2.3.2.2. Utilité et moyens du X25 .....	50
2.3.2.3. Format général d'un paquet de données.....	50
2.3.3. Points forts du système AMSS.....	51
2.3.4. Points faibles du système AMSS.....	51
2.4. Conclusion .....	51
<b>CHAPITRE 3 : SIMULATION DES CARACTERISTIQUES DES EMETTEURS UTILISES.....</b>	<b>53</b>
3.1. Simulation des émetteurs VHF sous SPECTRA .....	53
3.1.1. Présentation du logiciel .....	53
3.1.2. Travail effectué .....	53
3.1.3. Conclusion de la simulation sous Spectra.....	60
3.2. Simulation sous Matlab .....	60
3.2.1. Présentation de Matlab .....	60
3.2.2. Information sur le logiciel .....	61
3.2.3. Cas d'une propagation idéale .....	63
3.2.4. Cas d'une propagation réelle.....	65
3.2.5. Trajectoire et fréquence.....	67
3.2.6. Conclusion de la simulation sous Matlab .....	68
<b>ANNEXE 1 : LES COMMUNICATIONS VOCALES .....</b>	<b>71</b>

<b>ANNEXE 2 : LA COMMUNICATION HF .....</b>	<b>72</b>
<b>ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES GENERALES DU DS 900 .....</b>	<b>73</b>
<b>ANNEXE 4 : L'INMARSAT (INTERNATIONAL MARITIME SATELLITE) .....</b>	<b>74</b>
<b>ANNEXE 5 : L'ADS-C .....</b>	<b>76</b>
<b>ANNEXE 6 :     MISE EN ŒUVRE DU RVSM A MADAGASCAR .....</b>	<b>80</b>
<b>ANNEXE 7 : PRESENTATION D'UN SYSTEME DE CENTRE DE CONTROLE EXISTANT : LES CRNA DE FRANCE .....</b>	<b>82</b>
<b>ANNEXE 8 : RADIOBALISE NDB .....</b>	<b>85</b>
<b>ANNEXE 9 : CODE SOURCE.....</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>91</b>
<b>FICHE DE RENSEIGNEMENTS .....</b>	<b>93</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS

AAC	Airline Administrative Communications
ACARS	Arinc Communication And Reporting System
ACC	Approach Control Center
ACM	Aviation Civile de Madagascar
ADEMA	Aéroport DE Madagascar
ADS	Automatic Dependant Surveillance
ADS-B	ADS Broadcast
ADS-C	ADS-Contract
ADLP	Aircraft Data Link Processor
AES	Air Earth Station
AIDC	ATC Interfacility Data Communications
AIRCOM	AIRcraft COMmunication
AMSS	Aeronautical Mobil Satellite System
AOC	Aircraft Operation Communications
APC	Aircraft Passenger Communications
APP	APProach
ARCW	ADS Route Conformance Warning checking
ARINC	Aeronautical Radio, Incorporated
ASECNA	Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
ASP	Aircom service Processor
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
ATN	Aeronautical Telecommunication Network
ATS	Air Traffic Services

ATS/DS	Air Traffic Services / Direct Speech
BDP	Bureau De Piste
BF	Basse Fréquence
BOD	Bandwidth On Demand
CAP	Circulation Aérienne Publique
CAUTRA	Coordonnateur Automatique du Trafic Aérien
CCR	Centre de Contrôle Régional
CDLP	Common Data Link Processor
CDU	Control Display Unit
CELP	Code Excited Linear Prediction
CIV	Centre d'Information en Vol
CLAM	Cleared Level Adherence Monitoring
CNS	Communication Navigation Surveillance
CPDLC	Controller Pilot Data Link Communication
CRNA	Centre en Route de la Navigation Aérienne
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CST	Central Signalling Terminal
CTR	Control Terminal Region
CVC	Circuit Virtuel Commuté
CVP	Circuit Virtuel Permanent
DAIW	Danger or Restricted Area Infringement Warning
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DS 900	Dispositif de Sélection 900
ELM	Extended Length Message
EMG	Message Emergency

ETA	Estimated Time Arrival
ETO	Estimated Time Overflight
ETCD	Équipement Terminal de Circuit de Données
ETTD	Équipement Terminal de Traitement de Données
FANS	Future Air Navigation System
FDPS	Flight Data Processing System
FIR	Flight Information Region
FIS	Flight Information Service
FL	Flight Level
FMS	Flight Management System
FPASD	Flight Plan Air Situation Display
FPCP	Flight Plan Conflict Probe
GES	Ground Earth Station
HF	High Frequency
INMARSAT	International Marine/Maritime Satellite
ISO	International Standardising Organization
IFR	Instrument Flight Region
LPC	Linear Predictive Coding
MCPC	Multiple Channel Per Carrier
MU	Management Unit
MSK	Modulation Minimum Shift Keying
MTN	Mondial Telecommunication Network
NDB	Non Directional Beacon
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OSI	Open Systems Interconnection

PAMA/BOD	Pre Assigned Multiple Access/Bandwidth On Demand
RADAR	Radio Detection And Ranging
RAM	Route Adherence Monitoring
RGS	Remote Ground Station
RPL	Repetitive flight PLa
RSFTA	Réseau du Service Fixe des Télécommunications Aériennes
SAMAD	Système ADS/CPDLC Madagascar
SAR	Search And Rescue
SATCOM	SATellite COMmunication
SELCAL	Selective Calling System
SITA	Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques
SLM	Short Length Message
SNA	Service de la Navigation Aérienne
SSR	Secondary Surveillance RADAR
SWOP	SWitch Over Plan
TDM	Time Division Multiplexing
TMA	Terminal Area
TWR	ToWeR ou tour de contrôle
UIR	Upper Information Region
UTA	Upper Terminal Area
VDL	VHF Data Link
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency
VMC	Visual Meteorological Conditions
VOR	VHF Omni Range



VSAT      Very Small Aperture Terminal

## INTRODUCTION [1] [25]

Depuis le 17 décembre 1903, date à laquelle les frères *Wright* ont effectué le premier vol piloté avec un appareil à moteur plus lourd que l'air, l'aviation a beaucoup évolué. Dans le ciel cohabitent plusieurs types d'aéronefs : des aéronefs de tourisme, des aéronefs de lignes, des appareils militaires, des appareils en essais ou encore des appareils utilisés pour des activités sportives telles que le vol à voile, l'aéromodélisme, etc. Si tous les appareils volaient sans respecter certaines règles, le trafic risquerait de devenir chaotique. Contrôler toutes ces activités afin d'assurer la sécurité est une tâche complexe et indispensable de la gestion du trafic aérien. La sécurité de la circulation aérienne n'est donc pas assurée par les pilotes mais par les contrôleurs aériens, qui disposent de moyens de surveillance de la totalité du trafic.

Par ailleurs, dans la conjoncture économique mondiale actuelle, la tendance va vers la communication, vers les échanges internationaux et voyager devient incontournable. Ainsi le trafic aérien connaît une augmentation croissante, malgré une baisse temporaire due à l'événement du 11 septembre 2001. La croissance du trafic aérien mondiale est estimée à 5% par an pour les quinze prochaines années.

L'espace aérien de certains pays se trouvant au croisement de multiples routes aériennes, il devient alors congestionné, ce qui retarde certains vols. Les retards du trafic aérien peuvent avoir de graves conséquences, des pertes budgétaires. Or ces retards sont dûs notamment aux secteurs *en-route* en Europe, alors qu'aux Etats-Unis, ils proviennent principalement des aéroports.

Quant à Madagascar, le grand handicap se trouve au niveau de la communication vocale entre le pilote et le contrôleur. La bande VHF (*Very High Frequency*) allouée à l'aéronautique se situe entre 117 et 137 MHz. Pour des espacements de canaux de 25kHz, seuls 760 aéronefs peuvent être en communication avec le contrôleur. Que faire si on doit contrôler plus d'aéronefs ? On n'attend pas que le problème se pose mais on applique directement une solution. La solution la plus adéquate à cette congestion serait d'alléger le canal vocal en transmettant certaines informations par le biais de la liaison de données. Cette solution est même recommandée par le concept FANS (*Future Air Navigation System*) ou CNS/ATM (*Control Navigation Surveillance/Air Traffic Management*), il recommande de remplacer la voix par des échanges de données entre calculateurs sol et bord, mais la voix sera toujours disponible pour répondre aux besoins d'urgence et de détresse, car un système vocal indépendant peut-être la seule solution pour garantir le niveau de sécurité requis.

Le contrôle de la navigation aérienne doit donc évoluer pour faire face à l'augmentation du trafic aérien. Cette nécessaire évolution permet d'améliorer de manière globale la sécurité du transport aérien. Nous avons choisi dans le cadre de notre étude d'appréhender la tâche de régulation de la circulation aérienne à Madagascar. Cette approche nous a amenés à étudier plus particulièrement la communication de l'information entre pilotes d'aéronef et contrôleurs aériens.

L'information de base du système est en effet toujours la même quels que soient les moyens de communication utilisés. C'est la raison pour laquelle ce travail s'intitule « **Etude de l'amélioration de l'infrastructure du contrôle aérien à Madagascar** ».

Pour ce faire, ce rapport de mémoire est décomposé en trois chapitres. Dans le premier, des généralités sur le contrôle aérien seront rappelées. Le second présentera les outils nécessaires pour la sécurité de la navigation aérienne ainsi que les détails de notre étude concernant la proposition de sectorisation, l'emplacement des émetteurs VHF nécessaires. La simulation des caractéristiques de propagation de l'antenne des émetteurs terminera ce rapport.

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CONTROLE AERIEN

Dès leur départ à leur arrivée, les aéronefs sont en permanence sous la surveillance du contrôle aérien. Les pilotes se conforment au « *Règlement de la circulation aérienne* », un code de la route qui permet à des milliers d'appareils de circuler tous les jours en toute sécurité. Dans ce chapitre, nous présenterons les rouages du contrôle aérien en général, c'est-à-dire, son organisation, les acteurs et organismes de ce système. Et l'étude de l'existant à Madagascar terminera ce chapitre.

### 1.1. Organisation de l'espace aérien

#### 1.1.1. Définition d'un espace aérien [26]

Un *espace aérien* est un espace au-dessus d'un territoire national organisé pour fournir une sécurité optimale à tous les aéronefs qui y évoluent. Il est divisé en zones contrôlées et zones non contrôlées. Tous les territoires nationaux sont découpés en régions d'information de vol ou FIR (*Flight Information Region*). Les FIR sont gérés par un centre de contrôle. Au dessus de la FIR, il y a la région d'information supérieure ou UIR (*Upper Information Region*).

#### 1.1.2. Les différents organismes touchant à la navigation aérienne

##### 1.1.2.1. Au niveau international

Au niveau international, il y a l'OACI (*Organisation de l'Aviation Civile Internationale*), qui est une institution technique spécialisée des Nations Unies, créée en qualité d'organe permanent le 4 avril 1947, dans le but de promouvoir la sécurité et le développement coordonné de l'aviation civile dans le monde entier. L'agence établit des normes et des règlements internationaux en matière de sécurité, d'efficacité et de régularité du transport aérien. Elle sert aussi à favoriser la coopération entre ses membres, dans tous les domaines de l'aviation civile, et à fournir une assistance technique aux pays qui en ont besoin pour assurer la maintenance de leurs installations aéronautiques afin de se conformer aux normes mondiales fixées. Ces règles internationales, peuvent être étoffées selon les besoins de chaque nation cependant ces conventions, ne concernaient pas l'aviation militaire, sujet encore très sensible à cette époque.

L'OACI réalise également des publications et des études spécifiques. L'agence contribue, en outre, à améliorer les services météorologiques, le contrôle de la circulation aérienne, les communications air-sol, les opérations de recherche et de sauvetage, ainsi qu'à renforcer les mesures destinées à assurer la sécurité des vols internationaux. Elle s'attache également à simplifier les procédures douanières et le contrôle de l'immigration, ainsi que les règlements

sanitaires relatifs aux vols internationaux. Elle porte une attention particulière à la lutte contre les détournements d'aéronefs et aux attaques diverses de terroristes tout comme les effets des nuisances sonores causées par les aéronefs sur l'environnement.

L'OACI se compose de cent quatre-vingt nations membres qui se réunissent tous les trois ans, lors d'une assemblée. Entre les sessions, son bureau exécutif est constitué par un conseil composé de représentants de trente-trois nations membres, élus par l'assemblée en fonction de leur degré d'importance au sein du transport aérien international et de leur répartition géographique. Elle possède son propre secrétariat, dirigé par un secrétaire général nommé par le Conseil, et plusieurs comités techniques permanents. Son siège se trouve à Montréal.

#### 1.1.2.2. Organismes existant à Madagascar

Toute activité est régie par une autorité, dans le cas de l'aviation civile malgache, c'est l'ACM (*Aviation Civile de Madagascar*) qui en a la charge. L'ACM est le représentant de l'OACI à Madagascar, elle y joue le rôle d'interlocuteur. L'ACM est responsable :

- de la réglementation et de son application,
- de la supervision de tous les systèmes d'aviation civile : les aéroports, les compagnies aériennes malgaches, les fournisseurs de la navigation aérienne, etc ...,
- de l'inspection du contrôle aérien,
- de faire établir des PAC (*Plans d'Actions Correctrices*) et de leur suivi de mise en œuvre,
- de la sécurité et la sûreté de l'aviation civile.

L'ASECNA (*Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar*) et l'ADEMA (*Aéroport DE Madagascar*) sont sous tutelle de l'ACM. L'ASECNA est un fournisseur de services de la Navigation Aérienne tandis que l'ADEMA gère les aéroports. L'ASECNA assure dans les trois principaux aéroports, dont Antananarivo, Toamasina et Mahajanga, les services suivants :

- le contrôle aérien,
- la télécommunication,
- les informations météorologiques,
- les informations aéronautiques,
- le balisage,
- le SLIA (*Service de Lutte Anti-Incendie aux Aéroports*).

Mais à Tolagnaro, l'ASECNA fournit uniquement les services météorologiques.

A Madagascar, il y a cinquante-cinq aérodromes ouverts à la *Circulation Aérienne Publique* ou CAP, dont douze sont gérés par l'ADEMA et quarante-trois par des sociétés privées. Mis à part ces cinquante-cinq aérodromes, il existe un bon nombre d'aérodromes privés (141 aérodromes).

Remarque : un aérodrome est composé d'une piste et d'une aérogare, tandis qu'un aéroport est un aérodrome avec des activités commerciales.

### **1.1.3. Types de vols [26]**

Dans la pratique, il y a deux types de vols bien distincts : le vol VFR (*Visual Flight Rules*) et le vol IFR (*Information Flight Rules*). Le vol VFR ou régime de vol à vue, est un régime de vol qui est soumis à des conditions de météorologie bien précises. En général, il requiert une visibilité supérieure à 10 km et des plafonds nuageux supérieurs à 1600 m. Tandis que dans le vol IFR ou régime de vol aux instruments, le pilote navigue grâce au matériel de radionavigation et n'a donc pas besoin de références visuelles.

### **1.1.4. Routes aériennes**

Pour joindre deux aéroports, les aéronefs doivent emprunter des *routes aériennes*. Ce sont des tronçons définis par des points de report appelés *balises*. Les balises sont souvent des balises radio-électroniques.

### **1.1.5. Division de l'espace aérien [25]**

En 1992, l'OACI a uniformisé l'appellation des différents espaces aériens (contrôlés ou non). Dorénavant, ils sont répartis en classes (de A à G). A chaque classe correspond un niveau de services rendus ainsi qu'au respect des conditions VMC (*Visual Meteorological Conditions*) autorisant le vol VFR.

Les classes A, B, C, D et E concernent les espaces aériens contrôlés, alors que les classes F et G, les espaces non contrôlés. Un vol est dit *contrôlé* s'il bénéficie des services rendus par l'organisme chargé du contrôle de l'espace dans lequel il est entré. Pour les vols VFR, les conditions VMC en espace contrôlé changent selon que le vol s'effectue en-dessous ou au-dessus du niveau de vol FL100 (*Flight Level*).

Remarque : Un espace aérien n'est contrôlé que pendant les horaires d'ouverture de l'organisme chargé du contrôle de la circulation aérienne. Aux heures de fermeture, il est non contrôlé.

Dans un espace non contrôlé, le pilote peut évoluer librement dans le respect des règles de l'air et des exigences propres à l'espace dans lequel il se trouve. Il peut bénéficier de l'information de vol, si elle existe.

Outre cette classification, l'espace aérien est subdivisé en deux zones : l'espace aérien inférieur, la FIR qui va de la surface du sol jusqu'au niveau de vol FL195 inclus, et l'espace aérien supérieur ou UIR allant du FL195 au FL 660. Ce dernier est de classe A (réservé aux vols IFR) jusqu'au FL660 et est appelée UTA (*Upper Traffic Area*). Au-delà du FL660, l'espace aérien est classé G. Le niveau de vol maximum utilisable par les vols VFR est donc le FL195.

Remarque : Le niveau de vol ou FL correspond à l'altitude exprimée en centaine de pieds (ft pour feet). Ainsi le FL 195 correspond à 19 500 pieds ( $\approx 6$  km).

## **1.2. Contrôle du trafic aérien [1] [27] [28] [29]**

Le contrôle de la navigation aérienne peut s'appréhender comme un collectif où les utilisateurs sont à la fois les pilotes d'aéronef et les contrôleurs aériens. La tâche commune est de permettre à tous les aéronefs du secteur de contrôle concerné d'effectuer les actions suivantes, citées par ordre de priorité : « évoluer en toute sécurité dans l'espace aérien et au sol, atteindre la destination prévue ou une destination de dégagement, arriver à destination le plus rapidement possible, et effectuer le trajet dans les meilleures conditions de confort possible ». L'état global du système est défini par des données auxquelles les utilisateurs n'ont pas nécessairement accès directement. Ces informations comprennent l'état des aéronefs, leur position, leur trajectoire, les intentions des pilotes, les données météorologiques et l'état des infrastructures aéroportuaires.

### **1.2.1. Catégories de contrôle**

Il y a trois catégories de contrôle du trafic aérien. Tout d'abord, le *contrôle d'aérodrome* qui est effectué à partir des tours de contrôle (*ou TWR pour ToWeR*) et concerne les décollages et les atterrissages ainsi que toute la circulation au sol des aéronefs. Puis le *contrôle d'approche* qui est effectué par les centres de contrôle d'approche. Il s'agit de guider les aéronefs depuis la croisière vers l'axe de la piste où ils seront pris en charge par la TWR d'aérodrome. En cas de surcharge du trafic, le contrôleur peut mettre en place des circuits d'attente où les aéronefs vont attendre en faisant des hippodromes (*stacks*). Enfin, le *contrôle en route* concerne le contrôle des aéronefs qui sont dans la phase *en route*.

### **1.2.2. Services rendus**

Les services de la circulation aérienne ou ATS (*Air Traffic Services*) rendent aux aéronefs trois services. Le service du *contrôle de la circulation aérienne* consiste à assurer une distance convenable entre les aéronefs et à les guider dans des espaces contrôlés. Le service *d'information de vol* donne tous les avis et renseignements nécessaires à la conduite du vol. Et le *service d'alerte*, fournit une aide et une assistance aux aéronefs en difficultés et mettant en œuvre les moyens du service SAR (*Search And Rescue*). Il faut différencier les deux derniers. En effet, le *service d'information de vol* consiste à fournir aux usagers les informations qui leur sont utiles ou nécessaires pour effectuer un vol dans des conditions aussi sûres que possibles. Il peut s'agir d'informations météorologiques, d'informations sur des systèmes en panne, etc. Quant au *service d'alerte*, il permet un suivi des aéronefs qui en ont fait la demande implicite ou explicite afin que des opérations de recherche et de secours soient menées au cas où un accident vient à se produire.

### **1.2.3. Charges du contrôleur**

Les aéronefs décollent de leur aéroport de départ et rejoignent leur aéroport de destination en empruntant un réseau de routes aériennes. Mais l'espace aérien correspondant ne peut pas être géré par un seul contrôleur. Cet espace est alors découpé en secteurs de contrôle, chacun étant géré par un binôme de contrôleurs. Ce binôme est composé d'un *contrôleur organique*, chargé de la coordination avec les secteurs adjacents et de la détection de conflit, et d'un *contrôleur tactique* ou radariste chargé de la résolution des conflits à l'aide du radar. Exigeant une concentration optimale devant l'écran et en raison d'une grande responsabilité sur la vie de plusieurs centaines de personnes, le métier de contrôleur génère un stress permanent. Cependant, on peut comptabiliser trois principaux aspects quantitatifs de la charge de travail des contrôleurs :

- *Charge de monitoring* : les contrôleurs doivent vérifier sur leur radar le bon déroulement des vols dans leur secteur et anticiper les risques de conflits potentiels. C'est la tâche principale de leur travail.
- *Charge de résolution de conflits potentiels* : deux aéronefs sont dits en conflit si la distance horizontale et/ou verticale est inférieure à une distance de séparation minimale dont 300m verticalement et 10min horizontalement. Lorsqu'il y a un conflit potentiel, les contrôleurs ordonnent à l'un des deux de changer de cap ou d'altitude ou de vitesse.
- *Charge de coordination* : lorsqu'un aéronef change de secteur, ce changement fait l'objet d'une négociation entre le contrôleur transférant et le contrôleur recevant.



### 1.2.4. Communication aéronefs-sol

#### 1.2.4.1. Schéma synoptique de la liaison de données

La figure 1.01, représente l'acheminement des données de l'aéronef vers un centre de contrôle et *vice versa*. Ces données sont communiquées par voies satellitaires, le SATCOM (*SATellite COMmunication*), qui les transmet à une station terrienne ou GES (*Ground Earth Station*), qui les attribuera à leur tour au contrôleur par les services d'un fournisseur de réseau mis en place. Ces données peuvent aussi être transmises par VHF, cette transmission étant effectuée par une station terrienne VHF.

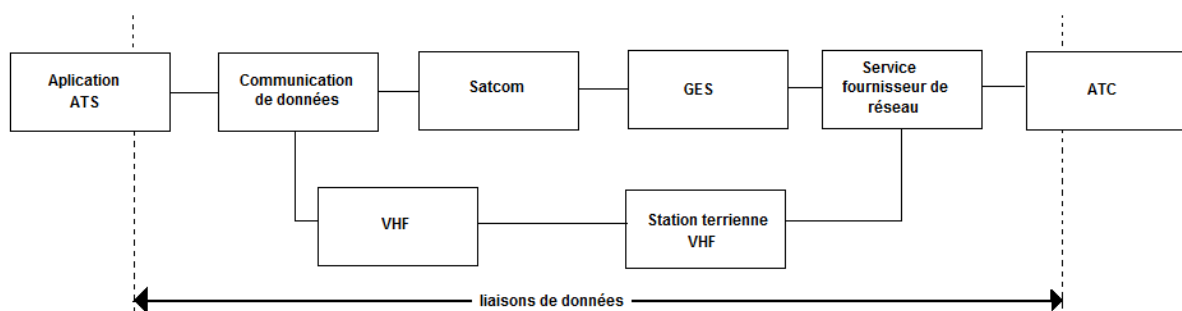


Figure 1.01 : Schéma synoptique de la liaison de données

#### 1.2.4.2. Outils strip et écran radar [2]

Un *strip* est une bande de papier sur laquelle figure un certain nombre d'informations nécessaires au suivi du vol. Il est aussi appelé *bande de progression*. Mais le strip papier présente ses limites, il ralentit le travail du contrôleur ainsi que son temps de réponse. Ces limites sont apparues avec la complexité des systèmes de visualisation radar, notamment depuis l'apparition du filet de sauvegarde. Il s'agit d'une fonction qui permet de prédire la trajectoire des aéronefs, et d'afficher une alerte si le contrôleur ne prévoit pas que les aéronefs risquent de se rapprocher dangereusement dans les prochaines minutes.

En fait les limites viennent du fait que les calculs de trajectoires sont basés uniquement sur les informations radar, et ne prennent pas en compte les clairances données par le contrôleur. Parfois, une alerte se déclenche alors que le contrôleur a déjà pris les mesures pour la corriger.

Plus précisément, l'ordinateur ne dispose pas d'informations suffisantes pour calculer les trajectoires de façon précise, sur un intervalle de temps de plusieurs minutes. Les informations que le contrôleur note sur ses strips sont très utiles au système pour affiner ses prédictions. La solution

à ce problème est le strip électronique. Pour cela, le contrôleur doit noter ses strips directement, sur ordinateur, afin que le filet de sauvegarde puisse aller y puiser les informations dont il a besoin. Les premiers projets ont consisté en un écran horizontal où sont dessinés des strips que le contrôleur peut remplir à l'aide d'un clavier et d'une souris. Un autre projet est une visualisation radar avec des menus déroulants permettant de changer le cap, la vitesse, l'altitude des avions.

Remarque : Le partage d'informations entre secteurs, dans le cas du *strip électronique*, est possible contrairement au strip papier qui n'est lisible que par les contrôleurs à proximité

#### 1.2.4.3. Outil *data link* [3]

Créé initialement pour aider au contrôle du trafic au dessus des espaces océaniques, la communication par *data link* est en passe de devenir un nouvel outil capable de remplacer ou de seconder le radar et de compléter les communications vocales. Grâce à un équipement spécial à bord de l'aéronef, les données des calculateurs de bord (position, altitude, vitesse, météo, ...) sont collectées, puis transmises par satellite à intervalles réguliers vers les équipements au sol. Une interface graphique permet de visualiser ces données et leur mise à jour sur un écran. Les images obtenues peuvent même être intégrées sur les écrans radar de dernière génération (moniteur graphique). Il s'agit aussi d'utiliser une messagerie électronique pour les dialogues entre pilotes et contrôleurs. Les services rendus par le *data link* sont nombreux (cf tableau 1.01).

Remarque : Les principales différences entre les services ADS-B (*Automatic Dependant Surveillance – Broadcast*) et ADS-C (*ADS-Contract*) (tableau 1.01) résident dans le fait que le message ADS-B est envoyé systématiquement, avec un contenu non figé et sans destinataire identifié tandis que l'envoi du message ADS-C se fait uniquement dans le cadre d'un contrat avec un destinataire identifié, comme c'est le cas pour le système SAMAD (Système ADS-CPDLC MADagascar) que l'on utilise à Madagascar.

Services rendus par le <i>data link</i>	Commentaires
ADS-C	L'ADS-C effectue la surveillance automatique de la position réelle de l'aéronef. Des contrats sont établis automatiquement entre le sol et les vols pour que les données soient envoyées à intervalles réguliers vers le contrôle aérien (ex : toutes les 20 mn). Si l'aéronef dévie de son profil de vol autorisé (route...), il passe dans un mode de surveillance plus serré qui permet de corriger sa position rapidement. Malgré tout, ce système ne remplacera pas le radar classique, principalement à cause du délai entre les mises à jour. Ce système est en service actuellement dans de nombreuses régions océaniques.
ADS-B	Pour ce système ADS, les délais d'envoi des informations par les vols sont très courts et permettent une surveillance accrue, identique à celle d'un radar classique. L'Australie le teste conjointement avec un système radar pour pouvoir l'utiliser au dessus des zones semi-désertiques où la mise en place de radars est soit trop onéreuse soit impossible.
CPDLC ( <i>Controller-Pilot Data Link Communications</i> )	En plus de la partie surveillance automatique dévolue à l'ADS, le deuxième apport du <i>data link</i> est la possibilité de communication entre les pilotes et les contrôleurs par un système de messagerie. L'amélioration est spectaculaire particulièrement dans les zones transocéaniques, là où seule la HF (High Frequency) est utilisable. Ces dialogues sont codifiés pour des raisons de sécurité : messages pré formatés avec passage de paramètres (ex : autorisation de monter ou de descendre à tel ou tel niveau de vol), avec des procédures de bouclage pour s'assurer que l'information a bien été envoyée, reçue et suivie.
CAP ( <i>Controller Access Parameters</i> )	Ce système a été mis en œuvre à l'aide de radars dits "mode S". Les systèmes embarqués à bord de l'aéronef envoient automatiquement des informations de surveillance précises telles que : le cap magnétique, le taux de montée, la vitesse indiquée... Ces informations devenant disponibles pour les contrôleurs aériens, la surveillance des vols devient plus fine et la charge de communication réduite entre pilotes et contrôleurs.

Tableau 1.01 : Services rendus par le *data link*

### 1.3. Contrôle aérien à Madagascar [25]

Actuellement, notre espace aérien est composé d'une FIR dont le service d'information de vol est assuré par le CIV (*Centre d'Information de Vol*) au-dessus duquel se trouve une UIR. Pour les aéroports les plus importants, ont été mis en place des TMA (*Terminal Area*) déplaçonnées, dont le contrôle en route dans leurs limites est géré par le CCR (*Centre de Contrôle Régional*). Les CTR (*Control Traffic Region*) quant à eux sont gérés par la TWR.

