

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 : Systèmes de Traitement de l'Information (S.T.I.)

Par : **HARIMANANA Nantenaina Livaso**

GESTION DES AERONEFS DANS UNE ZONE DEFINIE

Soutenu le mercredi 07 janvier 2009 devant la Commission d'Examen composée de :

Président :

M. RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste

Examineurs :

M. RAZAKARIVONY Jules

M. RADONAMANDIMBY Edmond

M. RANDRIARIJAONA Lucien Elino

Co-Directeurs de mémoire :

M. RASAMOELINA Jacques Nirina

M. RAZAFY Petera

REMERCIEMENTS

Je rends grâce au bon Dieu de m'avoir donné la force et la santé durant mes études au sein de l'ESPA et surtout pendant la réalisation de ce mémoire. Je tiens également à adresser mes vifs remerciements aux personnes suivantes sans qui ce travail n'aurait pas pu être réalisé:

- Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui est le premier responsable de ma formation au sein de l'école.

- Monsieur RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste, Professeur et Chef de département de la filière Télécommunication, qui n'a cessé de fournir beaucoup d'efforts, afin de nous donner la meilleure formation dans notre filière, et aussi en tant que président du jury.

- Monsieur RASAMOELINA Jacques Nirina, Assistant d'Enseignement et de Recherche et co-Directeur de ce mémoire, pour ses aides, ses conseils et son dévouement durant l'élaboration de ce mémoire malgré son emploi du temps chargé.

- Monsieur RAZAFY Petera, Chef de bureau Réseaux et Systèmes Informatiques au sein de l'ASECNA Madagascar et co-Directeur de ce mémoire, qui a bien voulu m'accepter sous son encadrement malgré la responsabilité et les diverses occupations qu'il occupe au sein de son travail.

Tous les membres de la commission d'examen qui ont voulu examiner ce mémoire et honorer la soutenance de leur présence, à savoir :

- Monsieur RAZAKARIVONY Jules, Maître de Conférences au sein du département.

- Monsieur RANDRIARIJAONA Lucien Elino, Maître de Conférences au sein du département.

- Monsieur RADONAMANDIMBY Edmond, Assistant d'Enseignement et de recherche au sein du département.

Je remercie également, tous les personnels enseignants du Département Télécommunication et tous les corps professoraux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, sans qui notre formation ne serait pas arrivée au bout. Et enfin, je remercie mes parents pour leurs sacrifices durant toutes ses longues années, afin de me permettre d'avoir de bonnes études, toute ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans toutes les circonstances, tous mes amis et tous les étudiants de ma promotion. Et surtout vous honorable assistance qui êtes venu ce jour, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIERES.....	ii
NOTATIONS.....	vii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	viii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : L'AVION DANS SON ENVIRONNEMENT.....	2
1.1. Historique de l'avion	2
1.2. L'avion	2
<i>1.2.1. Définition.....</i>	<i>2</i>
<i>1.2.2. Caractéristiques.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.3. Classification.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.4. Fonctionnement</i>	<i>3</i>
1.3. La navigation aérienne.....	4
<i>1.3.1. Définition.....</i>	<i>4</i>
<i>1.3.2. Les différents types.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.3. La navigation à vue ou VFR.....</i>	<i>5</i>
1.3.3.1. Le cheminement	5
1.3.3.2. La navigation à l'estime.....	6
1.3.3.3. La navigation par erreur systématique.....	6
<i>1.3.4. La navigation aux instruments ou IFR.....</i>	<i>6</i>
<i>1.3.5. La navigation astronomique</i>	<i>7</i>
<i>1.3.6. La navigation inertielle</i>	<i>7</i>
<i>1.3.7. La navigation satellitaire.....</i>	<i>7</i>
1.4. Règles de mesure dans l'aviation.....	8
<i>1.4.1. Généralités.....</i>	<i>8</i>
<i>1.4.2. Les unités.....</i>	<i>8</i>
1.5. Outils de base nécessaire à l'aviation.....	9
1.6. Conclusion.....	9
CHAPITRE 2 : LE CONTROLE DU TRAFIC AERIEN.....	10
2.1. Introduction.....	10
2.2. Les différentes entités de la circulation aérienne.....	10
2.2.1. La tour de contrôle (TWR).....	10
2.2.1.1. Définition et objectifs.....	10
2.2.1.2. Mode de fonctionnement	11

2.2.1.3. Domaines de responsabilités	11
2.2.2. <i>Le centre de contrôle d'approche (APP)</i>	12
2.2.2.1. Définitions et objectifs	12
2.2.2.2. Modes de fonctionnement.....	13
2.2.3. <i>Le Centre de contrôle en route CRNA ou ACC</i>	13
2.2.3.1. Définitions et objectifs	13
2.2.3.2. Modes de fonctionnement.....	14
2.2.4. <i>Le contrôleur aérien</i>	15
2.3. L'espace aérien	15
2.3.1. <i>Découpage de l'espace aérien</i>	15
2.3.2. <i>Zone contrôlés ou non contrôlés</i>	17
2.3.3. <i>Classe de l'espace aérien</i>	17
2.3.3.1. Classe d'espace contrôlé	17
2.3.3.2. Classe d'espace non contrôlé.....	18
2.3.4. <i>Zone particulière</i>	19
2.4. La communication entre contrôleur et pilote.....	20
2.4.1. <i>La radiotéléphonie</i>	20
2.4.1.1. La phraséologie	20
2.4.1.2. Le service d'information	22
2.4.2. <i>Le strip</i>	22
2.4.2.1. Définitions.....	22
2.4.2.2. Les strips électroniques	23
2.4.3. <i>La liaison de données ou Data Link</i>	23
2