Dans la figure 1.02, sont détaillés les différents niveaux composant l'espace aérien malgache. Les trois TMA (Mahajanga, Antananarivo et Toamasina) sont chacun contrôlé par un CTR. Au-dessus de ces TMA se trouve l'UTA d'Antananarivo du FL245 au FL 460. La FIR réunit les trois TMA du niveau du sol jusqu'au FL195. L'UIR allant du FL195 jusqu'au FL 660 quant à lui, englobe l'UTA d'Antananarivo.

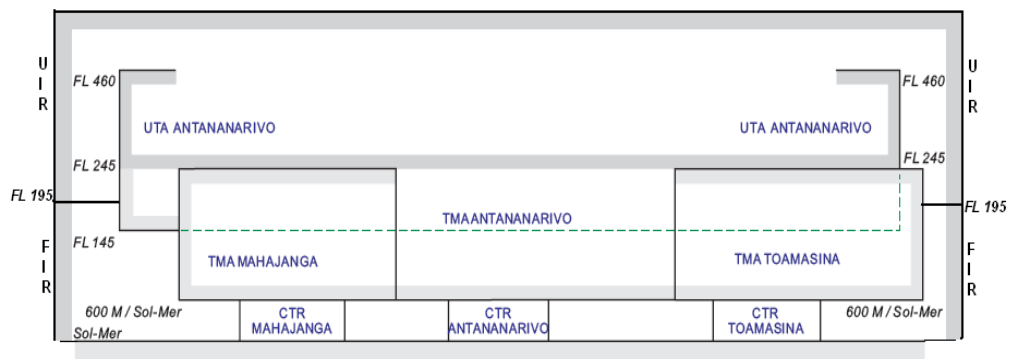


Figure 1.02 : Les subdivisions de l'espace aérien géré par Madagascar

#### 1.3.1. Réseaux concernés

##### 1.3.1.1. Le réseau ATN [28] [29]

###### 1.3.1.1.1. Historique du réseau des télécommunications aéronautiques

L'expression ATN (*Aeronautical Telecommunication Network*) semble avoir été employée pour la première fois vers avril/mai 1988. L'idée de base, elle, remontait à quelques années plus tôt et provenait de réflexions portant surtout sur le matériel embarqué qui serait nécessaire aux liaisons de données numériques. Il était en effet apparu au milieu des années 80 que l'aéronef pourrait être contacté en *data link* par au moins 3 moyens différents :

- La VHF,
- Le radar mode S,
- Les transmissions par satellite.

A cette époque, les compagnies aériennes utilisaient déjà la VHF sous forme numérique grâce au système développé par la société ARINC (*Aeronautical Radio INCorporated*) : l'ACARS (*Arinc Communication And Reporting System*) qui permettait entre autres de reporter au cours d'un vol les anomalies d'équipements embarqués par messages vers le sol. La SITA (*Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques*) avait étendu ce service américain au reste du monde sous le nom d'AIRCOM (*AIRcraft COMmunication*). ACARS/AIRCOM utilisait un protocole spécifique orienté caractère et nécessitait l'installation à bord de l'aéronef d'une MU (*Management Unit*) gérant la communication en amont de la VHF et reliée à différents équipements tels que le FMS (*Flight Management System*) et le CDU (*Control Display Unit*).

A la même époque, le Mode S commençait à être expérimenté en Europe et les Etats-Unis passaient leur commande de plus d'une centaine de stations. L'utilisation de la liaison de données correspondante apparaissait orientée « contrôle du trafic aérien » grâce au recueil de données de bord. La *data link* Mode S nécessitait à bord de l'aéronef la présence d'un processeur de liaison de données embarqué appelé ADLP (*Aircraft Data Link Processor*) en amont du transpondeur Mode S.

Enfin l'utilisation des satellites était envisagée pour l'ADS et les communications à haut débit. La liaison de données correspondante nécessitait l'installation d'une boîte appelée SDU (*Satellite Data Unit*).

#### 1.3.1.1.2. Les modes de communication entre le radar secondaire et la station sol [4][5]

##### 1.3.1.1.2.1. Mode A (*Alpha*)

Le mode A est le plus simple des modes de transmission de données entre l'aéronef et le sol. La seule information transmise est un code SSR (*Secondary Surveillance Radar*) de quatre chiffres entre 0 et 7 inclus. Le code sera affiché sur la visualisation radar du contrôleur. Chaque aéronef se voit attribuer un code unique. Ce code permet d'établir une relation entre un plot et un aéronef et d'identifier avec certitude que ce plot correspond à cet aéronef. On appelle cela l'identification radar. Avec le mode A, le contrôleur dispose donc de la position de l'aéronef et d'un moyen d'identification radar.

#### 1.3.1.1.2.2. Mode C (*Charlie*)

Le mode Charlie est le plus utilisé actuellement sur le territoire français. Il s'agit en fait d'un mode A amélioré, en ajoutant une information d'altitude. Cette donnée est mesurée dans l'aéronef, transmise au radar, puis visualisée sur l'écran du contrôleur.

#### 1.3.1.1.2.3. Mode S (*Sierra*)

##### *Présentation*

Le mode S est encore une évolution du radar secondaire. Le nombre de codes disponibles en mode A et C est limité (4096 codes seulement) et devient insuffisant pour les besoins actuels. Le mode S permettra donc une véritable liaison de données. Au lieu d'un code, l'immatriculation ou indicatif de l'aéronef pourra être transmis. Au lieu de l'altitude, n'importe quelle donnée pourra être transmise, aussi bien de l'aéronef vers le sol que du sol vers l'aéronef. Les applications sont nombreuses.

Le mode S permet la transmission d'informations sous forme de blocs numériques de deux types : SLM (*Short Length Message - 56 bits*) ou ELM (*Extended Length Message - 1280 bits*). Chaque aéronef a une adresse unique de 24 bits. Les squawks mode S répondent aux interrogations Mode A, C, intermodes et S.

La réponse Mode S est caractérisée par la *fréquence porteuse* qui est de 1090 MHz, et le *code réponse* qui est composé d'un préambule de quatre impulsions et d'un bloc de données (56 ou 112 bits d'information).

##### *Avantages du Mode S*

Le Mode S permet d'abord les interrogations sélectives, la réduction de la fréquence des interrogations. Il permet ensuite la transmission de données, la suppression du *garbling*, puis une gestion plus sûre du trafic. Enfin, le nombre d'adresse aéronef disponible est très important.

##### Définition : Le *garbling*

Les aéronefs ont à leur bord un transpondeur qui répond à toutes les interrogations qu'il reçoit. Le *garbling* est l'enchevêtrement des réponses d'aéronefs distants de moins de 2NM ( $\approx 3.704$  km) l'un de l'autre et répondant en même temps à l'interrogation d'un radar. La durée d'une réponse provenant d'un transpondeur est de  $24,65\mu s$  (cf. tableau 1.02). Si deux transpondeurs se trouvent simultanément dans le lobe principal de l'antenne interrogateur et dans une configuration telle que

l'écart de leur distance radiale à l'interrogateur est inférieure à 3700m, leurs réponses se chevauchent quelles que soient leurs altitudes. C'est le *garbling* ou le brouillage synchrone.

#### *Inconvénients du Mode S*

Le seul inconvénient du mode S est que le matériel embarqué est plus complexe et plus coûteux.

Type d'impulsions	Durée	Valeurs de la durée
P1-P2-P3-P5	courte	0.8μs
p4	courte	0.8μs
P4	longue	1.6μs
P6	courte	16.25μs
P6	longue	30.25μs

*Tableau 1.02 : Tableau récapitulatif de la durée des impulsions*

#### *1.3.1.1.3. Common Data Link Processor [6]*

Vu côté aéronef, il apparaissait que trois matériels différents allaient être installés pour utiliser de manière indépendante trois liaisons de données dédiées chacune à un certain type de transmission. Malgré l'aspect spécifique de chacun de ces média, une certaine propension à leur emploi d'une manière qui fut interopérable en vint à se manifester. Toujours côté bord, l'idée vint en 1987 de regrouper les trois accès aux différents *data links* sous la gestion d'un même élément appelé CDLP (*Common Data Link Processor*). Ce dernier était une sorte de nœud de communication par lequel devaient transiter tous les messages air-sol. Dans un sens, il recueillait les données provenant du sol par l'un des 3 *data links* et les aiguillait vers le bon correspondant à bord. Dans l'autre sens, il choisissait par quel *data link* un message destiné au sol et issu d'une application bord devait être transmis.

Ceci ne pouvait se réaliser que s'il existait un découpage fonctionnel hiérarchique et une entrée-sortie relativement normalisée dans les trois types de liaison de données puisque le CDLP était censé faire l'interface entre MU, ADLP et SDU d'un côté et les applications bord de l'autre. En 1987, le seul système qui était déjà normalisé et en fonctionnement opérationnel, l'ACARS, ne répondait pas du tout à ces principes ; en effet, la MU était directement connectée aux applications et dialoguait avec eux d'une manière spécifique.

#### 1.3.1.2. Système ADS/CPDLC Madagascar ou SAMAD [7] [25]

Le projet ADS de l'ASECNA à Madagascar a permis d'améliorer la qualité du service rendu aux usagers et le confort de travail des contrôleurs. SAMAD est un système de traitement de données de vol équipé de fonctionnalités ADS/CPDLC. Il intègre un système de traitement de données de vol ou FDPS (*Flight Data Plan System*), les applications ADS/CPDLC et un système de visualisation des vols.

Le système SAMAD permet d'une part une *communication* sans équivoque et sans limite géographique : n'importe quelle application sol peut atteindre n'importe quel aéronef muni de l'équipement adéquat et *vice versa*, même au delà des limites radar ou radio. D'autre part, une facilitation de l'intégration air / sol fait participer activement le système. Ainsi, au lieu d'un système s'efforçant de deviner l'intention de l'aéronef, les applications sol et embarquée échangent et traitent des données correspondant à leurs besoins informationnels respectifs.

L'ADS et le CPDLC, nouveaux moyens CNS/ATM mettent à la disposition des services de contrôle du trafic aérien des fonctionnalités. Celles-ci couplées à un système de traitement et de visualisation des données de vol permettent entre autres : l'amélioration de la sécurité, l'automatisation de certaines tâches du contrôleur et l'amélioration des outils de travail, la visualisation de la position de l'aéronef et de la progression du trafic aérien par le contrôleur, l'amélioration du traitement et du transfert de l'information entre les exploitants, les aéronefs et les organes ATS. Ils permettent aussi l'extension de la surveillance du trafic aérien, la détection immédiate des erreurs d'insertion de point de cheminement pour les pilotes et autres erreurs grossières, l'amélioration de la détection, la résolution des conflits et une adaptation rapide à des conditions de circulation changeantes.

##### 1.3.1.2.1. Systèmes de visualisation

Le système SAMAD utilise trois méthodes de poursuite des aéronefs dans la FIR Antananarivo : le traitement de données de vol ou FDPS, l'ADS et le CPDLC.

Le système de traitement de données de vol ou FDPS est le cœur du système. En effet, le traitement de plan de vol du système SAMAD fournit un moyen simple et efficace de gérer les données plan de vol reçues par l'intermédiaire du réseau RSFTA, (*Réseau du Service Fixe des Télécommunications Aériennes*) entrées manuellement du BDP (*Bureau de Piste*) ou extraits automatiquement d'une base de données RPL (*Repetitive Flight Plan*). A partir des données plan de vol, le système affiche la situation aérienne ou le FPASD (*Flight Plan Air Situation Display*).



Cette fonctionnalité permet de fournir une représentation graphique d'un vol non-équipé FANS1/A en dehors d'une couverture radar. Les contrôleurs disposent ainsi d'une visualisation de la situation aérienne (image pseudo-radar) affichant tout le trafic dont ils ont la charge, ainsi que le trafic à proximité de leur FIR. Le système est capable de gérer à la fois les strips papiers et les strips électroniques. Le système permet de faire des échanges de données entre calculateurs ATS suivant le protocole AIDC (*ATC Interfacility Data Communications*), dans le but de simplifier interfaces et coordination avec les centres adjacents.

Un aéronef muni d'un équipement ADS transmet des données automatiquement à SAMAD *via* le réseau SITA. Ces transmissions régies par des contrats ADS sont définies par le contrôleur au sol. Les pistes ADS correspondent à une représentation graphique des positions successives des aéronefs basée sur les données de position reçues lors des reports ADS.

Si l'ADS est l'échange entre calculateurs bord et sol, SAMAD permet également un échange entre hommes (contrôleur – pilote) par liaison de données (CPDLC). Le système SAMAD utilise automatiquement les informations des messages CPDLC pour mettre à jour le plan de vol correspondant (route et heures estimées sur les points de cette route, strip électronique et étiquette de piste).

#### 1.3.1.2.2. Moyens d'alerte

Le système SAMAD fournit un certain nombre d'alertes au contrôleur. Ces alertes sont le résultat de traitements spécifiques intégrant les données de différentes sources (FDPS, ADS, CPDLC, RSFTA) et sont annoncées au contrôleur à travers un changement de couleur, un texte d'alerte ou une alerte auditive (cf tableau 1.03).

Alertes	Indications
EMG ( <i>Message emergency</i> )	Alerte CPDLC reçue par le pilote
DAIW ( <i>Danger or Restricted Area Infringement Warning</i> )	Le profil de vol indique une pénétration dans une zone de danger ou réglementée
ETO ( <i>Estimated Time Overflight</i> )	Différence entre les heures reportées et celles estimées par le FDPS
CLAM ( <i>Clearance Level Adherence Monitoring</i> )	Déviation de l'altitude du niveau de vol accordé
ARCW ( <i>Automatic Route Conformance Warning</i> )	Alerte indiquant que le groupe ADS de prédiction de route n'est pas conforme à la route du plan de vol existante
RAM (Route Adherence Monitoring)	Déviation latérale de la route affectée
FPCP (Flight Plan Conflict Probe)	Détection de conflit de route à partir du plan de vol

Tableau 1.03 : Messages d'alerte.

#### *1.3.1.2.3. Trois autres fonctionnalités*

Le système permet la visualisation de routes flexibles calculées à partir de données météorologiques durant leur temps de validité sur la zone couverte par le système.

SAMAD permet aussi d'une part, l'enregistrement de tous les messages émis et reçus par le système et toutes les actions du contrôleur et d'autre part, le jeu de ces messages sur une position dédiée.

Il est parfaitement équipé pour une supervision opérationnelle et technique qui informe de l'état des composants matériels et logiciels du système avec des commandes pour les arrêter ou les démarrer, et permet le groupement/dégroupement des positions opérationnelles.

En outre, SAMAD offre un segment simulateur indépendant, composé de deux positions élèves identiques à celle du segment opérationnel et de deux positions instructeurs, permettant l'établissement des liaisons de données, l'envoi de reports ADS, l'échange de messages CPDLC et l'envoi de messages RSFTA.

#### *1.3.1.3. Le réseau SITA/ACARS [8] [27]*

##### *1.3.1.3.1. Le besoin de communications de données air/sol*

Les communications vocales air/sol sont peu performantes car elles utilisent un large spectre au regard de la quantité d'information transmise. En plus, elles sont adaptées aux communications entre acteurs humains.

Le besoin de support de communication entre calculateurs est nécessaire pour une automatisation de l'ATC (*Air Traffic Control*) et constitue un pré-requis pour la mise en place de l'ATM.

Les besoins spécifiques des compagnies aériennes se situent au niveau des communications AOC (*Aircraft Operation Communications*) (opérationnelle compagnie) afin de faciliter les opérations de maintenance avion. Un système de communication unique serait donc souhaitable.

##### *1.3.1.3.2. Définition*

Le système ACARS est un système de communication air/sol permettant aux compagnies d'échanger les données entre systèmes sol et bord. Il est utilisé pour les communications entre le sol et le *cockpit*, notamment pour les échanges de type : AOC, ATC et AAC (*Airline Administrative Control*). Il est en service depuis 1977. Ces principales clientèles sont les principales compagnies mondiales et l'aviation d'affaires.

#### 1.3.1.3.3. Organisation du système

Le réseau de télécommunication ACARS/SITA est organisé autour d'un centre unique de traitement mondial (Singapour). Il s'appuie sur un réseau sol/sol X25 mondial structuré autour de plusieurs nœuds principaux (Londres pour l'Europe).

ACARS est fondé sur des protocoles orientés caractère (similaire au Télex). Son mode d'accès canal est de type CSMA ("Écouter avant d'émettre") (*Carrier Sense Multiple Access*). L'entête de message assez long réduit les performances. Il ne permet pas d'éviter les collisions entre messages. Et le canal est saturé dès que sa charge atteint 50% de la charge maximale du canal.

L'architecture technique air/sol est schématisée par la figure 1.03 :

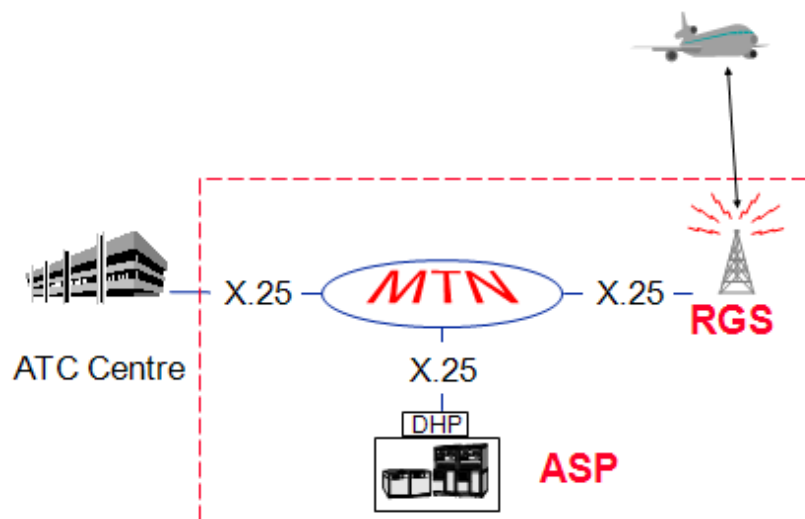


Figure 1.03 : Architecture technique air/sol de l'ACARS

Le RGS (*Remote Ground Stations*) reçoit et envoie les messages de l'aéronef vers le réseau mondial MTN (*Mondial Telecommunication Network*) qui les *dispatchera* vers les organismes concernés : ASP (*Aircom Service Processor*) ou un centre ATC.

Pour le système ACARS, le RGS est représenté par une liaison de données VHF ou par satellite selon les besoins de l'exploitant. La figure 1.04 illustre l'architecture de la station sol.

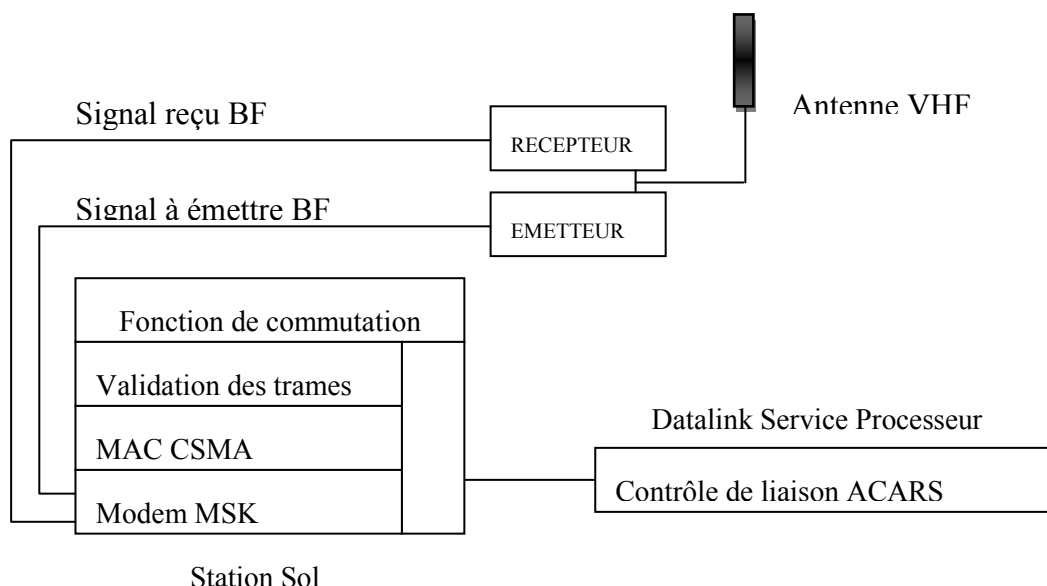


Figure 1.04 : Architecture de la station sol

#### 1.3.1.3.4. Evolution du système ACARS

Les améliorations suivantes sont envisagées pour faire évoluer la liaison de données air/sol :

- séparation des trafics sol/sol (avions au sol) des trafics sol/air (avions en vol) sur des canaux différents,
- normalisation des applications types pour garantir l'interopérabilité (Norme ARINC 623),
- amélioration des performances du réseau sol X25 pour garantir des temps de transit dans le réseau compatibles avec les exigences ATC, évolution vers le standard ARINC 622 qui permet d'habiller des trames orientées bit pour les transporter sur le réseau ACARS en mode caractère.

### 1.3.2. Communications [9][10][11]

#### 1.3.2.1. Communications par voix

Dans la TMA d'Antananarivo, l'organisme chargé du contrôle est le CCR d'Antananarivo. Les aides radio utilisées sont : la radiobalise (cf annexe 7) ou NDB (*Non Directional Beacon*) défini par le sigle « TAN » pour celui d'ANTANANARIVO, « TN » pour celui d'ANKAZOBE, « TE » pour celui de MORAMANGA, et « TW » pour celui de SOAVINANDRIANA ; le VOR (*VHF Omni Range*) d'IVATO est défini par « TNV ». Il y a aussi les trois markers qui permettent aux aéronefs de définir leur distance par rapport à la piste d'atterrissage d'Ivato : l'IO (*India Oscar*) à la fréquence 305 kHz se trouvant à 7 km du seuil de la piste, l'IA (*India Alpha*) à la fréquence 364 kHz située à 700m du seuil de la piste et le NT (*November Tango*) à la fréquence 340 kHz.

### 1.3.2.2. Communications par données (CPDLC)

Actuellement, les communications de données air/sol utilisent le système ACARS développé par ARINC et SITA. Ce système utilise des canaux de 25kHz de largeur, utilisant la modulation MSK (*Modulation Shift Keying*) avec un débit de 2400 bit/s, et un protocole d'accès CSMA. Il s'agit d'une transmission en mode caractère (ou ACARS 618) donc non conforme à l'architecture OSI (*Open Systems Interconnection*).

Par contre, le système VDL mode 2 (*VHF Data Link*) est un système conforme à la structure OSI (ISO : *International Standardising Organization*) et aux exigences de l'ATN. Tout comme pour l'ACARS, son mode d'accès canal est de type CSMA, type qui ne permet pas d'éviter les collisions entre messages, et quand sa charge atteint 50% de la charge maximum du canal, la difficulté est repoussée, car le débit canal est assez élevé. On l'appelle également sous-réseau-VHF. La VDL mode 2 est caractérisée par :

- L'utilisation des canaux VHF standards de 25 kHz. Quatre canaux sont réservés exclusivement au niveau mondial,
- L'utilisation de la modulation D8PSK dont le débit est de 31 500 bits/s,
- Et la nécessité d'une radio numérique à bord pour interpréter les données émises par la station au sol.

### 1.3.3. *Procédures d'entrée et de sortie et transfert de communications des aéronefs [25]*

Pour entrer dans la TMA, tout aéronef en régime de vol IFR doit, quinze minutes avant l'ETA (*Estimated Time Arrival*) point d'entrée, demander à l'ACC (*Approach Control Center*) Antananarivo une autorisation. Dans sa réponse, l'ACC Antananarivo fixe les conditions d'entrée dans la TMA.

« Avant de commencer sa descente, tout aéronef se dirigeant vers la TMA Antananarivo doit en informer l'ACC. Pour un vol sans escale à l'intérieur de la TMA, les aéronefs se dirigeront vers le NDB « TAN » puis sortiront de la TMA en suivant les instructions de l'ACC. »

A l'arrivée : les communications des aéronefs en provenance de Toamasina sont transmises de l'APP (*Approach Control*) Toamasina à l'ACC/FIC Antananarivo au plus tôt à la limite de la TMA Toamasina et au plus tard par le travers du NDB Maromamy. Les communications des aéronefs se dirigeant vers Ivato sont transmises de l'ACC à l'APP d'Ivato sur indication de l'ACC.

Au départ : les communications des aéronefs décollant d'Ivato sont transférées de la TWR à l'ACC ; aussitôt après le décollage, les communications des aéronefs se dirigeant vers Toamasina sont transférées de l'ACC/FIC Antananarivo à l'APP Toamasina dix minutes avant l'ETA, point d'entrée de la TMA Toamasina.

#### **1.4. Etude comparative des systèmes utilisés à Madagascar [25]**

Les moyens de communication actuellement en place sont le VHF-HF pour les communications sol-air et ATS/DS RSFTA pour les communications sol-sol.

Les moyens de contrôle sont les contrôles aux procédures, et le suivi et la gestion d'un secteur par les bandes de progression de trafic ou *strips*.

Avec ces moyens assez vétustes, certaines lacunes ont été décelées :

- En terme de communication, la mauvaise qualité des fréquences HF, l'impossibilité de joindre l'ATC sur les fréquences HF et VHF déclarées, l'encombrement des fréquences HF par l'ATC aux fins de coordination sol-sol.
- Sur le contrôle aux procédures, la capacité insuffisante du système, les profils de vol ne sont pas efficaces ce qui a une incidence néfaste sur le coût d'exploitation des aéronefs, et enfin les problèmes de sécurité.

Tout ceci a permis à l'ASECNA de faire une synthèse sur les causes d'incidents, parmi lesquelles il serait bon de relever la mauvaise visualisation de l'ensemble du trafic par le contrôleur, la surcharge de travail du contrôleur, les appareils survolent l'espace aérien sans s'identifier, l'absence d'information réciproque de trafic, la mauvaise instruction de contrôle et effectivement un environnement de travail difficile.

Pour visualiser notre trafic aérien, l'ASECNA utilise l'ADS-C, qui est quand même un système dix fois moins onéreux que le radar. Notre espace aérien n'est pas totalement contrôlé. La communication vocale est lésée par la couverture VHF qui n'est pas encore assurée sur toute notre FIR.

#### **1.5. Conclusion**

Chaque pays adopte, pour le contrôle de son trafic aérien, le système qui lui est le plus approprié. Vu le coût élevé des différentes installations, certains critères doivent justifier le choix des matériels et moyens d'implémentations. Ces choix se font selon le flux et la densité de trafic, la complexité des espaces aériens, les aéroports et TMA à fort trafic, situés à proximité de routes

importantes ou qui y convergent, les zones en entrées de FIR, les performances des moyens de surveillance (portée par exemple), les capacités des sites (énergie, sécurité,...) et les moyens de communication.

Ceci étant, le chapitre suivant est axé sur l'étude des concepts d'amélioration du contrôle aérien malgache.

## CHAPITRE 2 : CONCEPT D'AMELIORATION DU CONTROLE AERIEN MALGACHE

Dans ce chapitre, nous proposons d'améliorer la gestion de la circulation en favorisant l'utilisation de la transmission de l'information entre pilote et contrôleur par *data link*, et en sectorisant la FIR de Madagascar. Cette sectorisation permettra un meilleur contrôle de chaque aéronef par la communication VHF.

### 2.1. Sectorisation du territoire [1] [2]

Un CRNA (*Centre Régional de la Navigation Aérienne*) est un centre contrôlant les aéronefs volant dans l'espace qui lui est associé. Il contrôle les aéronefs qui sont "en route" c'est-à-dire qui ne sont pas en phase de décollage ou d'atterrissage.

#### 2.1.1. Motivation

À cause des charges de travail et de la sécurité, une équipe de contrôleurs ne peut gérer dans son secteur (qui est actuellement tout l'espace aérien en un seul bloc !) plus d'une cinquantaine d'aéronefs pendant une période donnée (une heure par exemple). Ce nombre définit la capacité du secteur et limite la capacité globale du réseau de trafic aérien, qui a de plus en plus de mal à faire face à la croissance du transport aérien. Comme le définit l'OACI, le trafic aérien en route est comptabilisé par le nombre de vols d'aéronefs réalisé au niveau des régions de contrôle et d'information en vol. Le mouvement de trafic est défini comme le nombre d'atterrissages et de décollages effectués au cours d'un temps prédéfini. Nous avons dans le tableau 2.04 une évolution du mouvement de trafic à Madagascar depuis 1991 à 2007 et dans la figure 2.01 les courbes traduisant les données du tableau 2.04.

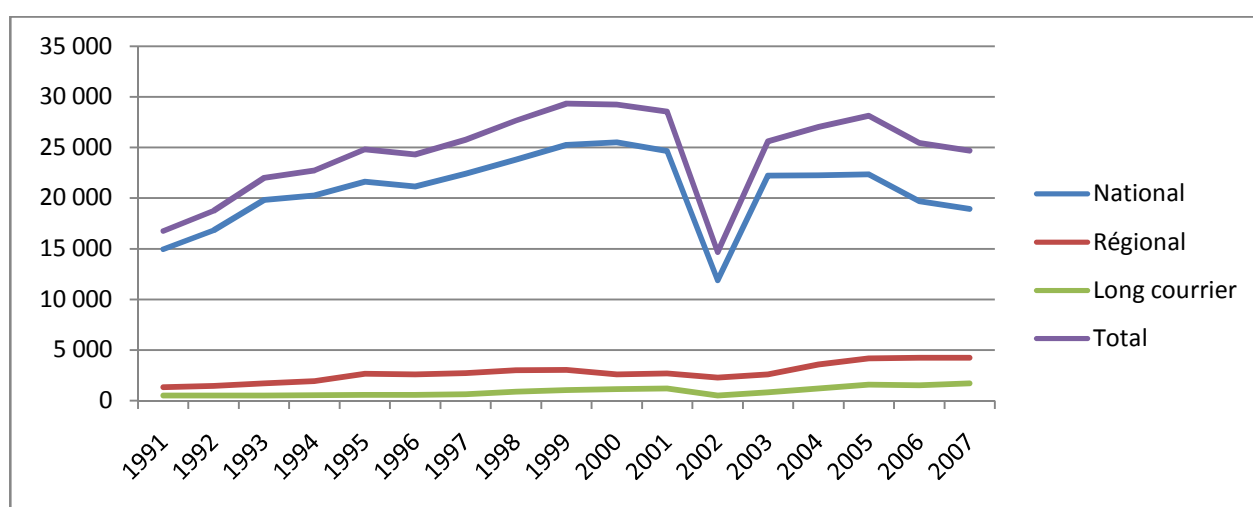


Figure 2.01 : Courbe des mouvements de trafic à Madagascar de 1991-2007



	<b>National</b>	<b>Régional</b>	<b>Long courrier</b>	<b>Total</b>
<b>1991</b>	14 934	1 328	498	16 760
<b>1992</b>	16 804	1 444	508	18 756
<b>1993</b>	19 806	1 697	501	22 004
<b>1994</b>	20 240	1 932	538	22 710
<b>1995</b>	21 608	2 655	547	24 810
<b>1996</b>	21 126	2 608	574	24 308
<b>1997</b>	22 402	2 706	641	25 749
<b>1998</b>	23 774	3 010	879	27 663
<b>1999</b>	25 252	3 036	1 046	29 334
<b>2000</b>	25 497	2 600	1 128	29 225
<b>2001</b>	24 656	2 673	1 211	28 540
<b>2002</b>	11 871	2 290	500	14 661
<b>2003</b>	22 206	2 581	812	25 599
<b>2004</b>	22 240	3 589	1 197	27 026
<b>2005</b>	22 335	4 191	1 596	28 122
<b>2006</b>	19 687	4 229	1 538	25 454
<b>2007</b>	18 908	4239	1 722	24690

*Tableau 2.04 : Trafic mouvements commerciaux sur les aéroports ADEMA de 1991 – 2007*

La courbe traduit une constante évolution, malgré une chute mondiale, à laquelle Madagascar n’y a pas échappé, de la fréquentation des transports aériens en 2002 après la catastrophe du 11 septembre 2001. On remarque aussi que les vols nationaux sont importants, ce qui est positif, car cela montre une tendance de mouvement croissante de la part de la population nationale. Donc on peut s’attendre qu’avec le développement de l’économie du pays, le mouvement de trafic augmente.

### ***2.1.2. Contraintes de la sectorisation de l’espace aérien [1]***

Dans la plupart des projets cherchant à augmenter la capacité du réseau du trafic aérien, que ce soit en modifiant le système ou en optimisant l’utilisation du système, on propose un réseau de routes aériennes sur lequel on pré-affecte des demandes de trafic. Ce trafic affecté induit des charges de travail aux contrôleurs. Il faut alors une méthode de sectorisation globale de ce réseau

de telle façon que la charge de travail des contrôleurs soit équilibrée entre les secteurs et que la charge de travail globale soit minimisée (principalement en minimisant la charge de coordination).

En plus de cette contrainte d'équilibrage et l'objectif de minimisation de la charge de coordination, certaines contraintes spécifiques du contrôle du trafic aérien doivent être prises en compte.

#### 2.1.2.1. Contrainte de temps de passage minimum

Cette contrainte exprime qu'un aéronef doit passer dans chaque secteur qu'il traverse une durée de temps minimum donnée, afin que les contrôleurs aient suffisamment de temps (au moins le temps de coordination nécessaire à la transmission de l'aéronef depuis le secteur précédent vers le secteur suivant) pour gérer correctement l'ensemble des aéronefs dans leur secteur (Figure 2.02).

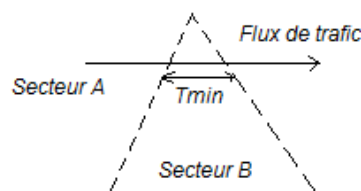


Figure 2.02 : La contrainte de temps de passage minimum

#### 2.1.2.2. La contrainte de distance minimum (au sens des routes)

Cette contrainte a pour but d'assurer que la distance entre un point de croisement du réseau de transport aérien et la frontière du secteur doit être supérieure ou égale à une distance donnée. Notons qu'elle est seulement "au sens des routes" pour que les contrôleurs aient suffisamment de temps (à compter du moment où l'aéronef entre dans leur secteur) pour résoudre les conflits potentiels qui peuvent se produire en ce point (voir Figure 2.03).

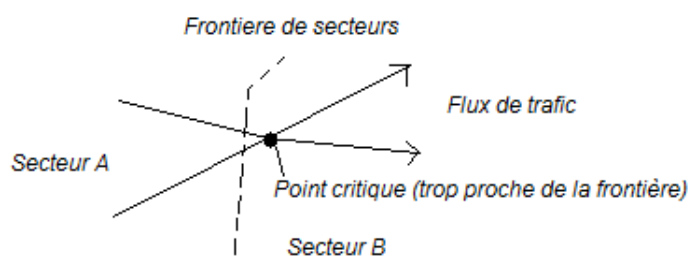


Figure 2.03 : Un point de croisement trop proche de la frontière

#### 2.1.2.3. Contrainte de convexité (au sens des routes)

La convexité des secteurs au sens des routes permet d'assurer que, pendant un vol reliant un aéroport de départ et un aéroport de destination, l'aéronef passe une fois au maximum par secteur. Autrement dit, on veut éviter le cas illustré sur la Figure 2.04, cas où l'aéronef est sorti du secteur A, puis y entre à nouveau.

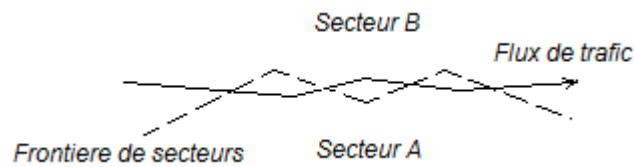


Figure 2.04 : Le secteur A n'est pas convexe au sens des routes

#### 2.1.2.4. Contrainte de connexité de secteur

Elle permet d'éviter la fragmentation des secteurs, que les contrôleurs ne peuvent pas gérer correctement (voir Figure 2.05).

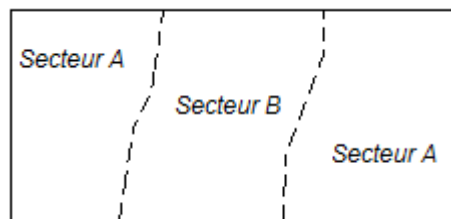


Figure 2.05 : Le secteur A n'est pas connexe

#### 2.1.3. Cas de Madagascar

L'espace aérien est constitué de routes aériennes dont chacune se constitue d'une succession de tronçons dont les extrémités correspondent à des points de reports (balises-points de report ou de navigation). Sur ce réseau de routes aériennes, on affecte des demandes de trafic. Le problème de sectorisation de l'espace aérien consiste à découper cet espace en plusieurs secteurs de contrôle de manière à ce que la charge de travail des contrôleurs soit équilibrée entre les secteurs. Les changements de secteurs, lorsque des aéronefs sont en vol, est source d'une charge de coordination pour contrôleurs. La fonction d'optimisation du problème est alors de diminuer le nombre global de changements de secteurs.

### 2.1.3.1. Procédure de sectorisation

Donc pour que la charge des contrôleurs soit équilibrée, il serait plus accommodant de sectoriser notre espace en trois secteurs. Dans la figure 2.06, on va appliquer les contraintes du paragraphe 2.1. En allant de gauche vers la droite, on part du point de latitude  $16^{\circ}37'30''S$ , de longitude  $42^{\circ}5'E$ , on trace une horizontale jusqu'au point de latitude  $16^{\circ}35'S$  et de longitude  $51^{\circ}E$ . Arriver à ce point, pour ne pas couper des intersections de routes, on trace une parallèle à la route UR348, jusqu'au point de latitude  $14^{\circ}42'30''S$  et de longitude  $55^{\circ}30'E$ .

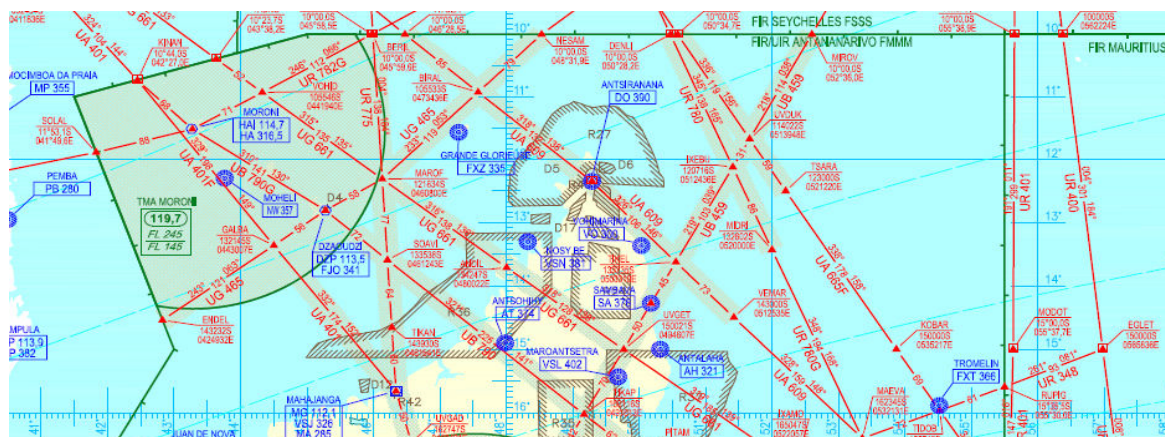


Figure 2.06 : Partie Nord de l'espace aérien malgache avant la sectorisation

On aura notre premier secteur : le secteur Nord SN et une des deux délimitations du secteur Central SC. Pour tracer la deuxième délimitation de la figure 2.07, on va procéder comme suit : on part du point de latitude  $21^{\circ}S$  et de longitude  $40^{\circ}E$ , on trace la parallèle à la route UG652, jusqu'au point de latitude  $22^{\circ}5'S$  et de longitude  $43^{\circ}E$ . De là, on trace une horizontale jusqu'au point de latitude  $22^{\circ}5'S$ , de longitude  $56^{\circ}50'E$ . On aura alors nos trois secteurs, de la figure 2.08.



Figure 2.07 : Partie Centrale de l'espace aérien malgache avant la sectorisation

### 2.1.3.2. Résultats de la sectorisation

D'après toutes les contraintes citées précédemment, dans la figure 2.08, nous proposons une sectorisation de l'espace aérien malgache (délimité par les points SS1, SC2, SN2, SN3, SN4, SN5, SC6, SS5, SS6 sur la figure 2.08) en trois secteurs délimités par les coordonnées mentionnées dans le tableau 2.05 :

Secteur	Point	Latitude	Longitude
Nord (SN)	SN1	16°37'30S	42°5' E
	SN2	15° S	43° E
	SN3	11° S	41° 25' E
	SN4	10° S	45° E
	SN5	10° E	55°30' E
	SN6	14°42'30 S	55° 30' E
	SN7	16°35' S	51°E
Central (SC)	SC1	21° S	40° E
	SC2	20° S	40° E
	SC3	16°37'30 S	42°5' E
	SC4	16°35' S	51°E
	SC5	14°42'30 S	55° 30' E
	SC6	19° S	55°30' E
	SC7	22°5'S	56°50' E
	SC8	22° 5' S	43°E
Sud (SS)	SS1	30°S	40°E
	SS2	21° S	40° E
	SS3	22° 5' S	43°E
	SS4	22°5'S	56°50' E
	SS5	22°20'S	57°E
	SS6	30°S	57°E

*Tableau 2.05 : Coordonnées géographiques des points délimitant les secteurs*



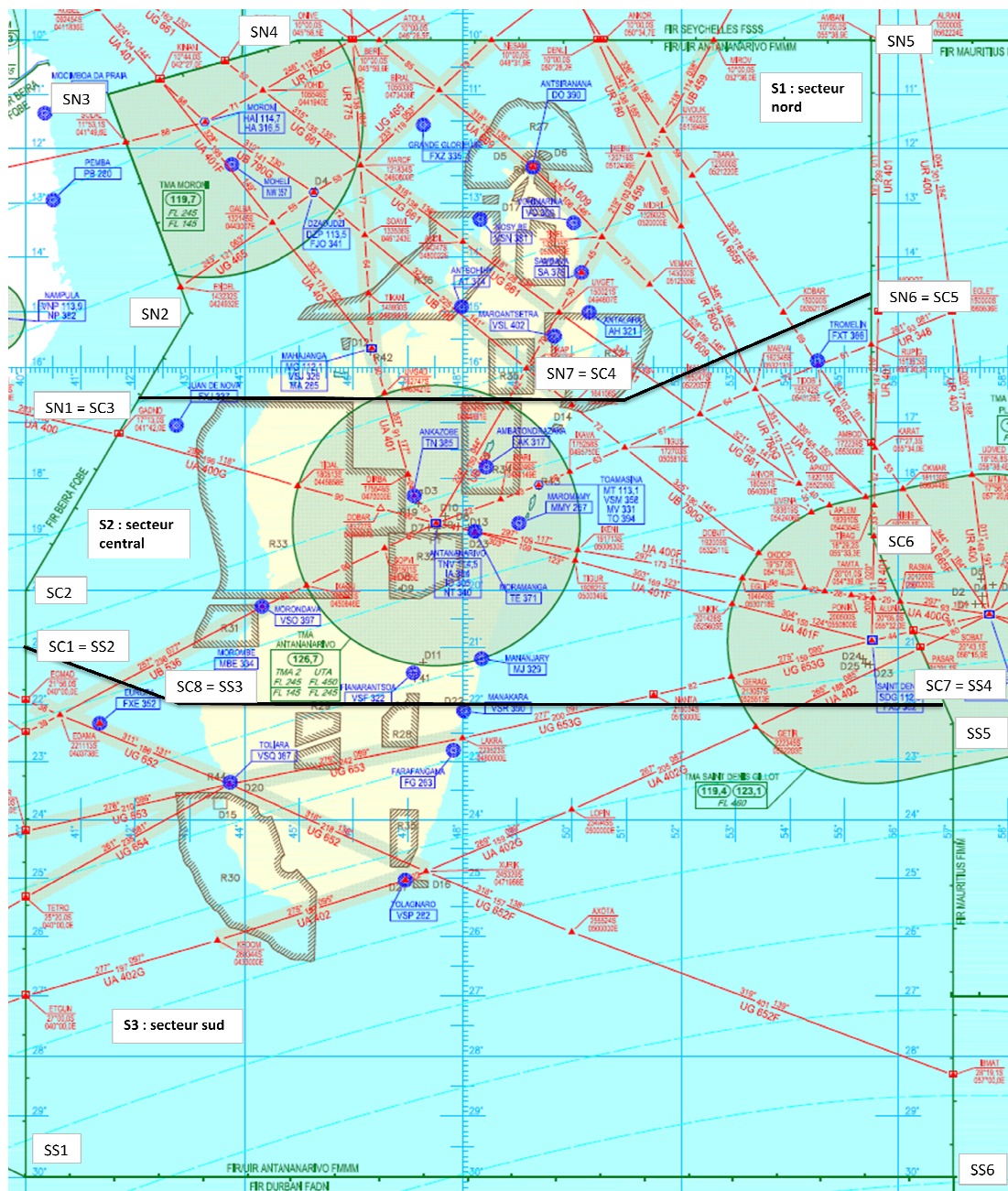


Figure 2.08 : Sectorisation étudiée

## 2.2. Emetteurs VHF

### 2.2.1. Les stations VHF déportées

Actuellement, l'ASECNA a six stations VHF déportées (figure 2.09) pour couvrir en VHF les routes aériennes les plus fréquentées de l'espace aérien de Madagascar. Elles sont implantées à Moroni, Antsiranana, Mahajanga, Toamasina, Toliara, Tolagnaro et une antenne VHF à Antananarivo.

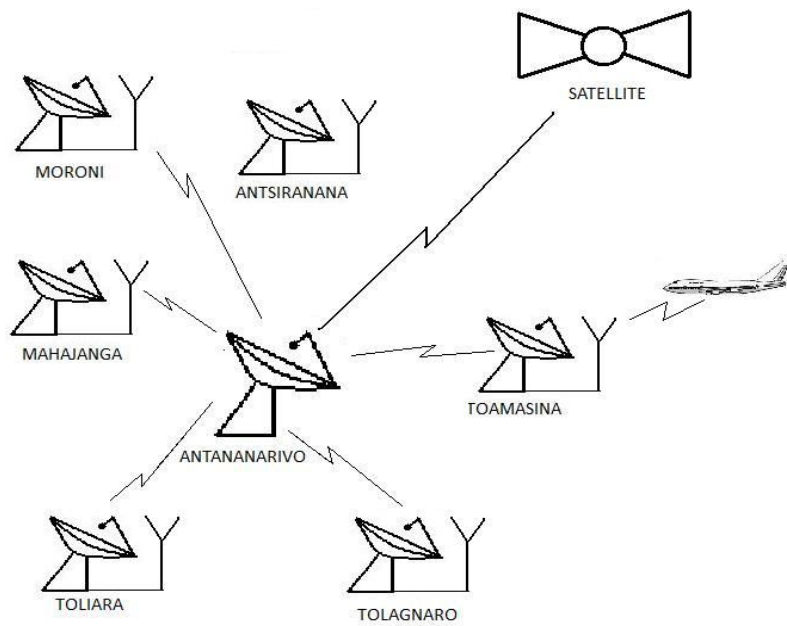


Figure 2.09 : Architecture de transmission des stations VHF déportées

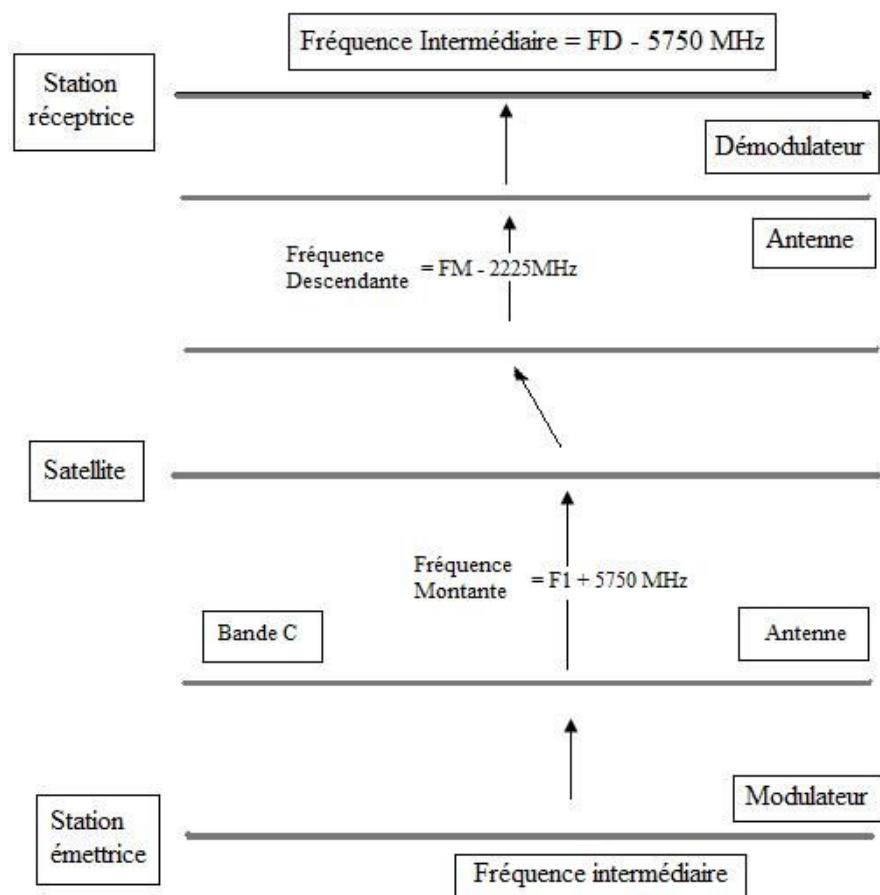


Figure 2.10 : Cheminement des fréquences lors d'une transmission

La figure 2.10 nous montre le cheminement des fréquences lors d'une transmission depuis la station émettrice vers la station réceptrice. Depuis la station émettrice, la fréquence intermédiaire passe par un modulateur, qui le transmettra à l'antenne Bande C. Celle-ci la transmettra au satellite par la formule suivante :

$$\text{Fréquence montante} = \text{fréquence intermédiaire} + 5750 \text{ MHz} \quad (2.01)$$

Ensuite, le satellite enverra l'information par sa fréquence descendante à l'antenne réceptrice par la formule :

$$\text{Fréquence descendante} = \text{fréquence montante} - 2225 \text{ MHz} \quad (2.02)$$

En passant par le démodulateur cette fréquence descendante sera soustraite à 5750 MHz pour avoir la fréquence intermédiaire.

$$\text{Fréquence intermédiaire} = \text{fréquence descendante} - 5750 \text{ MHz} \quad (2.03)$$

### 2.2.2. *Synoptique de la communication pilote-contrôleur [12]*

Une station déportée sert de relais pour transmettre la communication par VHF des pilotes d'aéronefs survolant notre FIR vers le contrôleur au CIV à Ivato. On peut schématiser le chemin suivi par l'information BF (*Basse Fréquence entre 20 Hz et 20 kHz*) depuis le contrôleur se trouvant au CIV en passant par les stations déportées jusqu'à l'aéronef (figure 2.11) :

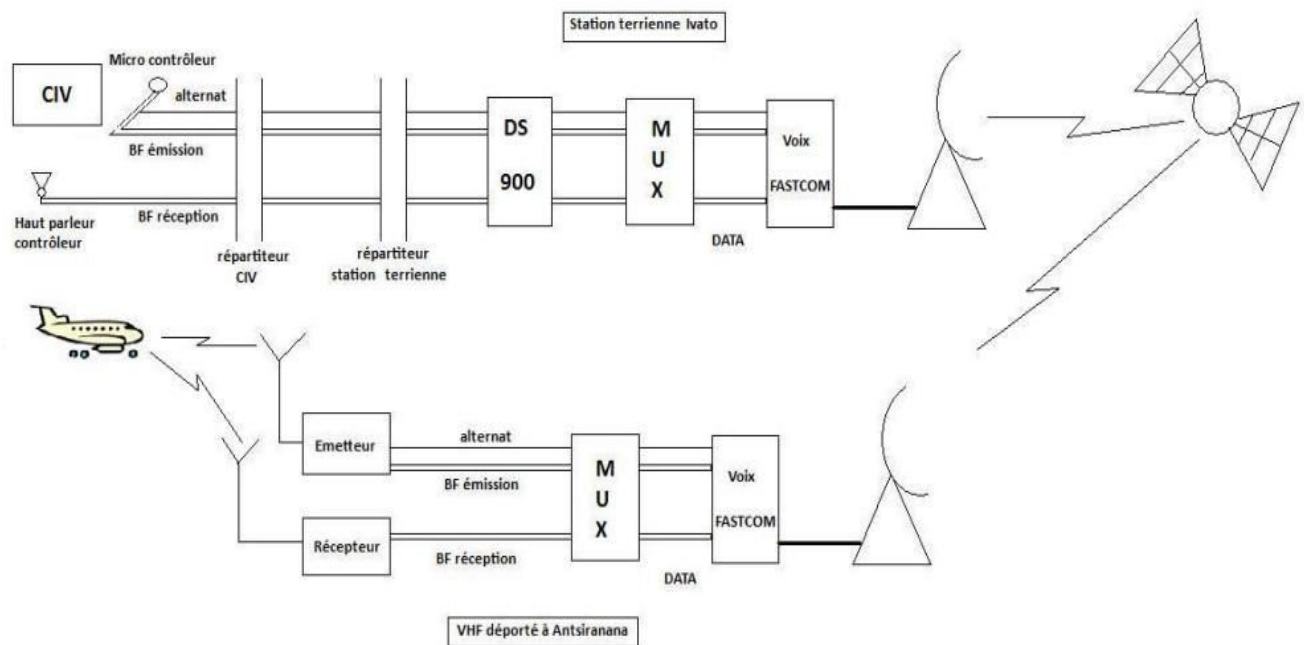


Figure 2.11 : Synoptique de la communication pilote-contrôleur



Dans la figure 2.11, la partie « VHF déporté à Antsiranana » peut-être remplacée par n'importe quelle autre localisation de VHF déporté, pour laquelle on a toujours le même trajet de la BF. Le DS900 est ainsi raccordé aux MUX des six autres stations déportées.

### 2.2.3. Le dispositif de sélection DS900 [12]

#### 2.2.3.1. Présentation

Le DS900 est un dispositif de sélection permettant l'exploitation de fréquences « climaxées » sur deux ou trois voies BF. Il peut-être associé à des cartes à retard de type CCTP12126, pour compenser les délais d'acheminement de la BF sur les différents sites concernés. Il effectue le traitement numérique des voies BF réception, ainsi que la distribution de la BF émission et de l'alternat vers les trois voies de sortie. En réception, il a deux modes de fonctionnement :

- Soit « meilleure BF » : le choix est fait selon la BF ayant le meilleur rapport signal/bruit
- Soit « premier appel » : la BF du premier appel reçu sera choisi.

On obtient ainsi un fonctionnement sécurisé en cas de défaut, une possibilité de cascader deux équipements lors d'utilisation de plus de trois fréquences et une possibilité de télésurveillance.

Dans la figure 2.12, on a un exemple de câblage d'un DS900 dans une chaîne radio.

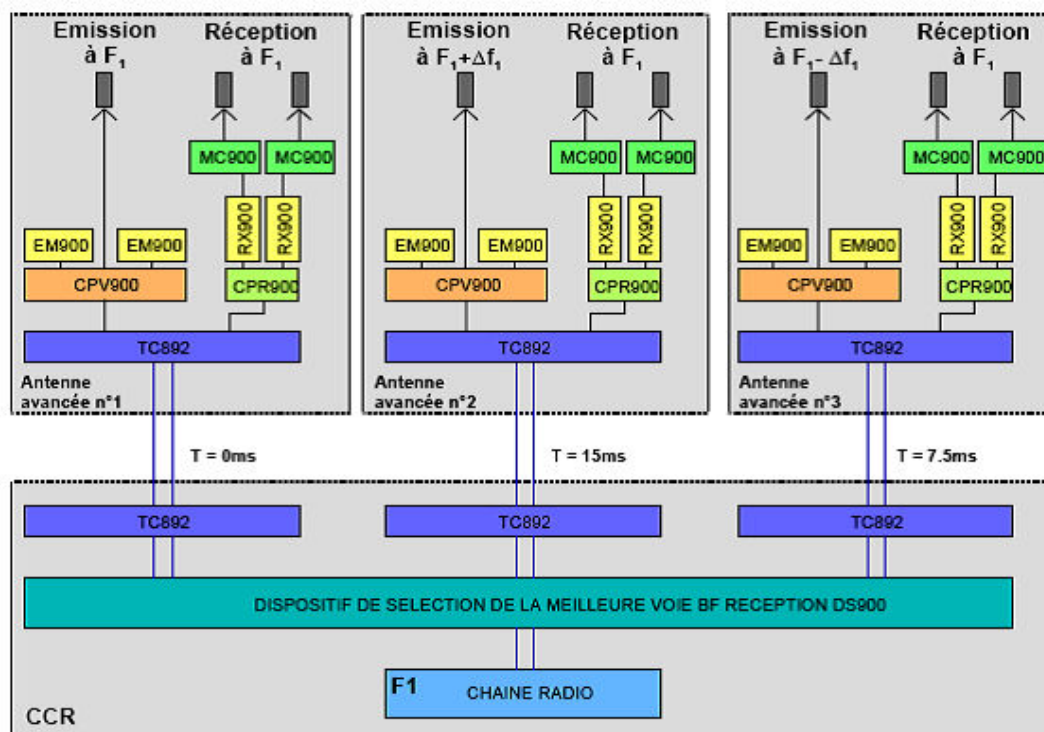


Figure 2.12 : Câblage d'un DS900 dans une chaîne radio

Le DS900 permet au signal d'un aéronef passant au-dessus de Toamasina d'être capté par l'antenne VHF de Toamasina (c'est-à-dire l'antenne avec le meilleur rapport signal sur bruit) puis transmis à Antananarivo par l'intermédiaire de l'antenne VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) (figure 2.09).

### 2.2.3.2. Description du fonctionnement de la carte de compensation CCTP12126

La carte CCTP12126 est une carte à retard pour compenser les délais d'acheminement de la BF sur les différents sites concernés.

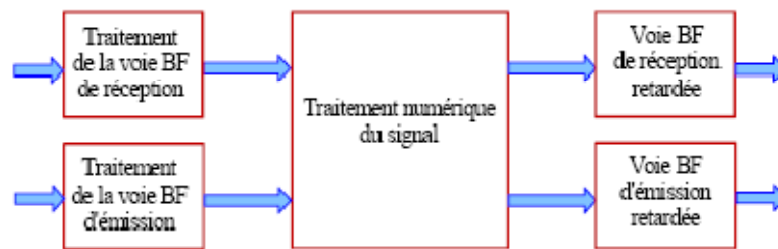


Figure 2.13 : Fonctionnement de la carte CCTP12126

### 2.2.3.3. Traitement numérique du signal

Le traitement numérique du signal consiste à calculer le meilleur rapport (signal + bruit)/bruit parmi les trois voies BF de réception. Le principe de calcul consiste à calculer la puissance moyenne maximale correspondant à la somme « signal+bruit », ensuite à calculer la puissance moyenne sans le signal correspondant au « bruit ».

Le rapport « puissance moyenne maximale/puissance moyenne » qualifie donc la qualité de la voie reçue.

#### Calcul de la puissance moyenne par méthode directe

On considère la BF phonie comme un signal aléatoire centré sur 0, c'est-à-dire ne contenant pas de continu. La moyenne des échantillons est donc nulle. Si N représente le nombre d'échantillons et  $X_i$  l'échantillon à l'instant  $i$ , on a :

$$[\sum_{i=1 \text{ à } N}(X_i)] / N = 0 \quad (2.04)$$

La variance de ce signal est égale à la puissance moyenne. La puissance moyenne, ou moyenne quadratique sur N échantillons vaut donc :

$$P = [\sum_{i=1 \text{ à } (n-N)}(X_i^2)] / N \quad (2.05)$$

Cette méthode nécessite n multiplications et n additions

#### Calcul de la puissance moyenne par méthode récursive

On considère la puissance moyenne à l'instant n, c'est une combinaison de la puissance moyenne à l'instant (n-1) et de la puissance instantanée à l'instant n.

Si  $X_n$  représente l'échantillon à l'instant n et  $P_n$  la puissance moyenne à l'instant n, on a :

$$P_n = (1 - b) * P_{(n-1)} + b * X_n^2 \quad (3.3)$$

b correspond à un paramètre de lissage. Plus b est grand, plus la puissance instantanée est prépondérante, plus l'algorithme converge rapidement

Cette méthode nécessite trois multiplications et une addition.

#### Comparaison des deux méthodes

	Vitesse de convergence ou temps de réponse	Puissance de calcul nécessaire
Méthode directe	Converge rapidement	Nécessite une grande puissance de calcul
Méthode récursive	Converge plus lentement	Nécessite peu de puissance de calcul

Tableau 2.06 : Comparaison des méthodes directe et récursive

#### **2.2.4. Le multiplexeur MOL2P : multiplexage de voix et de données[13]**

C'est un équipement de multiplexage permettant de gérer la communication entre les équipements des antennes avancées et le système de liaison satellite VSAT, ainsi qu'entre le calculateur de supervision et le VSAT.

L'objectif étant d'optimiser l'usage des canaux de transmission pour une transmission simultanée d'un maximum d'informations et le principe, de traiter le signal pour concentrer des flux d'origines diverses sous forme d'un signal composite unique qu'est le signal multiplex.

Pour ce faire, trois techniques coexistent : le multiplexage en fréquence, le multiplexage temporel, le multiplexage temporel statistique.

#### 2.2.4.1. Le multiplexage en fréquence

Le principe est de découper la bande passante d'un canal en plusieurs sous-bandes, à chaque sous-bande est affectée une voie de transmission (figure 2.14).



Figure 2.14 : Multiplexage en fréquence

Le multiplexage en fréquence est essentiellement utilisé pour des supports analogiques. Il tombe en désuétude dans le domaine de la transmission des données.

#### 2.2.4.2. Le multiplexage temporel

Il est aussi appelé TDM (*Time Division Multiplexing*). Son principe repose sur le prélèvement successif de bits ou d'octets sur les différentes voies reliées au multiplexeur pour construire un train de bits ou d'octets qui constituera le signal composite.

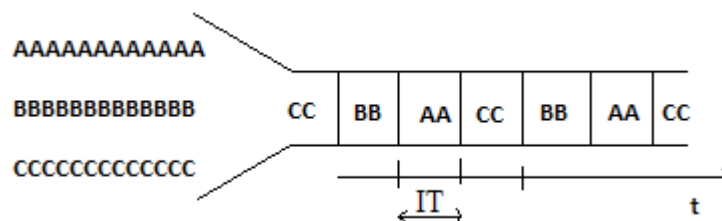


Figure 2.15 : Multiplexage temporel

Chaque intervalle de temps IT est affecté à une voie.

Le multiplexage temporel est surtout utilisé pour les supports numériques.

#### 2.2.4.3. Codage de la voix

Le traitement de la voix comprend deux étapes :

- L'analyse de la parole : on convertit un signal analogique sous une forme numérique,
- Synthèse de la parole : on convertit un signal numérique sous une forme analogique.

Pour ce faire, trois méthodes peuvent être utilisées :

- Le codage de la forme d'onde : approximation non linéaire de l'onde (PCM, ADPCM ...)
- Codage de la voix : voix synthétique (LPC ou *Linear Predictive Coding*)
- Codage hybride : Code-excited Linear Prediction (CELP ou *Code-Excited Linear Prediction*), ...

#### 2.2.4.3.1. LPC

Il est utilisé pour coder la voix. L'algorithme LPC consiste à encoder la voix à l'aide d'un modèle analytique de la voix. Ce modèle est paramétrable. L'encodage consiste donc à déterminer les paramètres du modèle pour qu'il s'adapte mieux aux données à coder. Le décodage consiste en l'utilisation des paramètres pour restituer la voix originale. Le résultat est plus ou moins ressemblant à l'originale, mais reste très synthétique dans sa manière de restituer la parole.

#### 2.2.4.3.2. CELP

L'algorithme CELP est très proche de l'algorithme LPC. Il détermine donc toujours les paramètres du modèle pour qu'il s'adapte au mieux à la voix originale. En plus, il calcule des erreurs entre le modèle paramétré et la voix à coder. Ces erreurs sont compressées et placées dans un index partagé par l'encodeur et le décodeur. Le travail à fournir pour l'encodage est beaucoup plus important que pour un codeur LPC. Cependant le résultat est de meilleure qualité. Par exemple, le résultat obtenu avec CELP à 4.8 kbps est de même qualité que ce que l'on obtient avec ADPCM à 32 kbps.

Nom	Débit (kbps)	Délai (ms)
G.711 : PCM	64	0.75
G.726 : ADPCM	16	1
G.723 : CELP MPMLQ	6.3	10 à 30
G.729 : CS-ACELP	8	10
G.728 : LD-CELP	16	3 à 5
GSM : téléphone mobile	13	

Tableau 2.07 : Comparaison des différents algorithmes

### 2.2.5. Le système FASTCOM [14][15]

L'appellation déposée FASTCOM regroupe une famille de terminaux numériques développés par ALCATEL. Ces terminaux sont associés à des équipements RF et une antenne pour composer une station terrestre d'un réseau FASTCOM de télécommunications par Satellite. Les autres stations d'un réseau FASTCOM doivent également être équipées de terminaux numériques du type FASTCOM pour permettre l'établissement de liaisons entre abonnés.

Un réseau du type FASTCOM est particulièrement adapté pour relier à faible coût des abonnés situés dans des lieux géographiques éloignés et/ou des zones à faible densité de population. Ce type de réseau est optimisé pour des liaisons de petit débit allant jusqu'à 64 kbit/s. Un système FASTCOM est donc particulièrement destiné aux applications de téléphonie rurale en utilisant les canaux satellite en mode DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*), et en communications de données en mode PAMA (*Pre Assigned Multiple Access*) ou BOD (*Bandwidth On Demand*). Situé dans la station principale du réseau, le système de gestion centralisée d'un réseau FASTCOM est constitué par un PEX (*Poste d'EXploitation*) associé à un CST (*Central Signalling Terminal*) pour la gestion des équipements de la station centrale et des équipements des stations distantes. Un système FASTCOM est composé d'une station centrale (HUB) assurant notamment la gestion du réseau et des stations distantes (jusqu'à plusieurs centaines), associées à une partie des ressources d'un satellite (figure 2.16).

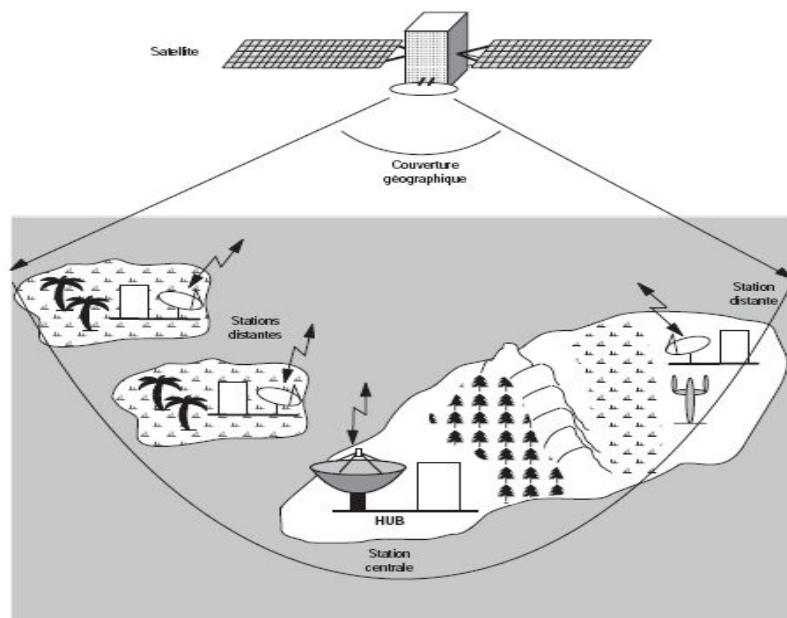


Figure 2.16 : Représentation géographique d'un système FASTCOM

### 2.2.5.2. Types de liaisons FASTCOM

Un réseau FASTCOM permet quatre types de liaisons opérationnelles entre abonnés et une liaison de test système :

TYPE	DESCRIPTION
Liaison monolatérale	Liaison unidirectionnelle reliant un abonné émetteur à un abonné récepteur
Liaison diffusion	Liaison unidirectionnelle reliant un abonné émetteur à plusieurs abonnés récepteur
Liaison bilatérale	Liaison bidirectionnelle reliant deux abonnés (ex : communication téléphonique)
Liaison boucle de test (LOOP TEST)	Liaison émission/réception sur le même terminal en boucle de test via le satellite

Tableau 2.08 : Liaison FASTCOM

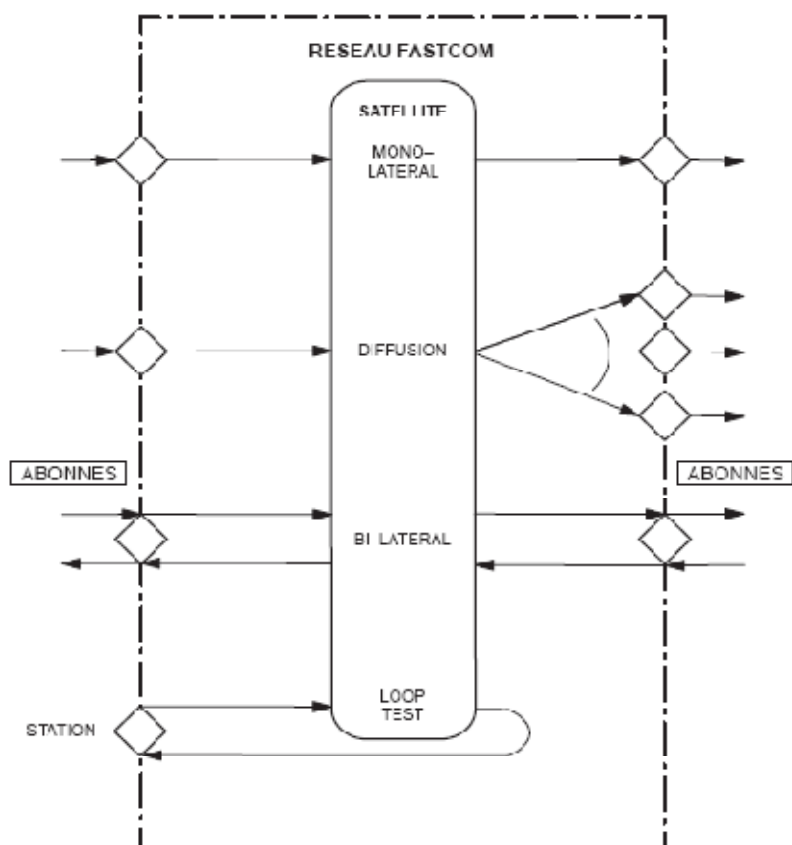


Figure 2.17 : Synoptique fonctionnel des quatre types de liaisons FASTCOM

Remarque : Dans une liaison *diffusion*, il suffit de configurer la même fréquence de réception sur tous les terminaux récepteurs du signal diffusé par le satellite pour réaliser la diffusion simultanée de la communication de l'abonné émetteur. Une liaison *bilatérale* nécessite les ressources de deux canaux du réseau, une pour l'aller et une pour le retour.

### 2.2.5.3. Types d'accès utilisateur d'un réseau FASTCOM

Les accès des utilisateurs potentiels (figure 2.18) d'un réseau FASTCOM sont du type :

- Téléphonie,
- Téléphonie/FAX,
- Abonnés raccordés via des autocommutateurs PABX,
- Numérique synchrone ou asynchrone, par exemple la visioconférence (sous conditions particulières), le système micro-informatique (X25 ...)

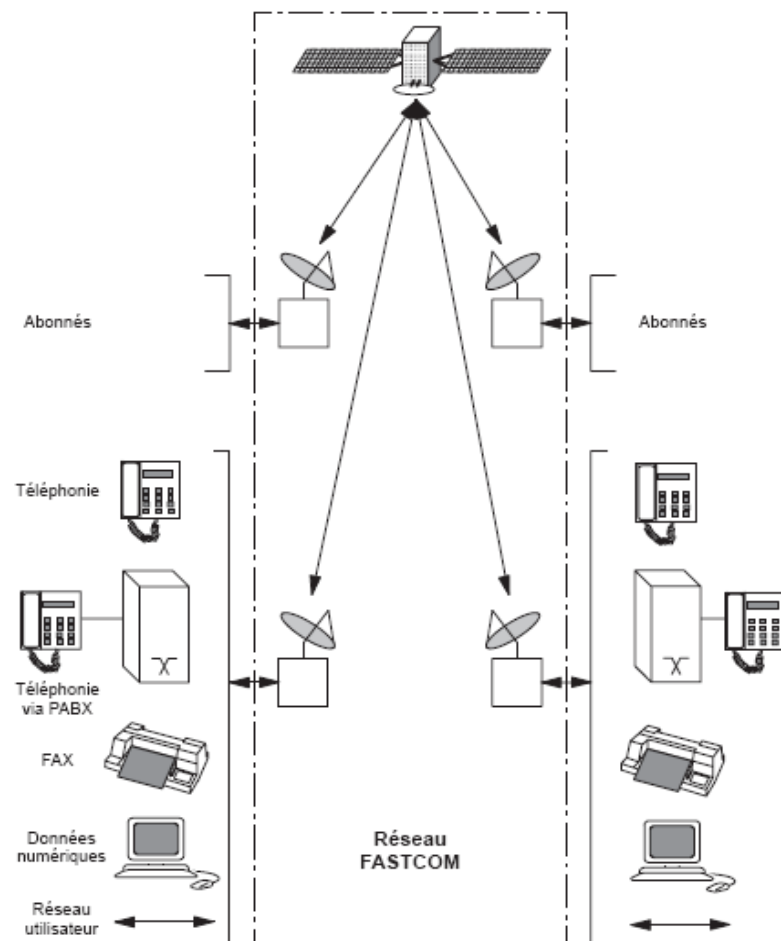


Figure 2.18 : Accès d'abonnés d'un réseau FASTCOM



#### 2.2.5.4. Modes de fonctionnement

Dans un réseau FASTCOM, la transmission peut s'effectuer sous les deux modes de fonctionnement :

- le mode porteuse monovoie SCPC (*Single Channel Per Carrier*),
- le mode porteuse multivoies MCPC (*Multiple Channel Per Carrier*).

Un réseau FASTCOM accepte une architecture mixte de liaisons SCPC/MCPC, de plus ces modes peuvent coexister dans un même terminal.

Les choix techniques et économiques entre les deux modes dépendent d'un compromis entre les bandes passantes disponibles dans le satellite, le coût de la partie spatiale et le coût de la partie terrestre (cartes modem et configuration associée du terminal).

##### 2.2.5.4.1. Le mode SCPC

En mode SCPC, la porteuse transmise est modulée par une seule voie de communication. Ce mode nécessite l'affectation d'un modem à chaque voie de communication.

Le mode SCPC peut être associé au mode d'accès à la demande DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*) qui permet une concentration spatiale et terrestre.

##### 2.2.5.4.2. Le mode MCPC

En mode MCPC, la porteuse transmet plusieurs voies de communication qui ont été multiplexées. Cette fonction de multiplexage est réalisée par le terminal.

Ceci permet l'affectation d'un seul modem pour 6 voies de communications maximum, suivant les débits des voies et le débit maximum du modem. Le mode MCPC ne peut être associé qu'aux modes d'accès PAMA/BOD (*Pre Assigned Multiple Access/Bandwidth On Demand*).

#### 2.2.5.5. Mode d'accès au réseau

Lors de l'établissement d'une communication, l'accès au satellite peut se faire sous plusieurs modes :

- par activation de liaisons prédéfinies sur commande de l'opérateur central ou par réservation horaire en mode d'accès par préaffectation PAMA/BOD,
- au moment de la demande de communication par l'abonné en mode d'accès à la demande DAMA.

## 2.2.6. Antennes VHF [16][17][18][19]

### 2.2.6.1. A la réception

Pour la réception, on utilise deux antennes directionnelles de type EKR2 de caractéristiques :

- Modèle d'antenne : EKR/2 – aéronautique,
- Puissance d'émission-réception : 50W,
- Polarisation : verticale,
- Atténuation du câble : 0.5dB,
- Bande de fréquence : 118-137 MHz,
- Diagramme de fréquence : 130 MHz,
- Perte : -24 dB.

Ainsi le diagramme de rayonnement des deux antennes combinées est donné dans la figure 2.19 :

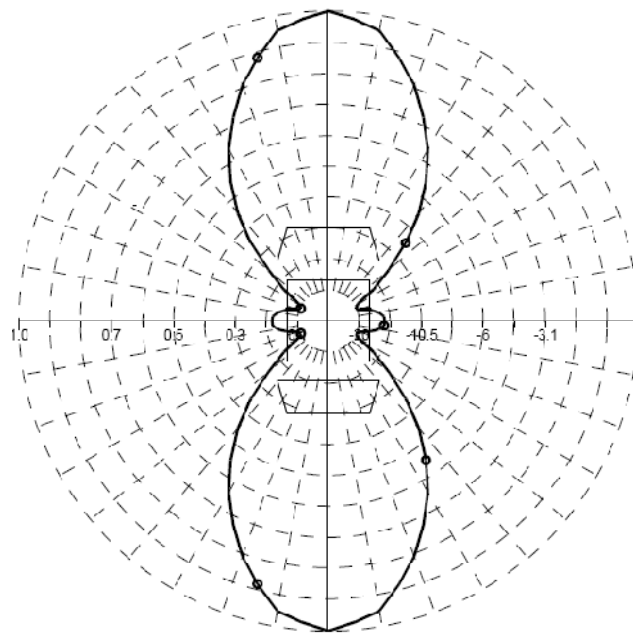


Figure 2.19 : Diagramme de rayonnement des deux antennes de réception

### 2.2.6.2. A l'émission

A l'émission on a quatre antennes omnidirectionnelles combinées de type GPLB II A. Ce sont des antennes omnidirectionnelles de polarisation verticale. Leur largeur de bande est très large et permet de couvrir la totalité de la portée aéronautique de VHF. Cette antenne peut aussi être utilisée tant en mode émission qu'en mode réception.

Sa structure entièrement fondée laisse les charges statiques ainsi que diverses interférences circuler vers le sol.

Les principales applications sont :

- Emission et réception simultanées dans la bande VHF
- Equipements de tour de contrôle
- Installations tactiques sur véhicules ou mâts pour le contrôle aérien

Ces antennes peuvent être adaptées les unes au-dessus des autres tout en assurant un découplage supérieur à 30dB pour une distance verticale d'environ 6,2m.

Voyons alors les caractéristiques techniques de ces antennes :

- Gamme de fréquence : 115 à 150 MHz,
- Impédance d'entrée :  $50 \Omega$ ,
- ROS dans la gamme :  $\leq 2.2$ ,
- Gain isotropique typique : 2.5 dBi,
- Polarisation verticale : verticale,
- Diagrammes de rayonnement : plan E (diagramme vertical)  $100^\circ$ ,  
Plan H (diagramme horizontal) omni à  $\pm 0,5\text{dB}$ ,
- Puissance admissible : 500W.

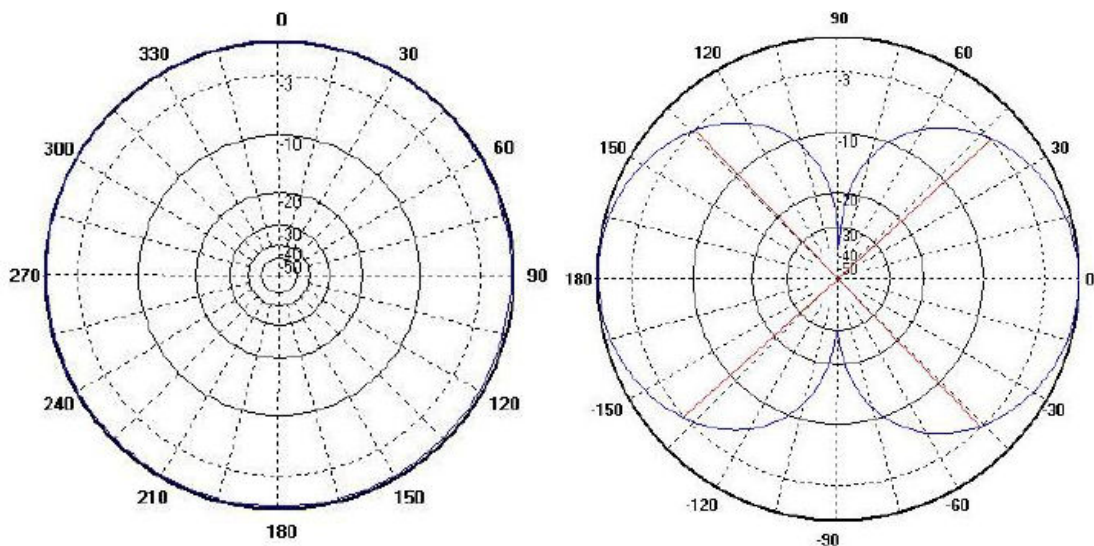


Figure 2.20 : Diagramme horizontal et vertical du GPLB II A

### 2.2.7. Conclusion de l'implantation de la couverture VHF

On gardera les mêmes équipements et dispositifs existants actuellement et on rajoutera trois autres stations VHF déportées pour assurer toute la couverture VHF de la FIR de Madagascar.

#### 2.2.7.1. Couverture VHF de la FIR gérée par Madagascar [25]

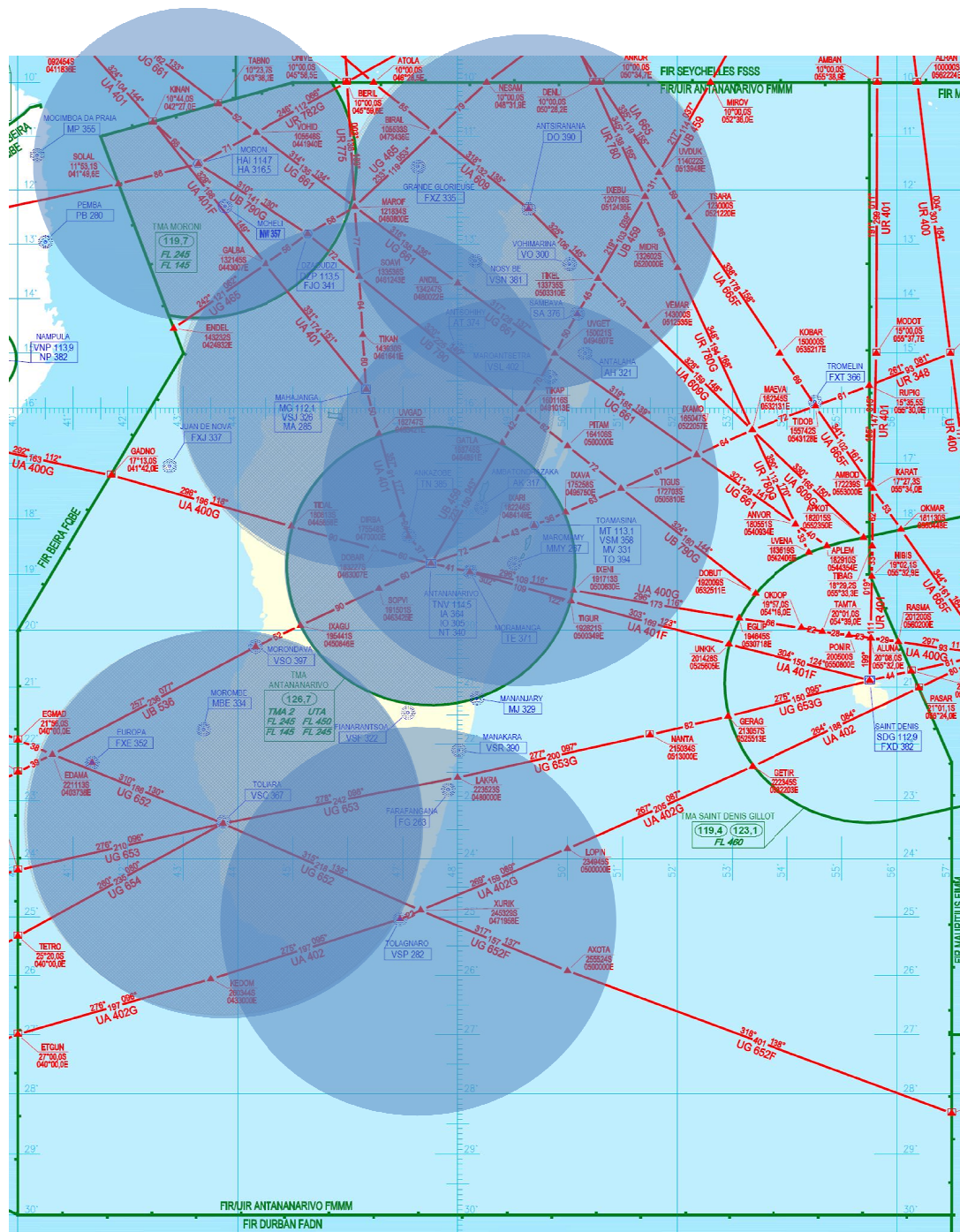


Figure 2.21 : Couverture VHF de l'espace géré par Madagascar actuellement

Dans la figure 2.21 ci-dessus, le contour gras en vert représente la limite de la FIR gérée par Madagascar. Les routes aéronautiques sont représentées par les traits en rouge, et les noms de ces routes sont écrits en rouge au-dessus ou en dessous de chaque trait rouge. Les petits triangles rouges représentent les balises qui tracent les routes aéronautiques. Les cercles bleus représentent les couvertures VHF. On peut ainsi voir que la couverture n'est pas encore actuellement assurée sur tout l'espace. Donc un aéronef survolant ces espaces non couverts utilise la communication air/sol HF (de 2,8 à 22 MHz), qui a ses inconvénients.

#### 2.2.7.2. Calcul de la puissance des émetteurs [20]

Pour une antenne isotropique, l'OACI recommande ce modèle de propagation dans l'espace libre :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \approx 377 \Omega \quad (2.07)$$

Le point M étant à une distance d de l'émetteur-récepteur,  $P_e$  étant la puissance d'émission de l'émetteur-récepteur,  $P_M$  la puissance reçue au point M.

$$P_M = \frac{P_e}{4\pi d^2} = \frac{|E|^2}{Z_0} \Rightarrow |E| = \frac{\sqrt{30 P_e}}{d} \quad (2.08)$$

Avec P : puissance rayonnée par l'antenne isotrope en W,

E : intensité du champ en  $mV/m$ . Le niveau de réception en un lieu donné du signal rayonné par un émetteur se mesure au travers de l'intensité du champ électrique E de cette onde. Suivant l'annexe 10 à la Convention de l'OACI, le niveau du champ est fixé à  $54\mu V/m$  pour assurer une réception convenable, cette valeur s'exprimant en  $[\mu V/m]$  ou décibel par rapport au microvolt par mètre  $[dB\mu V/m]$ ,

d : distance en km séparant l'émetteur du point de mesure.

Dans l'espace libre et infini, l'énergie rayonnée par une antenne se disperse. En supposant qu'à 1m de notre antenne isotrope, le front sphérique de l'onde « véhicule » une puissance de 1W pour un  $m^2$ , cette densité de puissance sera fortement réduite à 1000m, la surface de la sphère de rayon 1000m étant 10000 fois plus grande que celle du rayon de 10m, puisque la surface d'une sphère est égale à  $S = 4\pi R^2$ . Pour au moins cette raison, l'intensité du champ de l'onde rayonnée par une antenne isotrope décroît avec la distance suivant la relation précédente.

Plusieurs paramètres sont mis en jeu pour déterminer la distance d :

$$d = R^2 + (FL - Z_A)^2 \quad (2.09)$$

Ces paramètres sont définis dans la figure 2.22 suivante, schéma sur lequel R représente la rayon de la zone de couverture, FL le niveau de vol de l'aéronef,  $Z_A$  l'altitude de l'aérodrome où l'émetteur sera placé. Le niveau du champ électrique étant différent pour chaque niveau de vol.

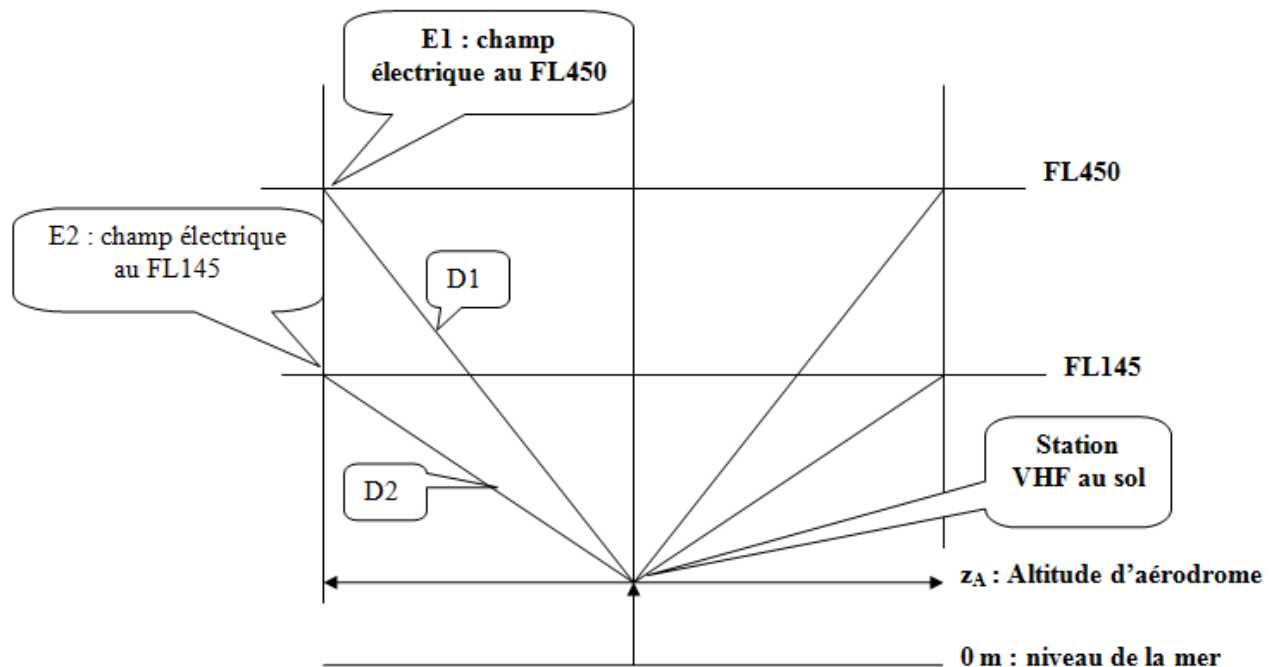


Figure 2.22 : Paramètres d'émission

D'où la formule :

$$P = \frac{E^2[R^2 + (FL - Z_A)^2]}{30} \quad (2.10)$$

Dans la suite de notre étude, cette formule (2.10) a été utilisée pour le dimensionnement de l'émetteur VHF pour assurer la couverture de la FIR de Madagascar. Les résultats obtenus pour les différents niveaux de vol et les différents secteurs sont consignés dans le tableau (2.09).

Dans un premier temps, on va placer un émetteur :

- A Antsiranana pour le Secteur Nord, la distance la plus lointaine de l'aéroport Arrachard FMNA (0,114 km d'altitude) est de 900 km
- A Antananarivo pour le Secteur Central, la distance la plus grande de l'aéroport d'Ivato FMMI (altitude 1,279 km) est de 1053 km
- A Tolagnaro pour le Secteur Sud, la distance la plus lointaine de l'aéroport FMSD (altitude 0,008km) est de 1242 km.

Secteurs	$E^2 = 0,054^2$ [mV/m] <sup>2</sup>	Rayon maximum du secteur R [km]	R <sup>2</sup> [km <sup>2</sup> ]	FL [km]	ZA [km]	(FL-ZA) [km]	(FL-ZA) <sup>2</sup> [km <sup>2</sup> ]	P [W]
SN (FL 190)	0,002916	900	810000	5,7912	0,114	5,6772	32,2306	78,7351
SN (FL 245)	0,002916	900	810000	7,4676	0,114	7,3536	54,0754	78,7373
SN (FL 450)	0,002916	900	810000	13,716	0,114	13,602	185,0144	78,7500
SC (FL 190)	0,002916	1053	1108809	5,7912	1,279	4,5122	20,3599	107,7782
SC (FL245)	0,002916	1053	1108809	7,4676	1,279	6,1886	38,2988	107,7800
SC (FL 450)	0,002916	1053	1108809	13,716	1,279	12,437	154,6790	107,7913
SS (FL 190)	0,002916	1242	1542564	5,7912	0,008	5,7832	33,4454	149,9405
SS (FL 245)	0,002916	1242	1542564	7,4676	0,008	7,4596	55,6456	149,9426
SS (FL 450)	0,002916	1242	1542564	13,716	0,008	13,708	187,9093	149,9555

Tableau 2.09 : Puissance des émetteurs

Théoriquement, on peut donc utiliser un seul émetteur qui assurera à lui-même toute la couverture de chaque secteur. Mais pratiquement on sait que le VHF a une propagation stable avec une bonne qualité de transfert vocal. Sa faible puissance produit de faible distorsion. Il a aussi un système de suppression du bruit efficace. Sa technologie développée permet un faible coût des équipements et un matériel très compact facilement intégrable. Mais la couverture VHF est limitée à la portée optique. Cela nécessite donc l'exploitation de nombreuses stations déportées. Le coût d'exploitation est élevé à cause des liaisons sol-sol entre centre et station, car il requiert une supervision centralisée des stations isolées.

Donc il nous faudra mettre plusieurs stations VHF déportées pour atteindre notre objectif. La figure 2.23 nous montre l'implantation de différentes stations VHF pour garantir la couverture VHF de trois secteurs proposés. A noter que la présence d'une couverture totale de la FIR est le premier moyen pour assurer la sécurité de la navigation aérienne.

Les émetteurs-récepteurs d'un même secteur utilisent la même fréquence. Pour ce faire, nous sommes allés à l'OMERT (*Office Malgache d'Etudes pour la Régulation des Télécommunications*) pour nous renseigner sur les fréquences qui sont encore disponibles dans ces régions :

- Pour le Secteur Nord : 125 MHz
- Pour le Secteur Central : 126 MHz
- Pour le Secteur Sud : 127 MHz

Chaque secteur sera géré par deux contrôleurs (un organique et un radariste) travaillant à Ivato. Toute communication avec les aéronefs survolant un secteur sont contrôlée dès l'entrée jusqu'à la sortie de ces derniers. Une communication VHF sera assurée, l'ADS permettra aux contrôleurs d'avoir une visualisation du secteur qu'ils gèrent. De plus, le CPDLC facilitera la tâche des contrôleurs. Et avec la mise en place du RVSM (*Reduced Vertical Separation Minimum*) effectuée le 25 septembre 2008, selon le SWOP (*Switch Over Plan*) de l'OACI, cela a permis de mieux gérer le secteur grâce à l'augmentation de la capacité de l'espace aérien.

Le transfert d'identification entre contrôleur « donneur » et contrôleur « receveur » est systématique et comprend l'indicatif des aéronefs concernés, la position, le cap ou la route suivie, le niveau de vol, et les observations diverses, en particulier des précisions sur une éventuelle régulation en vitesse ou des restrictions imposées par l'un des secteurs avant le transfert de contrôle.



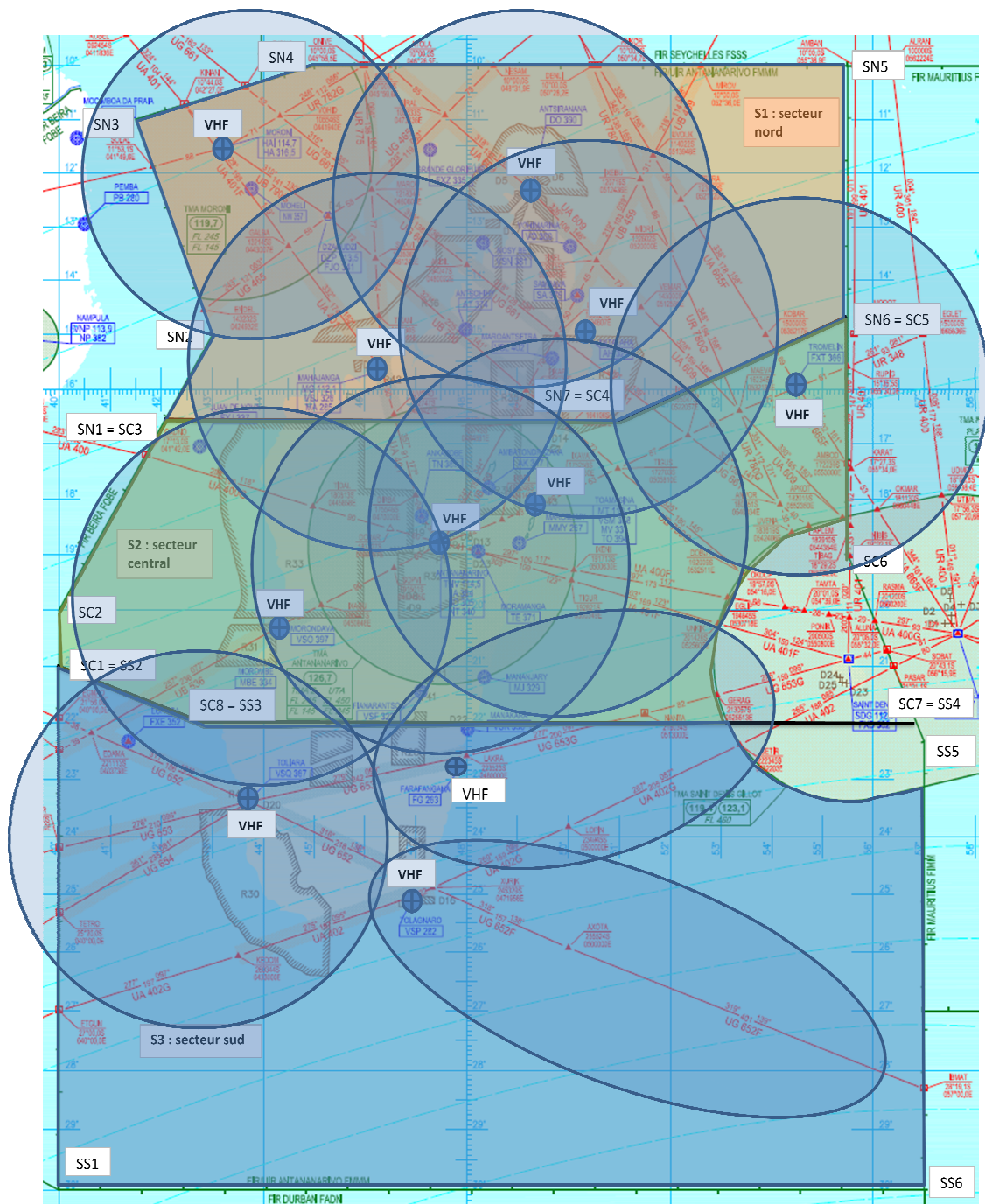


Figure 2.23 : Emplacement stratégique des VHF déportés

### 2.3. Communications par satellite [18][20]

Il est aussi possible d'utiliser la communication par satellite appelée AMSS (*Aeronautical Mobile Satellite System*) pour assurer la liaison air-sol. L'AMSS est le service *data link* par satellite mis en œuvre par INMARSAT (*International MARitime SATellite*) au profit de l'ATS. Les bandes de fréquences utilisées couvrent :

- 1545 – 1555 MHz pour la liaison satellite - aéronef
- 1645 – 1655 MHz pour la liaison aéronef – satellite

Le système AMSS a été normalisé par l'OACI en 1994 selon l'Annexe 10 de la Convention de Chicago. C'est aussi le système recommandé par le comité FANS pour remplacer la HF dans les zones océaniques.

### 2.3.1. Architecture globale de l'AMSS

Pour mieux comprendre comment l'aéronef communique grâce au système AMSS, la figure 2.24 décrit l'architecture du système.

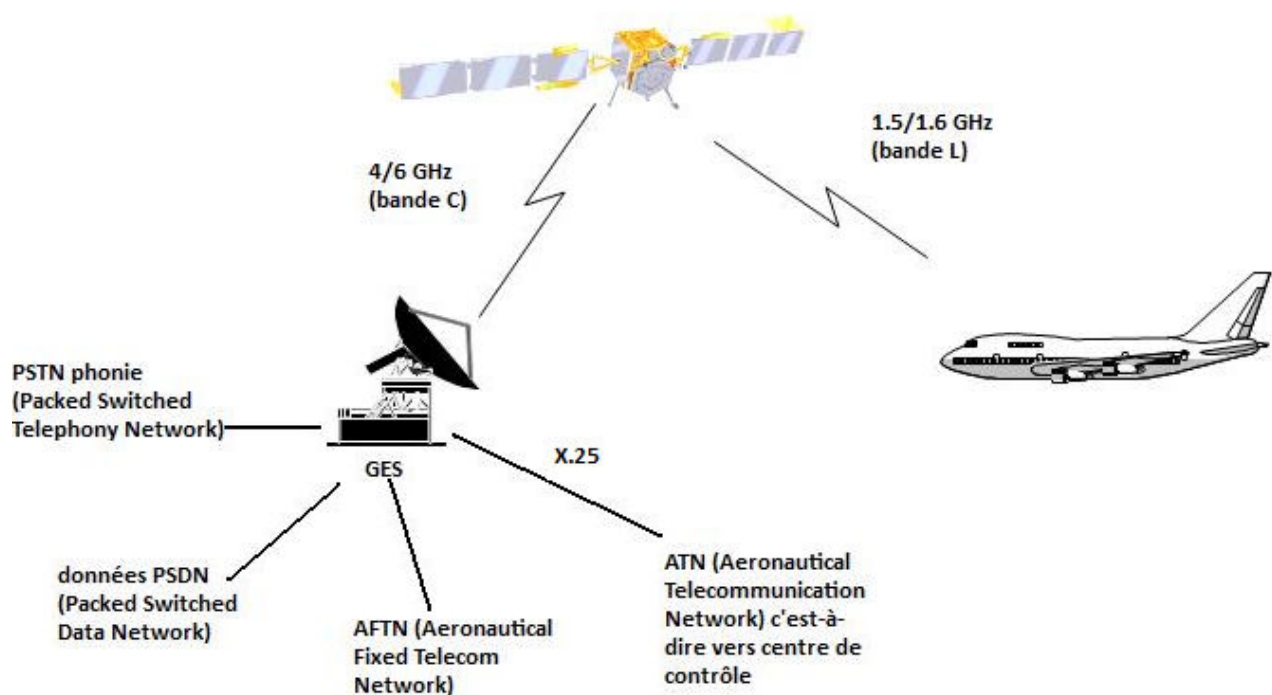


Figure 2.24 : Architecture du système AMSS

### 2.3.2. Le protocole X25 [21]

La norme X25 constitue une interface locale entre un ETTD (*Equipement Terminal de Traitement de Données*) et un ETCD (*Equipement Terminal de Circuit de Données*) (son point d'entrée dans le réseau). La norme décrit une interface ETCD-ETTD permettant la transmission de paquets sur un circuit virtuel. Les circuits virtuels sont de deux types : les CVC (*Circuits Virtuels Commutés*), ouverts à la demande et les CVP (*Circuits Virtuels Permanents*), établis une fois pour toute.

Pour chaque sens de transmission, un circuit virtuel se caractérise par :

- Sa classe de débit : exprimée en bit/s. La classe de débit est interprétée par l'ETTD comme le nombre de paquets de données complets par seconde qu'il n'a pas besoin de dépasser. Ce paramètre peut se négocier, sans pouvoir dépasser la classe de débit maximale assurée par le réseau. En conséquence, la somme des classes de débit de tous les CVC et de tous les CVP pour une interface ETCD/ETTD donnée peut dépasser la vitesse de transmission de données de la ligne d'accès ;
- ses paramètres de contrôle de flux : la taille de la fenêtre et la longueur du paquet de données.

#### 2.3.2.1. Définitions

Nous avons vu qu'il existe 2 types de circuits virtuels : les CVP et les CVC. A un instant donné, plusieurs CVC ou plusieurs CVP peuvent coexister. Chaque circuit virtuel véhicule une communication virtuelle et utilise une voie logique, dont le numéro est repéré par un numéro de groupe de voie logique ( $\leq 15$ ) et un numéro de voie logique ( $\leq 255$ ). Ces deux numéros forment un identifiant unique qui s'appelle numéro de voie logique dont la signification est locale à l'interface usager-réseau.

#### 2.3.2.2. Utilité et moyens du X25

Le X25 fournit un service d'acheminement d'informations fiable (sans perte, ni erreur et pas de déséquence). Il optimise l'utilisation des liaisons, il est adéquat pour les serveurs de grande taille, pour des terminaux sans puissance de traitement et pour des raccordements à des débits très variables.

Les moyens utilisés pour atteindre ses objectifs sont nombreux : comme utiliser les services d'une couche liaison de données sans perte et sans erreur, mettre en place un « circuit virtuel » entre les équipements d'accès au réseau, utiliser le multiplexage temporel statistique, gérer le flux d'informations et raccorder les terminaux « caractères » par un concentrateur.

#### 2.3.2.3. Format général d'un paquet de données

Chaque paquet de données comporte au moins 3 octets servant de descripteurs :

- Un identificateur général de format : précisant notamment si on utilise le modulo 8 ou 128 pour compter les paquets ;
- Un identificateur de voie logique ;
- Un identificateur de type de paquet.

Des champs supplémentaires peuvent s'ajouter selon les besoins. La figure 2.25 donne le format général d'un en-tête de paquet de données.

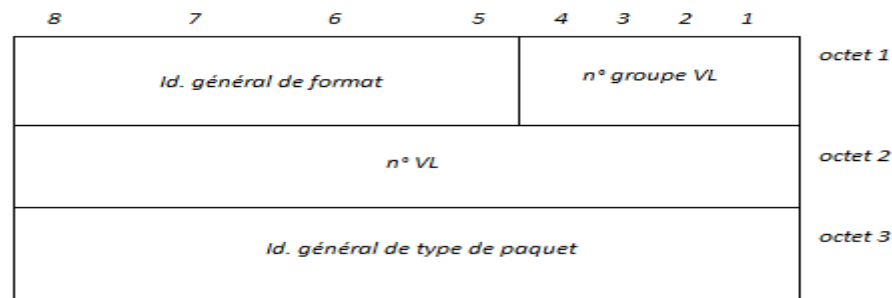


Figure 2.25 : Format général d'un en-tête de paquet X25

### 2.3.3. Points forts du système AMSS

C'est un système multi fonction, il peut transmettre la voix (vo codage à 9,6 kbps), les données et la correspondance publique (voix et fax). Il a une couverture mondiale avec ses 4 géostationnaires, sauf dans les régions polaires. La qualité de transmission est bonne. Il existe une gestion des modes circuit et paquet.

### 2.3.4. Points faibles du système AMSS

Le coût du matériel bord est élevé donc seule une faible proportion d'aéronefs est équipée. L'antenne à balayage utilisée limite les redondances, et les systèmes par satellite ne sont pas doublés à bord. Les coûts d'exploitation sont aussi élevés à cause de la situation de monopole générant des coûts de communications sans référence sur le marché. Tous ces facteurs conduisent à une utilisation faible de ce système et donc à un problème de rentabilité. Il n'y a pas d'applications ATS vocales opérationnelles car la préférence va au CPDLC.

## 2.4. Conclusion

Pour conclure ce chapitre, pour mieux contrôler l'espace aérien malgache, nous proposons de :

- Sectoriser l'espace aérien en trois secteurs qui auront le rôle de CRNA, qui seront chacun gérés par une alternance de deux contrôleurs,
- Mieux assurer la couverture VHF de notre FIR par l'ajout de quatre stations VHF déportées dans les localités suivantes : au Nord-Est à l'aéroport d'Antalaha et sur l'île Tromelin (base militaire française), au Sud-Ouest à l'aéroport de Morondava, au Sud-Est à l'aéroport de Farafangana.

L'utilisation d'une seule fréquence par secteur pour les vols en route et en approche permet de diminuer le changement de fréquence que doit effectuer le pilote. Effectivement, le pilote n'aura qu'à se caler sur une seule fréquence jusqu'à ce qu'il passe dans un autre secteur.

Enfin dans un avenir proche, on pourrait étudier la mise en place d'un système de contrôle du trafic aérien évolutif : le trafic aérien change au cours d'une même journée et mène souvent à une charge de travail non équilibrée entre les secteurs. Il est donc préférable d'avoir plus de secteurs pendant les périodes de pointe que pendant les périodes creuses. Actuellement, la sectorisation fixe n'est pas capable de s'adapter à cette évolution du trafic. Comme la tendance est actuellement de gérer un « ciel unique » des études sont menées pour restructurer l'espace en fonction des flux de trafic plutôt que des frontières nationales, pour créer des capacités supplémentaires au réseau. A ce titre, il se pourrait qu'en construisant des routes directes reliant l'origine et la destination du vol pour les flux de trafic importants, et en déviant verticalement les flux de trafic moins importants, qui intersectent ces routes directes, tout conflit sera évité.

## **CHAPITRE 3 : SIMULATION DES CARACTERISTIQUES DES EMETTEURS UTILISES**

Pour avoir une approche concrète de notre étude, nous avons effectué deux simulations : la première consistant à simuler la zone de couverture d'une antenne de transmission VHF avec le logiciel SPECTRA et la deuxième, à calculer quelques paramètres des émetteurs VHF ainsi qu'à connaître la fréquence à laquelle le pilote d'un aéronef sera calé suivant la latitude de sa position grâce à un logiciel développé sous Matlab.

### **3.1. Simulation des émetteurs VHF sous SPECTRA**

#### **3.1.1. Présentation du logiciel**

SPECTRA est un simulateur permettant entre autre de simuler la portée d'un émetteur en entrant les caractéristiques de l'antenne émettrice. Il est composé de deux logiciels à manipuler séparément.

Dans un premier temps, on lance SPECTRAplus Shell\_TEST@LSSMS pour configurer l'antenne. On enregistre les paramètres. Ensuite on lance SPECTRAemc version 4.2.6.5 avec la carte de Madagascar pour visionner le résultat.

#### **3.1.2. Travail effectué [16]**

Voici une fenêtre de SPECTRAplus (figure 3.01) dans laquelle on a commencé à travailler, en remplissant les champs de l'onglet « Antenna ». On y spécifie le nom de l'antenne : GPLBIIA ; son type : GPLBIIA ; son gain : 2.5 dBi ; sa polarisation : verticale ; le fabricant : RFS (Radio Frequency Systems France).

Dans la fenêtre de la figure 3.02, on spécifie les configurations de l'antenne, en outre son hauteur : 6.2m ; sa polarisation : verticale.

Dans la figure 3.03, l'utilisateur spécifie les caractéristiques de l'émetteur, c'est-à-dire le type de transmission, l'espacement des canaux : 25kHz ; la puissance de l'émetteur : 50W.

Pour tracer l'azimut copolaire (figure 3.04) on entre les données à partir du diagramme de rayonnement horizontal (figure 2.17 du chapitre 2). L'utilisateur donne les atténuations en dB pour chaque angle.

Technical Components: Aeronautical

Request Reference: 0001697 Project ID: HELENE Service: Aeronautical Subservice: Ground-To-Air

BNW: BST: ANTANANARIVO  
 EQ: ESSAII  
 TX: <TX2693>  
 RX: <TX2693>

Transmitter | Antenna Config. | **Antenna**

Antenna Name: GPLBIIA

Antenna Type: GPLBIIA

Antenna Gain: 2.5 dBi

Polarization: V - Vertical linear

Manufacturer: RFS

An. Code H:

An. Code V:

Comment:

Antenna Pattern:

Pattern Type:

Buttons: Query, Copy, Expand all, Add Frequency, TX->RX, Paste, Collapse all, Delete, Duplicate, Antenna, Unlink, Cancel, OK

Checkboxes: Show max. allowed Number of Records, Show Number of Records

Buttons: BTS, MS, EQ, TX, RX, f

Figure 3.01 : Description de l'antenne GPLBIIA

Technical Components: Aeronautical

Request Reference: 0001697 Project ID: HELENE Service: Aeronautical Subservice: Ground-To-Air

BNW: BST: ANTANANARIVO  
 EQ: ESSAII  
 TX: <TX2693>  
 RX: <TX2693>

Transmitter | **Antenna Config.** | Antenna

Antenna Height: 6.2 m Mean eff. Ant. Height: m Max. eff. Ant. Height: m Eff. Ant. Height

Azimuth: ° Elevation: °

Polarization: V - Vertical linear Pol. Angle: °

Feeder Line Length: m Feeder Type: cable Tx/Rx Cable Type: Feeding Mode:

Losses

Feeding Loss: 0 dB Branch: 0 dB Band Filter Trans. Att.: 0 dB

Switch: 0 dB Connector: 0 dB Duplex Filter Trans. Att.: 0 dB

Comment: Ext. Int. Update Status:

Buttons: Query, Copy, Expand all, Add Frequency, TX->RX, Paste, Collapse all, Delete, Duplicate, Cancel, OK

Checkboxes: Show max. allowed Number of Records, Show Number of Records

Buttons: BTS, MS, EQ, TX, RX, f

Figure 3.02 : Configuration de l'antenne GPLBIIA

**Technical Components: Aeronautical**

Request Reference 0001697	Project ID HELENE	Service Aeronautical	Subservice Ground-To-Air
------------------------------	----------------------	-------------------------	-----------------------------

↳ NVV:  
   ↳ ST: ANTANANARIVO  
     ↳ EQ: ESSA11  
       ↳ TX: GPLBIIA  
         ↳ [MHz]: 125  
       ↳ RX: GPLBIIA

---

**Transmitter** | Antenna Config. | Antenna

Type of TX: [Dropdown]

Module Name:

Standby Mode: [Dropdown]

No. of Sets:

Frequency Band:

Bandwidth:  kHz [Dropdown]

Stability:  kHz [Dropdown]

Equipment Cost Category: [Dropdown]

Design. of Emission:  ...

Other Equipment:

Additional Parameters: ☒ Ext. ☐ Int.

Text Blocks  
Limits

---

☐ Show max. allowed Number of Records

☐ Show Number of Records

BTS	MS	EQ	TX	RX	f

Query Tx->Rx  
Copy Paste  
Expand all Collapse all  
Add Frequency Delete  
Duplicate

Max. radiated Power  
 W [Dropdown] EIRP [Dropdown]  
 Equipment Output:  W [Dropdown]  
 Max. Power of Equipment:  W [Dropdown]

Power to Antenna:  W [Dropdown]  
 Update Status: [Dropdown]

Cancel OK

Figure 3.03 : Caractéristiques de l'émetteur

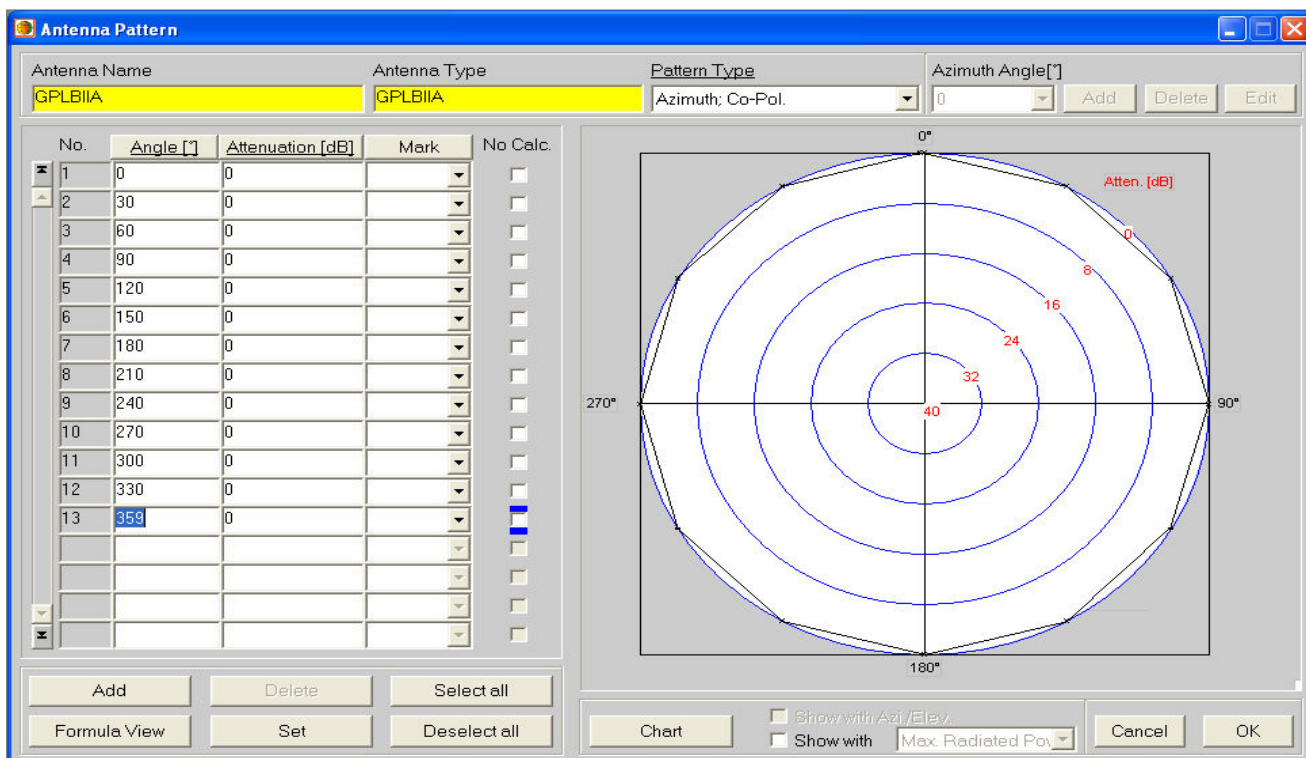


Figure 3.04 : Azimut copolaire du GPLBIIA



Pour tracer l'élévation copolaire (figure 3.05) l'utilisateur entre les données à partir du diagramme de rayonnement vertical (figure 2.17 du chapitre 2). Les atténuations en dB pour chaque angle sont à spécifier. Et on obtient :

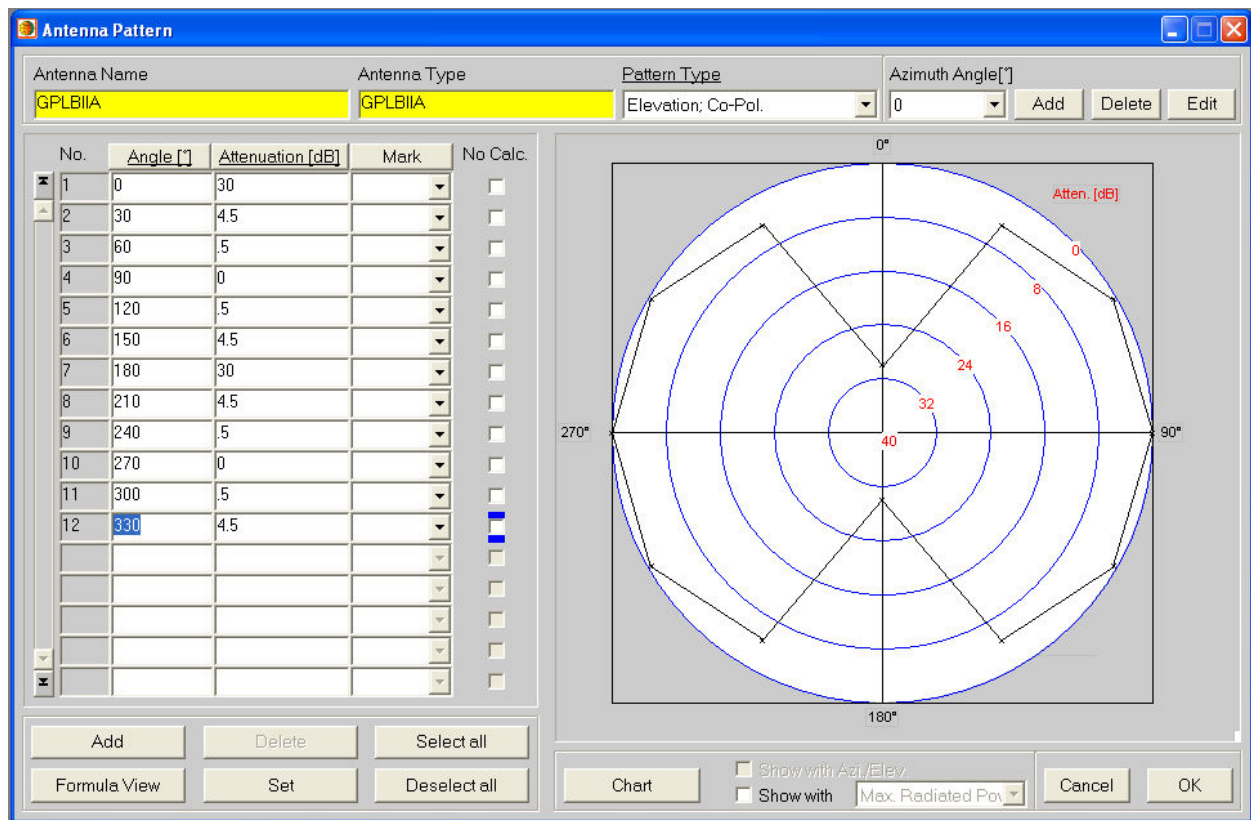


Figure 3.05 : Elévation copolaire du GPLBIIA


Dans la fenêtre de la figure 3.06, on spécifie les données du site où sera placé l'émetteur, entre autre : les coordonnées du site : la latitude et la longitude ; l'altitude par rapport au niveau de la mer ; le type de terrain sur lequel se trouve le site : aéroport ou autres.

Par exemple dans le cas de la configuration du site sis à Antalaha, dans le premier cadre à gauche, on peut voir, la fréquence à laquelle émet l'émetteur : 125MHz ; les coordonnées du site : 50° 19' 12.2'' E et 14° 59' 56.1'' S ; l'altitude du site : 7m par rapport au niveau de la mer ; le site sera implanté à l'aéroport.

Figure 3.06 : Données sur le site de l'émetteur

Dans un deuxième temps, on lance SPECTRAemc, on charge les données sur l'émetteur dont on veut visualiser la zone de couverture et on aura la fenêtre de la figure 3.07.

En dessous de la barre des tâches, on a un petit écran montrant une vue d'ensemble 2D de la carte de Madagascar, avec l'antenne émettrice en rouge, et le cadre rouge est le cadre qui a été délimité par l'utilisateur pour faire apparaître la zone de couverture. En dessous, le cadre où défilent les options d'affichages, on peut faire afficher l'hydrologie, les routes nationales, les routes secondaires, les lacs, les rivières, les canaux, le relief, des résultats obtenus auparavant, d'autres émetteurs, les noms des villes, les contours des villes,....

En dessous du cadre principal, on a affiché l'onglet qui nous intéresse le plus : « Map Info ». en cliquant sur ce bouton  on peut, après affichage de la zone de couverture déterminer : la distance de l'émetteur à la limite de la zone, une bulle info apparaîtra dans ce sens pour afficher la distance en km et l'angle de l'azimut. En faisant déplacer le curseur, la valeur du champ « Value » qui représente le champ électrique (en dBμV/m) que recevra le récepteur, varie suivant la légende en haut à gauche. Cette légende montre les niveaux de réception suivant la couleur (que l'utilisateur peut changer suivant son choix), le rouge dans notre cas représente un niveau supérieur à 80dBμV/m, le jaune un

niveau supérieur à  $20\text{dB}\mu\text{V/m}$ , le vert un niveau supérieur à  $10\text{dB}\mu\text{V/m}$  et en blanc les niveaux plus petit que  $-20\text{dB}\mu\text{V/m}$ . Notons ici que l'échelle est de  $2\,037\,166^{\text{ème}}$ .

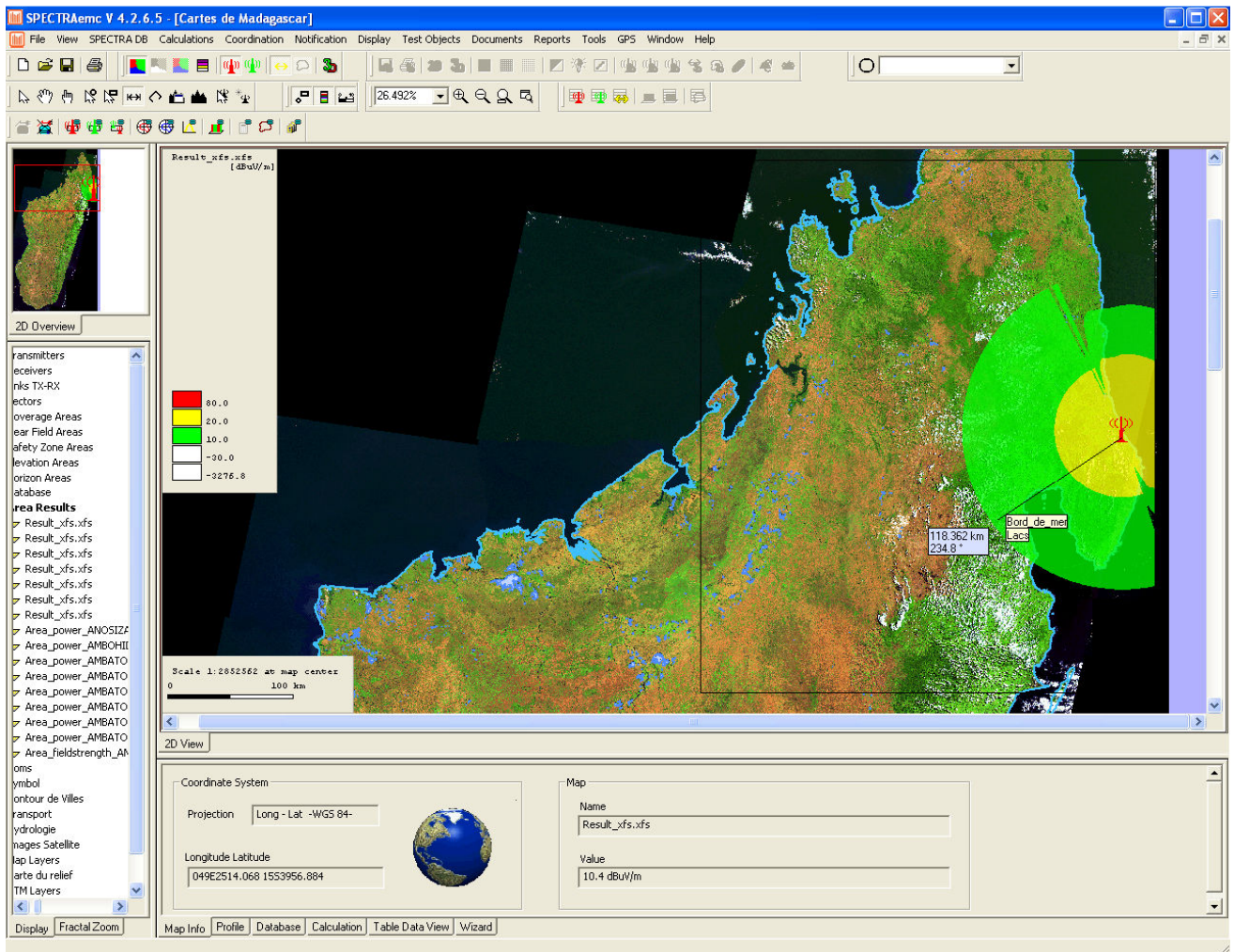


Figure 3.07 : Zone de couverture d'une antenne GPLBIIA sis à Antalaha

Ainsi dans la figure 3.07 nous avons chargé les données du site d'Antalaha. Le cadre principal, montre la zone de couverture à une altitude de 2500m d'une seule antenne. Le nom de la carte est dans le champ « Name » de Map : *Result\_xfs.xfs*. L'info bulle sur la carte indique que le rayon de la zone de couverture est de 120.469km pour un angle de  $314.8^\circ$ . Du côté sud, on a quelques collines d'où la forme de la couverture qui n'est pas complète. Et à la plus grande distance du rayon de couverture, le champ « Value » indique un niveau de champ de  $10.4\text{ dB}\mu\text{V/m}$ . de l'autre côté de ce cadre, on a les coordonnées du système là où la souris pointe.

Remarque : le simulateur a été un peu réticent quant à montrer les résultats pour des altitudes allant au-delà de 2500m, or nous avons vu dans le paragraphe 1.1.5. du chapitre 1 que la distance minimale

à laquelle l'avion vole est de 14500 ft soit 4.4196 km. Les zones affichées ne correspondent pas à un rayonnement maximum du diagramme de l'élévation ou l'élévation copolaire, mais à une distance inférieure au rayonnement maximum. Nous tenons à préciser ici que dans nos calculs théoriques du paragraphe 2.2.7 du chapitre 2, nous avons un rayon de couverture de 200NM que le simulateur n'a pu nous fournir. De plus dans nos calculs théoriques, on a utilisé quatre antennes émettrices, ce qui augmentera encore la portée de notre zone de couverture.

En effectuant ces entrées pour chaque site, on obtiendra la figure 3.08 suivante :

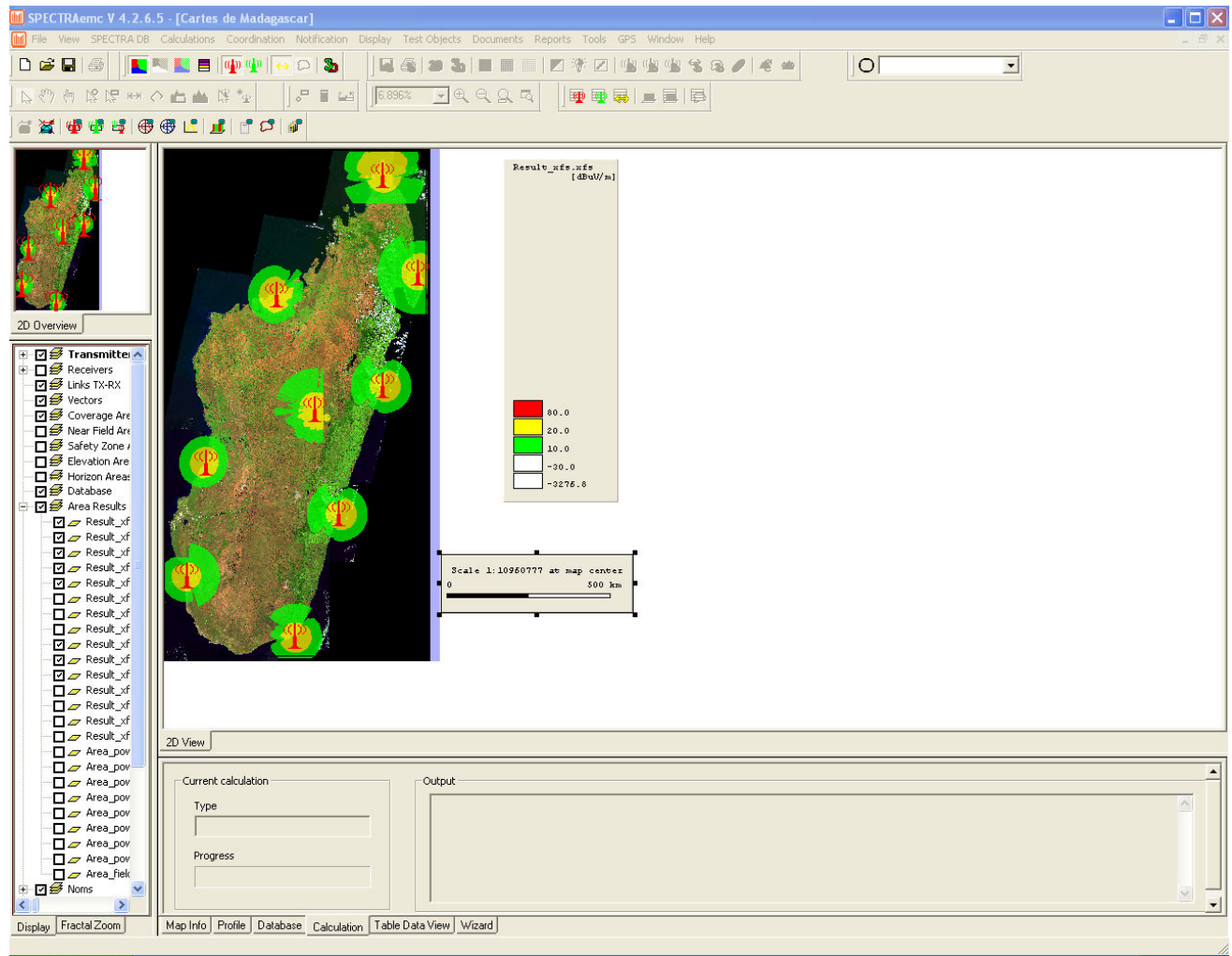


Figure 3.08 : Vue d'ensemble de 9 zones de couverture.

**Remarque :** Le site de Tromelin se situant en-dehors de la zone exploitable de la carte, on n'a pu simuler sur ce site.

### 3.1.3. Conclusion de la simulation sous Spectra

Avec une seule antenne, et un émetteur de 50W, on arrive à des rayons de couverture de 120km. Selon la figure 2.18 représentant les couvertures VHF actuelles, la station de Toamasina déjà mise en place avec 4 antennes de réception et deux d'émission atteint un rayon de couverture de 216km. Donc on peut très bien arriver à couvrir des rayons de 200km théoriquement et pratiquement. Nos trois secteurs auront grâce à ces quatre stations de VHF déportés en plus, une bonne couverture VHF sur tout leur espace.

## 3.2. Simulation sous Matlab

Cette simulation se portera d'une part sur la conception d'un logiciel permettant de calculer certains paramètres de la transmission émetteur-récepteur VHF de nos stations déportées. D'autre part, elle permettra à l'utilisateur survolant notre espace aérien de connaître la fréquence à laquelle il devra se caler pour la communication pilote-contrôleur.

### 3.2.1. Présentation de Matlab [30]

MAT (rix) LAB (oratory) est un logiciel puissant doté à la fois d'un langage de programmation haut niveau et d'outils dédiés aux calculs numériques et à la visualisation numérique. Développé en C par la société *Mathworks*. *Matlab* intègre dans sa version originale les outils mathématiques classiques tels que : le calcul matriciel, la manipulation de fonction, le graphisme ... Mais actuellement, il recouvre d'autres domaines d'applications de l'information scientifique comme : la visualisation graphique 2D et 3D, la résolution d'équations aux dérivées partielles, l'optimisation, le contrôle de procédés, le traitement du signal, le traitement de l'image, la logique floue, les réseaux de neurones ...

Le système *Matlab* se divise en deux parties : le noyau *Matlab* et une collection de *toolboxes*.

Le noyau *Matlab* comprend :

- Un environnement de travail offrant plusieurs facilités pour la manipulation des données. Son interpréteur permet de tester rapidement ses propres programmes Matlab ;
- Un système graphique *Matlab* (interfaces homme-machine, graphiques, images, animations) ;
- Un langage de programmation Matlab ;
- Une librairie de fonctions mathématiques *Matlab* ;
- Un système d'interfaçage facilitant l'exécution de programmes C ou Fortran sous Matlab.

La collection de *toolboxes* (boîtes à outils) regroupe un ensemble de fonctions spécifiques à un thème.

### ***Fonctions de Matlab pour les graphiques***

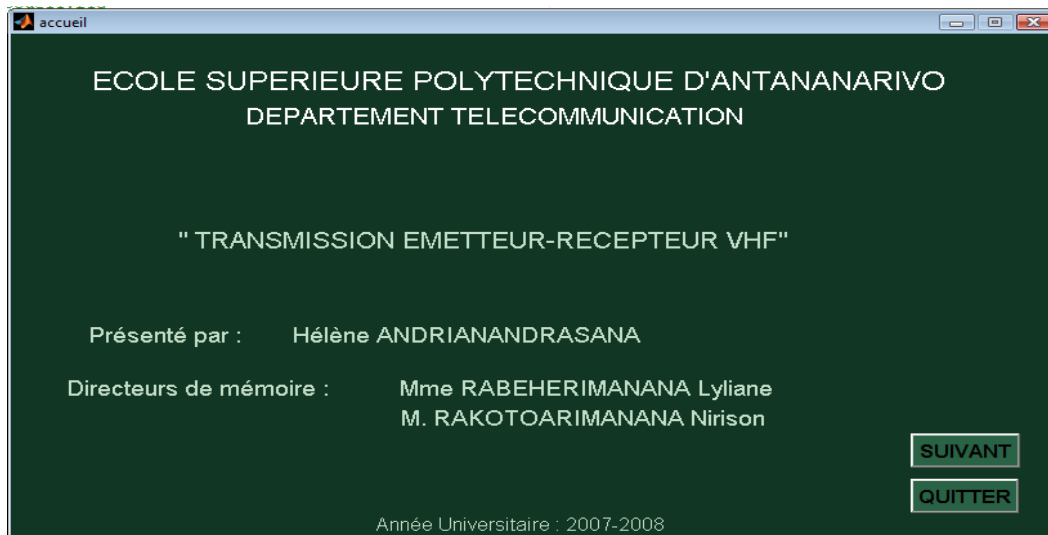
<b>cla</b>	fermeture des axes courants
<b>figure</b>	spécification du nom d'une fenêtre graphique
<b>grid</b>	ajout d'une grille pour une courbe tracée
<b>hold on</b>	pour tracer plusieurs courbes, avec, chacune ses propriétés propres, on l'insère entre les deux commandes 'plot' pour maintenir le premier écran afin que la courbe suivante n'écrase pas la précédente
<b>plot</b>	pour tracer une courbe
<b>set</b>	pou spécifier les propriétés d'un objet
<b>text</b>	pour écrire un texte au niveau de la figure
<b>title</b>	titre de la figure

### ***3.2.2. Information sur le logiciel***

La transmission entre nos émetteurs VHF au sol et les récepteurs de l'avion suivent les paramètres qui peuvent être calculé comme ce qui suit.

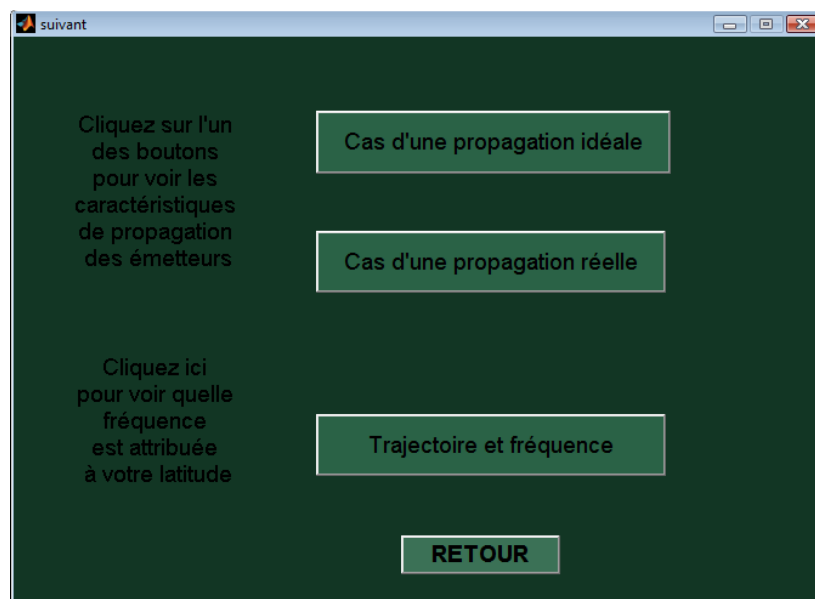
L'antenne émettrice crée à partir de l'énergie électrique qui lui est fournie, un champ électrique et un champ magnétique dans l'espace environnant.

Un émetteur isotrope est un émetteur qui rayonne de l'énergie de la même manière dans toutes les directions.



*Figure 3.09 : Fenêtre d'accueil*

Dans cette fenêtre, on a quelques informations relatives à l'auteur, ainsi que le titre de la simulation : « TRANSMISSION EMETTEUR-RECEPTEUR ». Pour continuer, on clique sur le bouton « SUIVANT ». Apparaît alors la fenêtre de la figure 3.09.



*Figure 3.10 : Fenêtre de choix de calcul*

Trois choix sont alors proposés : soit l'utilisateur prend le cas de la propagation idéale, soit le cas réel, soit il calcul la fréquence sur laquelle il doit se caler en fonction de sa latitude.



### 3.2.3. Cas d'une propagation idéale

Dans un premier temps, on considère que l'antenne est isotrope et que la propagation de l'onde électromagnétique créée est idéale, sans obstacle ni perturbation. En cliquant sur « Cas d'une propagation idéale », on aura la fenêtre suivante :

The screenshot shows a software window titled "ideale" with a dark green background. The window is titled "PROPAGATION IDEALE". It is divided into two main sections: "DONNEES" (Inputs) on the left and "RESULTATS" (Results) on the right. The "DONNEES" section contains three input fields: "Pe [W]", "R [km]", and "f [Hz]", each with a corresponding text label. Below these are four buttons: "CALCULER", "REINITIALISER", "RETOUR", and "FERMER". The "RESULTATS" section contains four output fields: "Dsp [ W/m² ]", "Seq [ m² ]", "Pr [ W ]", and "G [ dB ]", each with a corresponding text label. Below these are two buttons: "Tracer Pr en fonction de la longueur d'onde" and "Tracer Pr en fonction de la fréquence".

Figure 3.11 : Fenêtre d'entrée des paramètres pour la propagation idéale

L'utilisateur remplit le champ « DONNEES », en entrant dans :

- $P_e$  : la puissance isotrope rayonnée à l'émission en watts,
- $R$  : la distance entre l'émetteur et le récepteur en km,
- $F$  : la fréquence d'émission en Hz.

Dans le champ résultat, on aura :

- La densité surfacique de puissance disponible  $Dsp [ W/m^2 ]$  à une distance  $R$  de l'émetteur en fonction de la puissance isotrope rayonnée à l'émission  $P_e$  s'exprime par :



$$D_{SP} = \frac{P_e}{S} \quad (3.01)$$

$$\text{Avec } S = 4\pi R^2 \quad (3.02)$$

- Dans le cas d'une antenne de réception isotrope de longueur d'onde  $\lambda$ , la surface équivalente d'antenne  $S_{eq}$  [m<sup>2</sup>] est égale à :

$$S_{eq} = \lambda^2 / 4\pi \quad (3.03)$$

La longueur d'onde  $\lambda$  représente le trajet parcouru par une onde électromagnétique de fréquence  $f$  pendant une période d'oscillation ( $f=1/T$ ). La longueur d'onde est donc la distance entre deux cycles consécutifs, elle est exprimée en mètres et est inversement proportionnelle à la fréquence du signal.

- La puissance électrique  $P_r$  [W] reçue par un récepteur adapté à l'antenne de réception est égale à la densité surfacique multipliée par la surface équivalente  $S_{eq}$  de l'antenne de réception :

$$P_r = D_{SP} * S_{eq} \quad (3.04)$$

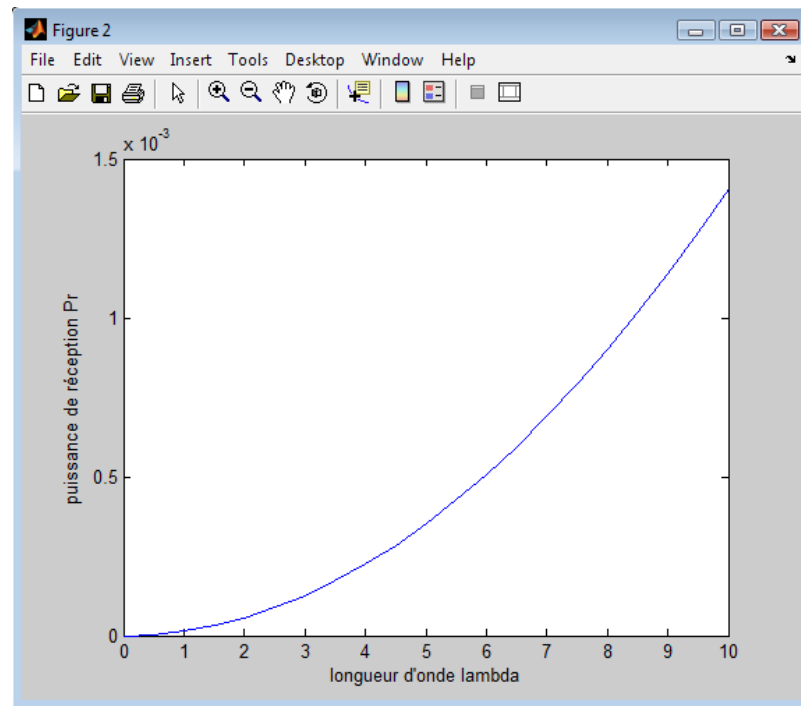


Figure 3.12 : Courbe de  $P_r$  en fonction de  $\lambda$

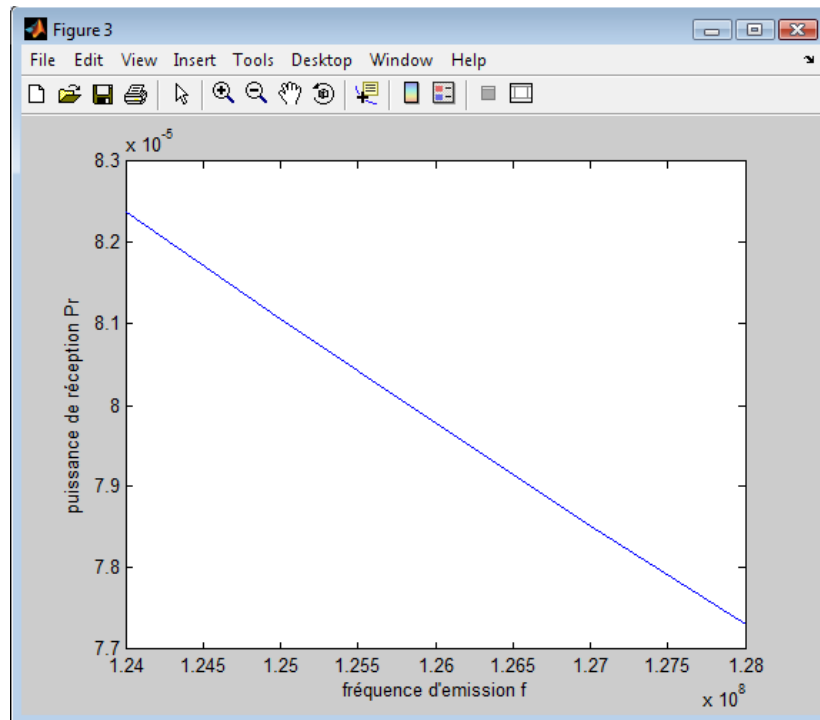


Figure 3.13 : Courbe de Pr en fonction de f

Dans ces figures 3.12 et 3.13, on constate que pour une puissance d'émission  $P_e$  et une distance  $R$  fixe, la puissance restituée est proportionnelle au carré de la longueur d'onde. Pour des conditions similaires, la réception (liée à la puissance) est de meilleure qualité pour des fréquences plus basses.

- Enfin on a l'atténuation (en dB) de la transmission de puissance à partir de la formule (3.05)

$$G = 10 \log \left( \frac{P_r}{P_e} \right) \quad (3.05)$$

Après avoir entré les données, on clique sur « CALCULER », les résultats vont alors s'afficher dans leurs cases correspondantes. Pour tracer les courbes des figures 3.12 et 3.13, on clique sur « TRACER ». Si l'on veut réentrer de nouvelles données, on clique sur « REINITIALISER ». Pour revenir au menu précédent on clique sur « RETOUR ». Pour quitter la fenêtre on clique sur « FERMER ».

### 3.2.4. Cas d'une propagation réelle

Dans un second temps, en cliquant sur « CAS D'UNE PROPAGATION REELLE » on aura la fenêtre suivante :

Figure 3.14 : Fenêtre d'entrée des paramètres pour la propagation réelle

L'utilisateur remplit le champ « DONNEES » comme suit :

- $P_e$ ,  $R$  et  $f$  de la même façon que pour le cas idéal,
- $A_e$  [dB] est l'amplification de l'antenne d'émission réelle dans sa direction de propagation,
- $A_r$  [dB] est l'amplification en puissance d'une antenne de réception

Dans le champ « RESULTATS » on aura :

- La densité surfacique  $D_{sp}$  [W/m<sup>2</sup>] suivant la formule

$$D_{SP} = A_e * P_e / S \quad (3.06)$$

Avec  $S$  obtenu suivant la formule (3.02)

- On définit la surface de l'antenne de réception  $S_r$  [m<sup>2</sup>] comme :

$$S_R = A_R * \lambda^2 / 4\pi \quad (3.07)$$

L'antenne de réception capte toute l'énergie présente sur la surface équivalente de réception. Cette antenne de réception restitue à sa sortie la puissance  $P_r$ , qui est la puissance fournie à l'entrée du récepteur.

- La puissance reçue  $P_r$  [W] par une antenne réelle de surface  $S_r$  peut donc s'exprimer :

$$P_R = D_{SP} * S_R \quad (3.08)$$

- On a toujours la même formule (3.05) pour l'atténuation  $G$  [dB]

### 3.2.5. Trajectoire et fréquence

Dans la fenêtre « suivant », si on clique sur le bouton « trajectoire et fréquence », on aura la fenêtre suivante, nous permettant de connaître la fréquence sur laquelle on est calé en entrant notre latitude.

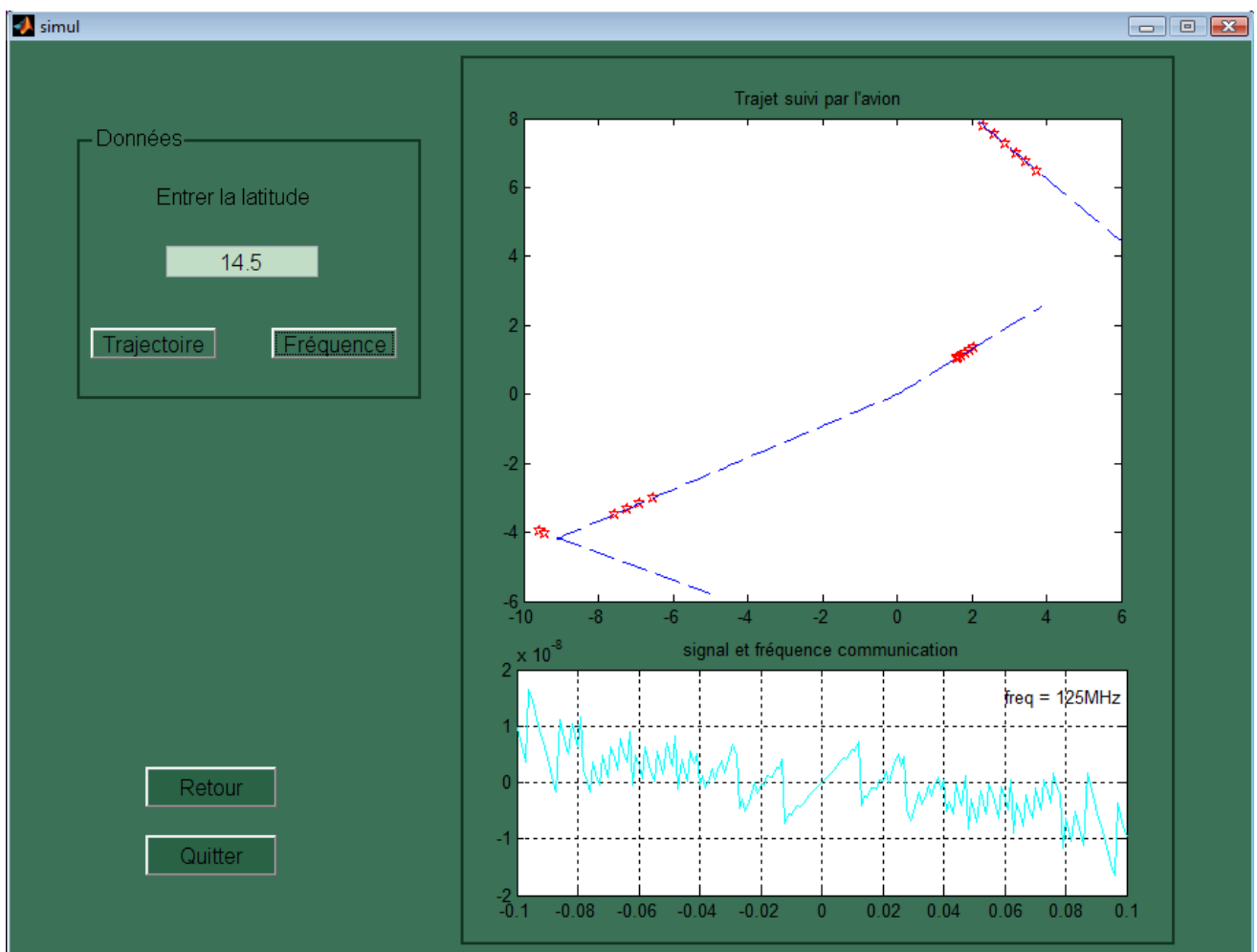


Figure 3.15 : Fenêtre trajectoire et fréquence

Nous tenons à préciser ici que le trajet suivi par notre avion dans cet exemple est Antsiranana-Toliara. Par contre si l'utilisateur prend un autre trajet, le trajet suivi par l'avion ne sera pas disponible mais il pourra toujours voir la fréquence utile.

Dans le cadre « Données », on entre notre latitude, ensuite on clique sur « Trajectoire » pour voir le trajet de l'avion et sur « Fréquence » pour voir la fréquence à laquelle se caler. Dans l'axe « Trajet suivi par l'avion », les étoiles rouges représentent l'avion à une latitude donnée, et les traits bleus discontinus le trajet de l'avion.

Dans l'axe « Signal et fréquence communication », on voit apparaître en haut à droite de l'axe, la fréquence sur laquelle on est suivant la latitude entrée.

### **3.2.6. Conclusion de la simulation sous Matlab**

On constate que pour une puissance d'émission  $P_e=50W$  de nos émetteurs et pour une distance  $R$  fixe, la puissance restituée est proportionnelle au carré de la longueur d'onde. De plus, plus la fréquence est basse, meilleure est la qualité de réception.

## **CONCLUSION GENERALE [22]**

Un meilleur partage de l'information qui n'est actuellement accessible qu'à un nombre restreint d'utilisateurs doit permettre une diminution des échanges radiotéléphoniques entre les pilotes et les contrôleurs ainsi qu'une meilleure tolérance du système aux erreurs humaines. La parole reste le moyen de communication privilégié, mais débarrassé des longs messages d'informations transitant maintenant par les liaisons de données. En effet, il semble nécessaire de filtrer la grande quantité d'informations disponible grâce aux liaisons de données sous peine de provoquer une surcharge visuelle donc cognitive pour les utilisateurs, ce que l'on désire justement éviter.

L'infrastructure mise en place actuellement est parfaitement adéquate à l'économie du pays. Sept stations de VHF déportés, peuvent encore assurer la demande. Or vu les prévisions du taux de croissance des touristes, et de l'économie malgache d'après les 2<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> engagements du MAP (Madagascar Action Plan) prévu par le gouvernement malgache, le secteur de la navigation aérienne sera entraîné dans l'accroissement évolutif de l'économie du pays. Aussi cette sectorisation ainsi que le rajout des quatre autres stations de VHF déportés ont été étudiés de telle sorte à alléger la tâche des contrôleurs, à améliorer la couverture VHF, à donner confiance aux usagers, bref que les parties concernés soient satisfait, donc enclin à « consommer ».

Nous avons exposé dans ce mémoire une approche pour améliorer le contrôle de notre espace aérien. Notre approche, hérite à la fois de systèmes déjà mis en place dans d'autres pays (CRNA) et de l'exploitation de l'infrastructure existante (station de VHF déporté), mais ne prétend pas résoudre totalement le problème. Cependant, nous espérons que nos résultats théoriques vont contribuer au développement du système utilisé dans un cadre opérationnel.

# ANNEXES

## **ANNEXE 1 : LES COMMUNICATIONS VOCALES [10]**

### **Les catégories de communication Air/sol**

On distingue quatre catégories de communications Air/sol qui sont les communications AOC, AAC, APC (*Aircraft Passenger Communications*) et ATS. Toutes existent en communication vocale, mais en liaison de données, il n'y a que AOC et AAC.

#### ***Les communications AOC***

Les communications AOC correspondent aux échanges liés à l'exploitation entre les aéronefs d'une compagnie et leur base qui peuvent indiquer la gestion de la logistique à l'arrivée d'un vol, la coordination des correspondances, les échanges de paramètres liés au suivi technique du vol qui sont de plus en plus automatisés en liaisons de données.

#### ***Les communications AAC***

Les communications AAC regroupent l'ensemble des communications liées aux besoins de la compagnie exploitante, c'est-à-dire le changement de programme lors d'une rotation, la gestion des déroutements et divers échanges.

#### ***Les communications APC***

Les communications APC correspondent au service de correspondance publique offert pour l'aéronef.

#### ***Les communications ATS***

Les communications ATS regroupent : les services de communications relatifs à l'information en vol ou FIS (*Flight Information Service*) : informations météorologiques et informations générales (ex : fréquences radio de certains services) ; les services de communications de contrôle du trafic aérien ou ATC: actions de contrôle (compte rendu systématique de vol, par exemple).



## **ANNEXE 2 : LA COMMUNICATION HF [19][29]**

La bande de fréquence utilisée couvre les 3 à 30 MHz. Elles sont utilisées pour les besoins des zones océaniques et désertiques, bref dans les espaces où les séparations sont larges (entre 50 et 100 Nm entre aéronefs).

### **Points forts du système HF**

Le HF assure une couverture très large bénéficiant d'une propagation multimodale. La propagation des ondes HF se fait par ondes directes, par ondes de sol, par réflexion sur les couches de l'atmosphère. Ensuite sa technologie est simple avec des équipements bon marché, une maintenance aisée et peu coûteuse. Et enfin le coût d'exploitation modéré car les stations sont implantées sur les mêmes sites que les centres de contrôle.

### **Points faibles du système HF**

Le HF a une mauvaise qualité de liaison à cause du fading. Il a un bruit de fond important même sans trafic, le canal n'est pas protégé par rapport aux autres services qui le partagent. Il a une propagation aux caractéristiques variables ce qui implique de travailler avec des « pool » ou des regroupements de canaux d'où un problème de gestion. La station sol est assez complexe à cause de la gestion de plusieurs fréquences dans une bande large.

### **Le système SELCAL (*SE*lective *CA*lling *S*ystem)**

Ce système a pour objectif d'identifier automatiquement le destinataire du message sol-air, ce qui facilite le travail des équipages. Sa technique est de transmettre un entête codé au message vocal ainsi, chaque aéronef a une adresse affectée, le code est transmis en MSK et le silencieux bord est activé sur décodage de l'adresse aéronef.

### **ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES GENERALES DU DS 900 [12]**

Impédance des entrées et sorties BF : 600  $\Omega$  symétriques

Niveau d'entrée des voies BF : 0 dBm/600  $\Omega$

Bande passante à 3 dB : > 300 – 3000 Hz

Distorsion harmonique :  $\leq 5 \%$

Gain du dispositif : 0 dB

Temps de réponse : < 30 ms (entre 10 et 90 %)

Alimentation : 24 Vcc typique (entre 21 et 31 V)

Rapport signal/bruit : > 50 dB

Caractéristiques générales de la carte CCTP12126 :

Impédance des entrées et sorties BF : 600  $\Omega$  symétriques

Niveau d'entrée des voies BF : 0 dBm/600  $\Omega$

Bande passante à 3 dB : > 300 – 3000 Hz

Distorsion harmonique :  $\leq 1 \%$

Gain du dispositif : 0 dB

Programmation du retard : par roues codeuses

Alimentation : 24 Vcc typique (entre 21 et 31 V)

Rapport signal/bruit : > 55 dB

Possibilité de rebouclage émission/réception

## ANNEXE 4 : L'INMARSAT (INTERNATIONAL MARITIME SATELLITE) [18]

### Aperçu général

Les satellites INMARSAT se trouvent sur une orbite géostationnaire à une altitude moyenne de 35 800 km dans l'espace. Chacun des quatre satellites couvre le tiers de la surface terrestre. Il est stratégiquement positionné au-dessus de l'une des quatre régions océaniques pour former « une maille à dimension planétaire dans le ciel » d'une façon continue.

L'architecture du système repose sur les événements suivants :

- Un réseau de sol de 14 GES (Ground Earth Station),
- Quatre satellites géostationnaires AOR-E (15,5° E), AOR-O (54° W), POR (178° E) et IOR (64,5° E),
- Les terminaux AES (*Airborne Earth Station*) embarqués à bord des aéronefs.

### Canal P

Il utilise le mode paquet, accès par TDM utilisé dans le sens montant (GES vers AES). Ce canal est transmis en permanence à partir du GES.

Le canal P est utilisé pour envoyer des informations du GES vers l'AES. Ces informations peuvent être :

- Des données envoyées par une application aéronautique vers l'AES
- Des acquittements pour confirmer la réception correcte de données envoyées par l'AES vers le GES sur un canal R ou T
- Des demandes de retransmission ou encore des informations générales de signalisation

Les débits possibles pour le canal P sont : 600, 1200, 2400, 4800, 10500 bits/s.

### Canal R

Il utilise le mode paquet, accès aléatoire (Slotted ALOHA) qui est un protocole dans lequel le temps est divisé en slots et un terminal doit attendre le début d'un slot pour commencer à transmettre une rafale. Le canal R est utilisé pour le sens descendant (AES vers GES).

Le canal R est disponible pour des messages courts (jusqu'à 264 bits). L'avantage de ce canal est sa simplicité et le fait qu'il ne demande pas d'être requis ni alloué avant son utilisation. De plus, puisqu'il utilise une méthode d'accès aléatoire (Slotted ALOHA), son rendement est faible : théoriquement 37% de la capacité totale.

*Exemple :* une application demandant que beaucoup d'aéronefs envoient des messages courts d'une façon aléatoire mais très fréquemment (toutes les 5 secondes par exemple) ne peut pas utiliser le canal R puisque de fréquentes collisions se produisent ce qui se traduit par l'augmentation du temps de transmission de façon inacceptable.

Les débits possibles pour le canal R sont : 600, 1200, 2400 et 10500 bits/s.

#### *Canal T*

Il utilise le mode paquet, accès par TDMA avec réservation, qui est utilisé dans le sens descendant pour transporter les données utilisateurs. L'AES transmet des messages uniquement si des slots ont été au préalable demandés à la GES par l'AES et réservés par la GES.

Le canal T est utilisé pour les messages de 264 bits ou plus. L'aéronef sollicite d'abord un slot (TDM) en envoyant un message de demande sur le canal R, (ou sur le canal T si l'AES est déjà en train d'émettre une rafale et qu'il reste de la place pour la demande ou encore si dans les 8 secondes qui viennent, une rafale est allouée à cet AES). Il attend alors une allocation de slot par la GES.

La possibilité de choisir entre plusieurs débits et plusieurs longueurs de rafale offre de la flexibilité pour envoyer des messages de longueurs différentes par ce canal.

Les débits possibles pour le canal T sont : 600, 1200, 2400, 10500 bits/s.

## **ANNEXE 5 : L'ADS-C [8]**

### **Généralités**

L'ADS-C repose sur une idée simple : l'aéronef équipé de façon modern doit pouvoir envoyer automatiquement et régulièrement sa position aux services au sol.

L'ADS est fondée sur le développement des nouvelles techniques principalement en matière de communication sur liaison de données. Des données sont calculées à bord de l'aéronef par une unité spécifique et transcrites dans un format donné de messages ADS.

Le message de position de base ADS comprend des données obligatoires comme le numéro de vol, la latitude et la longitude, l'altitude barométrique, l'heure, la figure de mérite (niveau de précision des équipements de navigation en état de fonctionnement à bord de l'aéronef). D'autres données peuvent être ajoutées au message ADS pour accroître la performance globale du système. Il peut aussi bien s'agir du prochain point de report de position tout comme de données météorologiques. Ces données sont expédiées au centre de contrôle aérien.

### **Le concept ADS**

Le concept général de l'ADS est basé sur le système de communications et de navigation. Pour les communications, il s'agit de l'échange de renseignements téléphoniques, télégraphiques, données entre les aéronefs et le contrôleur de la circulation aérienne. La navigation détermine avec précision la position de l'aéronef.

### **Le déroulement des contrats**

#### ***Etablissement des contrats ADS***

Les contrats de l'ADS sont établis par la station au sol suivant un logon à partir d'un aéronef. Même si l'ADS et le CPDLC sont des applications (demandes) séparées, ils utilisent tous les deux le même logon à partir de l'aéronef pour leurs propres buts.

L'ADS et le CPDLC se diffèrent par le nombre possible des connexions entre un aéronef et diverses stations au sol. Pour le CPDLC, une unité seulement peut communiquer avec un aéronef particulier à un seul instant, et il peut également y avoir une autre connexion CPDLC amis inactive. Pour l'ADS, un aéronef peut avoir des connexions avec un maximum de quatre stations au sol, plus une autre connexion vers le contrôle d'exploitation aérienne.

Les contrats sont établis en dépendant des paramètres des stations terriennes. Quelques systèmes

utilisent des contrats définis hors de la norme, qui permettent seulement au contrôleur d'intercaler le taux de reportage d'un contrat périodique. Les autres systèmes ont été implantés pour permettre au contrôleur de choisir le type et les contenus de contrat à être établi.

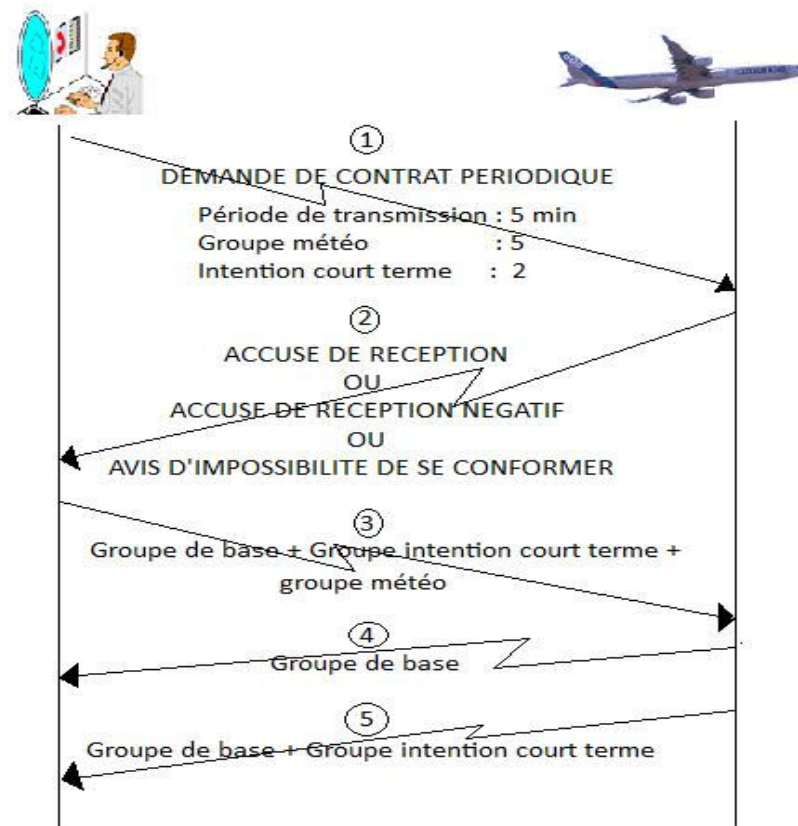


Figure A.5.1 : type de contrat ADS

### ***Le contrat sur évènement***

Le contrat sur évènement spécifie une demande pour une liaison vers l'ADS, pour être assemblé et envoyé lorsque des « évènements » spécifiques se passent. Une multitude de contrats sur l'évènement peuvent être établis entre le système au sol et l'aéronef spécifique. Les contrats sur évènement disponibles dans le système FANS-1/A sont : l'évènement sur le changement vertical du taux, sur la déviation latérale, sur le changement de rangées d'altitude, sur le changement du point de cheminement.

Chacun des contrats sur l'évènement discuté auparavant ne dure que pendant un évènement. Lorsqu'un évènement spécifique se passe, le contrat d'évènement particulier doit être ré initié par le système au sol.

## Les objectifs de l'ADS

Les objectifs fonctionnels de l'ADS sont d'assurer la sécurité accrue des vols, grâce à la possibilité d'assurer la surveillance des aéronefs évoluant hors des zones de couverture des radars (zone désertique – zone océanique) ; une notification opportune et précision améliorée de la position dans les situations d'urgence entraînant le sauvetage le plus rapide ; un complément au radar (basses altitudes, panne radar) ; une détection opportune des erreurs d'insertion des points de cheminement et mesures correctrices associées.

### **Pour les aéronefs équipés**

Après l'établissement du contrat, le système doit pouvoir reconnaître que l'aéronef est entré dans l'espace ADS-ATC :

*Confirmer* que la route prévue de l'aéronef coïncide bien avec ce qui est stocké dans le FDPS : reflète le besoin pour l'aéronef de pouvoir envoyer sa route prévue afin de comparer avec ce qui a été enregistré au sol (point de vue stratégique).

*Vérifier* par le FDPS que l'aéronef respecte bien la clairance ATC entre les points de reports : besoin similaire au précédent mais du point de vue tactique.

*Fournir* au contrôleur *les informations de trafic* les plus à jouer à l'aide des informations ADS : ceci reflète le besoin pour le FPDS de traiter et afficher au contrôleur les informations ADS non ambiguës et au moment opportun.

*Fournir les reports de position automatiques* en respectant le contrat ADS alloué par le système sol : en exprimant le besoin de disposer de contrats dynamiques, qui doivent varier suivant les besoins du FDPS, du contrôleur et des unités ATC adjacentes.

*Transférer automatiquement le contrôle et les communications entre deux espaces ADS-ATC* en utilisant des échanges de données digitaux : ceci reflète le besoin de disposer pour les procédures de transfert de contrôle et de communications de dialogue inter-calculateur ;

*Mettre à disposition une communication par liaison de données* entre le contrôleur et le pilote : ces communications étant essentielles pour assurer un service ADS optimisé dans les zones où il n'existe pas de couverture VHF vocale.

Mettre à disposition des contrôleurs et des pilotes des *communications vocales directes* pour les situations d'urgence et non routinières.

L'aéronef doit avoir la capacité de *reporter automatiquement* au sol tout changement significatif d'attitude : réaffirmation des besoins de l'aéronef de pouvoir envoyer des reports ADS pour tout changement spécifié dans le contrat événement.

L'aéronef doit avoir la capacité à *prévenir tout changement de la précision de sa position* : elle reflète le besoin pour l'aéronef de pouvoir prévenir de tout changement de l'indice de qualité de l'information de navigation

### **Pour les aéronefs non-équipés**

Les aéronefs non équipés doivent introduire leur plan de vol au FDPS. Puis le calculateur fait l'approximation de pistes ADS et l'affiche à l'écran de visualisation. Pour un intervalle de temps donné, le pilote doit envoyer vocalement leur position. Puis le contrôleur vérifie s'il correspond approximativement à la piste d'ADS affiché. Dans le cas contraire, le contrôleur annonce le changement.

### **Les avantages certains**

Le concept ADS est intéressant dans la mesure où il peut apporter un plus en matière d'accroissement de capacité de traitement du trafic et de sécurité de vol. Ces avantages ne seront significatifs que lorsqu'un nombre conséquent d'aéronefs seront équipés et que les systèmes ATC seront en mesure d'assurer un traitement et une présentation efficace de l'information ADS.

L'ADS offre également de nouvelles possibilités de localisation dans le cadre des opérations de recherche en sauvetage. L'avantage le plus significatif que la communauté aéronautique peut attendre de l'ADS, c'est une réduction importante des normes d'espacement, en raison de la connaissance immédiate de la position de l'aéronef par le contrôleur. La possibilité d'une communication sûre et efficace entre l'ATC et l'aéronef permettant un changement rapide du profil de vol le cas échéant n'est pas non plus à négliger.



## **ANNEXE 6 : MISE EN ŒUVRE DU RVSM A MADAGASCAR [7]**

### **Introduction**

Un minimum réduit de séparation verticale (RVSM) désigne une séparation verticale de 1000 ft (300m) entre les aéronefs au-dessus du niveau de vol FL 290. Seuls les aéronefs homologués RVSM seront autorisés à opérer à l'intérieur de l'espace aérien RVSM de la FIR Antananarivo.

Les aéronefs d'Etat (Armée, Police, Douanes) non homologués RVSM peuvent être autorisés à pénétrer dans l'espace aérien RVSM de la FIR Antananarivo, sous réserve d'une coordination préalable avec les centres ATC concernés. Une séparation verticale de 2000 pieds (600m) est appliquée à ces aéronefs non homologués.

Le RVSM a été mis en œuvre dans la FIR Antananarivo conformément aux accords régionaux de l'OACI.

Les exploitants d'aéronefs homologués RVSM devront indiquer le statut homologué en insérant la lettre « W » dans la case 10 du plan de vol, et dans la case « Q » du plan de vol répétitif quel que soit le niveau de vol demandé. Les exploitants d'aéronefs d'Etat non homologués RVSM avec un niveau de vol demandé de FL 290 ou au-dessus devront insérer « STS/NON RVSM » dans la case 18 du plan de vol OACI.

### **Mise en œuvre**

Le RVSM a été mis en œuvre dans la FIR Antananarivo entre les niveaux de vol FL290 and FL 410 inclus, le 25 septembre 2008 à 0001 UTC.

Les exploitants qui n'ont pas été homologués RVSM et/ou dont les aéronefs ne sont pas certifiés RVSM seront exclus de la tranche de niveaux de vols RVSM, étant obligés d'opérer au niveau de vol FL 280 et en-dessous ou au-dessus du niveau de vol FL410.

Lorsqu'une séparation de 2000 pieds est assurée entre aéronefs dans la bande de niveau de vol RVSM, les niveaux de vol RVSM appropriés seront appliqués.

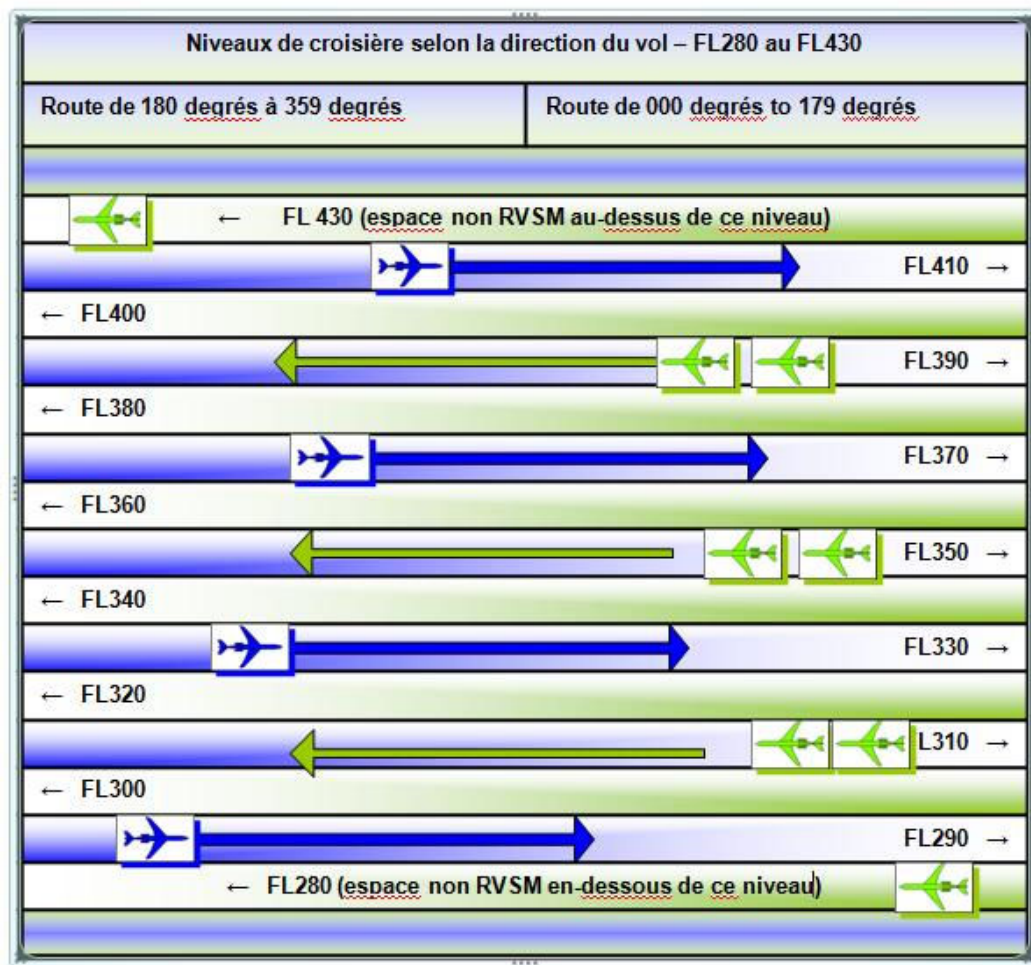


Figure A.6.1 : Niveaux de vol du RVSM

## **ANNEXE 7 : PRESENTATION D'UN SYSTEME DE CENTRE DE CONTROLE EXISTANT : LES CRNA DE FRANCE [3][5][6][23]**

La France a adopté une approche intéressante du contrôle aérien. Pour mieux contrôler la FIR qui leur est attribuée, ils l'ont sectorisé, ce qui leur permet de mieux gérer chaque secteur, de décharger le contrôleur surchargé et d'assurer une meilleure sécurité aux aéronefs.

### **Méthodes et moyens de contrôle du trafic aérien**

L'espace français est divisé en zones appelées FIR dont la responsabilité est confiée à chacun des CRNA. Ces zones sont fragmentées en secteurs de manière à ce que la densité des aéronefs qui y circulent se situe dans les limites acceptables, compte tenu des méthodes de travail et des moyens disponibles pour le contrôle. Un secteur est affecté à une position de contrôle, équipée :

- d'une fréquence radio VHF,
- d'une platine de téléphone dit de sécurité,
- d'une sortie de "strips" (bande de papier contenant des informations du plan de vol),
- d'un digitatron permettant le dialogue avec le système informatique,
- d'un écran de visualisation des informations radar.

Une position de contrôle accueille de un à trois contrôleurs disposant des informations suivantes :

- l'information PLN : l'information nécessaire au secteur et extraite du PLNM (est présentée sur le "strip").
- les informations sur le déroulement et l'état de vol : reports de position et d'altitude, informations radar, listes des aéronefs gérés par la position. Le contrôleur consigne ces informations sur le strip et met à jour les données dans le système par l'intermédiaire du digitatron.
- les informations de coordination : lors d'un vol, un aéronef passe d'un secteur de contrôle à un autre et se trouve donc sous la responsabilité successive de différents contrôleurs. Les informations de coordination sont les renseignements nécessaires à ce passage de responsabilité d'un vol entre contrôleur de différents secteurs.

### **Rôles des CRNA**

L'espace aérien français est divisé en cinq régions d'informations de vol (FIR). Le trafic de chacune d'entre elles est contrôlé dans un CRNA.

Un CRNA contrôle les aéronefs volant dans l'espace qui lui est associé. Il contrôle les aéronefs qui sont "en route" c'est-à-dire qui ne sont pas en phase de décollage ou d'atterrissage. Les CRNA sont au nombre de 5 en France :

- CRNA Nord : Athis-Mons (situé près d'Orly)
- CRNA Est : Reims
- CRNA Ouest : Loperhet (situé près de Brest)
- CRNA Sud-Est : Aix-en-Provence
- CRNA Sud-Ouest : Bordeaux

La figure ci-dessous représente la délimitation des différentes CRNA de France et l'interconnexion de ces centres avec toutes les stations radars.

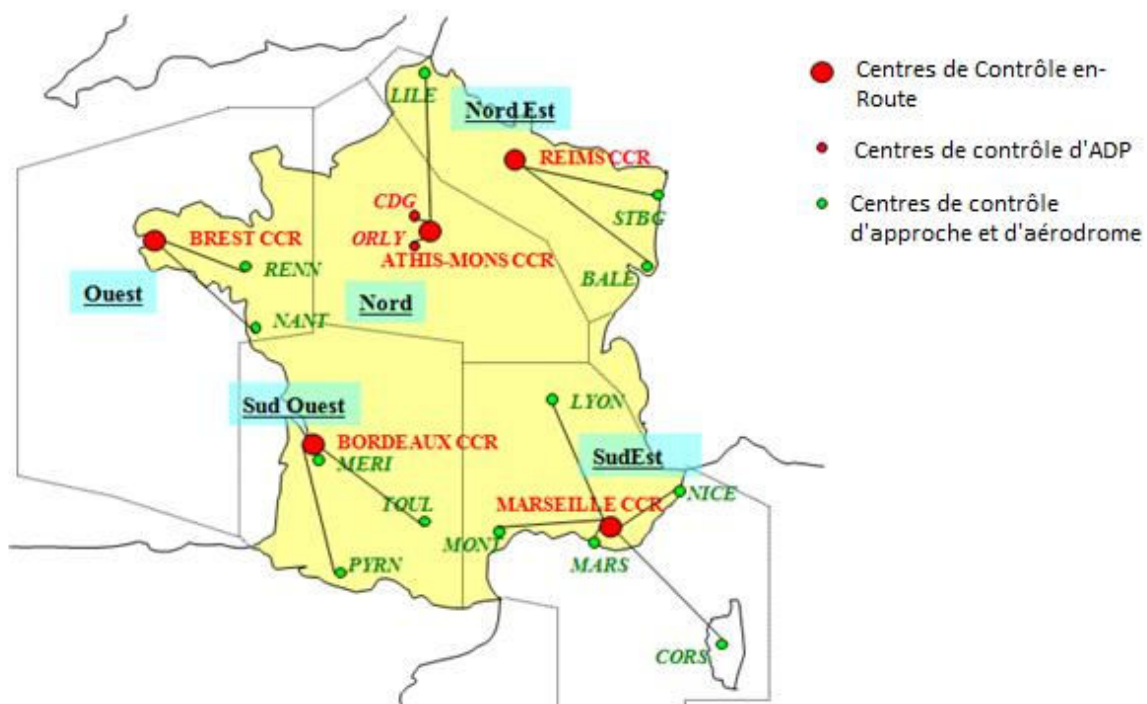


Figure A.7.1 : Limites des 5 CRNA de France

Aidé par des moyens techniques performants, les SNA (*Services de la Navigation Aérienne*) gèrent le trafic dans le cadre des espaces aériens qui leur sont dévolus et dans le respect de procédures, règles et trajectoires strictes. Pour comprendre qui fait quoi en matière de contrôle aérien, nous vous proposons de suivre un vol Paris-Toulouse. Localement, la responsabilité du contrôle aérien revient au Service de la Navigation Aérienne Sud (SNA Sud).

C'est une véritable chaîne de contrôle qui prend les aéronefs en charge. Trois équipes,

correspondant à chaque phase du vol, se relaient pour que la sécurité rime avec la fluidité : la tour de contrôle qui en est le maillon le plus visible, le contrôle d'approche et le contrôle en route. Résultat d'une organisation complexe et intégrée, le contrôle aérien fait appel à un savoir-faire approfondi et à l'usage de moyens techniques performants.

Avant le départ, les compagnies aériennes déposent obligatoirement un plan de vol auprès d'Eurocontrol, l'organisme européen de régulation de la circulation aérienne. Dans la pratique, le plan de vol est déposé au début de chaque saison (hiver, été) et actualisé régulièrement. Eurocontrol diffuse cette information aux centres de contrôle concernés et attribue les créneaux horaires de décollage en fonction du trafic.

## **Le CAUTRA**

En France, les services de surveillance de l'espace aérien et le service de traitement des plans de vol ainsi que l'aide au contrôle sont rendus par le CAUTRA (système de Coordination AUtomatique du TRafic Aérien). Le CAUTRA comprend plusieurs sous-systèmes qui implémentent tout ou une partie des services d'assistance au contrôleur aérien, parmi lesquels on peut remarquer :

- le système de traitement des plans de vol
- le système de traitement radar
- le système de visualisation ODS (*Operational Display System*)

### *Les contrôleurs en CRNA*

L'ODS est dédiés à la visualisation du trafic et à la gestion des interactions entre contrôleurs et système CAUTRA, deux contrôleurs y travaillent :

- Un contrôleur radariste, qui dialogue avec les aéronefs. Ses outils principaux sont l'écran 28 pouces, la chaîne radio, le strip papier, le casque et le micro. Une clearance est une instruction donnée par le contrôleur radariste. Cette clearance peut-être transmise par voie vocale ou par voie numérique aux pilotes.
- Un contrôleur organique : il prépare le travail de son collègue et joue le rôle d'interface avec les secteurs ou centres voisins. Son outil principal est le téléphone (lignes directes avec les secteurs ou centres voisins) appelé aussi ATS/DS. Il s'occupe aussi des planifications stratégiques c'est-à-dire de la gestion des conflits de leur secteur.

## **ANNEXE 8 : RADIOBALISE NDB [24]**

Une radiobalise omnidirectionnelle NDB (*Non Directional Beacon*) est une aide des plus essentielles utilisée pour la navigation ; son principe repose sur un émetteur moyenne fréquence à couverture omnidirectionnelle dans une zone précise établie. L'aviation, équipée de boussoles radio (aussi connue sous le nom de système de recherche automatique de direction ou ADF pour *Automatic Direction Finding*) peut utiliser un dispositif NDB pour fournir une position au site émetteur, tout en respectant l'orientation aérienne. Le NDB peut donc être employé en tant que système d'aide lors de phase d'approche ou d'atterrissage, ou bien encore pour obtenir l'approximation d'un point fixe à partir du point d'intersection de deux sources convenablement choisies. Un NDB peut-être co-localisé avec le dispositif de mesurage des distances DME (*Distance Measurement Equipment*) pour fournir la distance au site émetteur ou la position ; le système ainsi combiné est alors appelé balise de repérage (*Locator Beacon*).

### **Caractéristiques électriques**

*Gamme de fréquence* : 190 à 1725 MHz.

*Stabilité en fréquence* : la fréquence est générée à partir d'un quartz qui procure au système un taux de stabilité inférieure à 0,01% ; elle peut-être réglée par l'utilisateur par paliers de 500Hz sur toute la plage (pour une température extérieure comprise entre -20°C et +40°C).

*Puissance de sortie* : puissance ajustable de 0 à 100W maximum.

*Type d'émission* : porteuse modulée en amplitude pour le NON/A2A ; si NON/A1A, modulation de porteuse ; si A3E, porteuse modulée en amplitude par un signal audio.

*Modulation* : en modulation par générateur de tons 400Hz (ou 1020Hz en option) ou de porteuse, le code morse international, quelque soit sa combinaison de lettres ou de chiffres a une durée maximale de 10 secondes. Le code est répété 6 fois par minute. La profondeur de modulation est ajustable de 0 à 100%.

*Code d'identification* : le code morse international est transmis à la vitesse d'environ sept mots par minute. Six codes d'identification utilisateur sont contenus dans une EPROM. L'identification est répétée six fois par minute avec une durée d'identification de 10 secondes.

*Bande passante* : sa valeur est de 800Hz pour une modulation à 400HZ et de 2040Hz pour une modulation à 1020Hz. La bande passante de la porteuse vaut 1kHz à -40dB.

## ANNEXE 9 : CODE SOURCE

### plot1.m

```
%chargement des resultats
load('Puiss');
load('Ray');
load('freq');
lambda=0:0.5:10
Pr=((lambda.^2)*Puiss)./(4*pi*Ray)^2;
figure(02)
axes1=plot(lambda, Pr)
axes1=gca
xlabel('longueur d"onde lambda')
ylabel('puissance de réception Pr')
```

### calculer.m

```
%données à saisir
%puissance d'émission en W
o1=findobj(gcf,'tag','pe');
Puiss=str2num(get(o1,'string'));
%rayon de couverture en km
o2=findobj(gcf,'tag','rayon');
Ray=str2num(get(o2,'string'));
%fréquence d'émission en Hz
o3=findobj(gcf,'tag','frequence');
freq=str2num(get(o3,'string'));
%calcul
%densité surfacique de puissance W/m²
S=4*pi*(Ray^2);
Dsp=Puiss/S
%surface équivalente d'antenne m²
lambda=(3*10^8)/freq;
Seq=(lambda^2)/(4*pi)
```

```

%puissance de réception en W
pr=Dsp*Seq
%atténuation en dB
gain=10*log(pr/Puiss)
%résultat à afficher
o4=findobj(gcf,'tag','dsp');
set(o4,'string',num2str(Dsp))
o5=findobj(gcf,'tag','seq');
set(o5,'string',num2str(Seq))
o6=findobj(gcf,'tag','pr');
set(o6,'string',num2str(pr))
o7=findobj(gcf,'tag','gain');
set(o7,'string',num2str(gain))
save('Puiss');
save('Ray');
save('freq');

```

#### **calculer1.m**

```

o1=findobj(gcf,'tag','pe');
o2=findobj(gcf,'tag','rayon');
o3=findobj(gcf,'tag','frequence');
o8=findobj(gcf,'tag','ae');
o9=findobj(gcf,'tag','ar');

o4=findobj(gcf,'tag','dsp');
o5=findobj(gcf,'tag','sr');
o6=findobj(gcf,'tag','pr');
o7=findobj(gcf,'tag','gain');

Pe=str2num(get(o1,'string'));
Ray=str2num(get(o2,'string'));
freq=str2num(get(o3,'string'));
Ae=str2num(get(o8,'string'));

```



```

Ar=str2num(get(o9,'string'));
lambda=(3*10^8)/freq;
Sr=(Ar*lambda^2)/(4*pi)
S=4*pi*(Ray^2);
Dsp=Ae*Pe/S
pr=Dsp*Sr
gain=10*log(pr/Pe)
set(o4,'string',num2str(Dsp))
set(o5,'string',num2str(Sr))
set(o6,'string',num2str(pr))
set(o7,'string',num2str(gain))

```

### **simul.m**

```

function trajectoire_Callback(hObject, eventdata, handles)
lat=handles.metricdata.lat;
syms x %conventionnellement déclaration de la variable
%ystème d'axe orthonormée en x et y selon la latitude géographique du déplacement
if(lat<=13.5)
    x = 2.2:0.1:6;
    y = -0.91*x + 9.9;
    Xg=lat*3.9/13.5;
    Yg=-0.91*(lat*3.9/13.5) + 9.9;
else
    if((13.5<lat)&(lat<=16.6))
        x=1.9:0.1:3.9;
        y=0.66*x;
        Xg=lat*1.9/16.6;
        Yg=0.66*(lat*1.9/16.6) ;
    else
        if((16.6<=lat)&(lat<18.9))
            x=0:0.1:1.9;
            y=0.66*x;
            Xg=lat*1.9/16.6;

```

```

Yg=0.66*(lat*1.9/16.6) ;
else
    if((18.9<=lat)&(lat<21.5))
        x=-7.4:0.1:0;
        y=0.46*x;
        Xg=-lat*7.4/21.5;
        Yg=0.46*(-lat*7.4/21.5);
    else
        if((21.5<=lat)&(lat<22.2))
            x=-9.1:0.1:-7.4;
            y=0.46*x;
            Xg=-lat*7.4/21.5;
            Yg=0.46*(-lat*7.4/21.5);
        else
            if ((22.2<=lat)&(lat<23.5))
                x=-9.1:0.1:-5;
                y=-0.4*x - 7.8;
                Xg=-lat*9.1/22.2;
                Yg=-0.4*(-lat*9.1/22.2) - 7.8;
            else fprintf(' rejustifier votre latitude !'),pause, exit,
        end
    end
end
end
end
end
title('Trajet suivi par l"avion ')
axes(handles.axes1);
plot(x, y, '--b'),hold on
plot(Xg, Yg, 'pr'),hold on
function frequence_Callback(hObject, eventdata, handles)
lat=handles.metricdata.lat;

```

```

%signal correspondant
if(lat<=16.32)
    u = -0.1:0.001:0.1;
    axes(handles.axes2);
    cla;
    plot(u,sin(2*pi*125*10^6*u),'c'), grid on, hold off
    title('Signal et fréquence communication');
    text(0.06,0.000000015,'freq = 125MHz'),
end
if ((16.32<lat)&(lat<21.34))
    u = -0.1:0.001:0.1;
    axes(handles.axes2);
    cla;
    plot(u,sin(2*pi*126*10^6*u),'c'), grid on, hold off
    title('Signal et fréquence communication');
    text(0.06,0.0000000079,'freq = 126MHz'),
end
if(lat>=21.34)
    u = -0.1:0.001:0.1;
    axes(handles.axes2);
    cla;
    plot(u,sin(2*pi*127*10^6*u),'c'), grid on, hold off
    title('Signal et fréquence communication');
    text(0.06,0.000000015,'freq = 127MHz'),
end

```

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Tran Dac, *Sectorisation contrainte de l'espace aérien*, Ecole Doctorale de l'Université de Technologie de Compiègne
- [2] D. Delahaye, *Optimisation de la sectorisation de l'espace aérien par algorithmes génétiques*, PhD thesis, ENSAE, Juillet 1995
- [3] B. Gouvine, *Le système CAUTRA : architectures physiques*, Mastère EAGTA module 09 – janvier 2007
- [4] Lebondza/Andrianierenana, *Mise en œuvre d'une couverture optimale de l'espace aérien ASECNA*, EAMAC, A.U.2006
- [5] *Module contrôle en-route : traitement radar et STCA*, ENAC Département CA-Toulouse, janvier 2007
- [6] *Stage ODS : architecture matérielle*, novembre 2006
- [7] Note de la 13<sup>ème</sup> réunion du groupe régional de planification et de mise en œuvre pour la région AFI, Cap Vert, 25-29 juin 2001
- [8] A. Rasamimanana, *Etude du système ADS-C*, Dép.Tél.-E.S.P.A. , A.U. : 2000-2001
- [9] Groupe Sofréavia, Centre d'étude de la navigation aérienne, *ACAS et Contrôle du trafic aérien*, Mai 2007.
- [10] L. Deneufchâtel, *Les communications vocales*, DSNA Direction de la Technique et de l'innovation.
- [11] L. Deneufchâtel, *Les systèmes de communications de données en VHF*, DSNA Direction de la Technique et de l'innovation.
- [12] Cours TELERAD, Dispositif de sélection DS900
- [13] User's Manual: integration router with EasyRouter Technology, june 1995
- [14] ALCATEL, Documentation système, Réseaux FASTCOM de télécommunication par satellite
- [15] Manuel d'utilisation Poste d'exploitation (PEX) du réseau FASTCOM 2G, mars 1999
- [16] Technical Data Sheet: GPLBIIA, RFS France

- [17] General Data of Antenna system: EKR2
- [18] J. Razakarivony, *Télécommunications spatiales*, Cours I5-TCO, Dép. Tél.-E.S.P.A. , A.U. : 2007-2008
- [19] C. Ratsihoarana, *Propagation libre et guidée et faisceaux hertziens*, Cours I4-TCO, Dép. Tél.-E.S.P.A., A.U. : 2006-2007
- [20] Annexe 10 à la Convention de l'OACI, vol III, 5<sup>ème</sup> édition 2001
- [21] L. E. Randriarijaona, *Réseaux haut débit*, Cours I5-TCO, Dép. Tél.-E.S.P.A., A.U. : 2007-2008
- [22] 2ème et 6ème engagement, Madagascar Action Plan
- [23] Cinq sur cinq, Lettre trimestrielle aux riverains de l'aéroport Toulouse-Blagnac, n°13 septembre 2006, Chambre de commerce et d'Industrie de Toulouse
- [24] Manuel Technique \_ Balise Omnidirectionnelle – 2060A/B/M
- [25] <http://www.ais-asecna.org>
- [26] <http://www.wikipedia.org>
- [27] <http://www.ads-b.com>
- [28] <http://www.cena.fr>
- [29] <http://www.dsna-dti.aviation-civile.gouv.fr>
- [30] <http://www.mathworks.com>

## **FICHE DE RENSEIGNEMENTS**

**Auteur:** ANDRIANANDRASANA Hélène Espérance

**Adresse:** lot II P 114 C Soavinandriana-Antananarivo 101

**Telephone:** +261 33 14 852 02, +261 32 56 828 46

**E-mail :** helene.andrianandrasana@hotmail.fr

**Titre du mémoire :** ETUDE DE L'AMELIORATION DE L'INFRASTRUCTURE  
DU CONTROLE AERIEN A MADAGASCAR

**Nombres de pages :** 90

**Nombres de tableaux :** 9

**Nombre de figures :** 45

**Mots clés :** CRNA, contrôle aérien, gestion du trafic aérien, sectorisation, CPDLC

**Directeurs de mémoire :** Mme RABEHERIMANANA Lyliane

M. RAKOTOARIMANANA Nirison

## **RESUME**

Le contrôle de la navigation aérienne est menacé par une saturation prochaine des fréquences radio utilisées pour la communication entre les pilotes et les contrôleurs. De plus une surcharge du contrôleur ne doit pas créer de négligence de sa part. Nous présentons ainsi dans ce livre une amélioration de la sécurité des usagers de l'espace aérien malgache, en allégeant les contraintes de travail du pilote et du contrôleur. Nous proposons une sectorisation en trois parties de l'espace aérien concerné : le secteur Nord, le secteur Central et le secteur Sud. Nous avons étudié le meilleur emplacement de site dans chaque secteur pour nos émetteurs VHF et attribué des fréquences uniques pour chaque secteur. L'utilisation de liaisons de données pour la transmission des paramètres de vol des aéronefs est recommandée, permettant ainsi un échange facilitant les négociations et s'inscrivant comme un complément à la radiotéléphonie dont elle doit diminuer l'encombrement des fréquences.

## **ABSTRACT**

The control of the aviation is threatened by the next saturation of the radio frequencies used for the communication between the pilots and the controllers. Moreover, an overload for the controller does not have to create his carelessness. We present in this book an improvement for the Malagasy air space users' safety by relieving the pilot and the controller working constraints. A division into sectors has been established and three parts are concerning the air space: the Northern sector, the Central sector and the Southern sector. We studied the best site for our VHF transmitters in each sector and attributed unique frequencies to each sector. The use of the flight parameters transmission of aircrafts is recommended, allowing an exchange and facilitating the negotiations and being registered as a complement to the radiotelephony of which the dimensions of the frequencies have to be decreased.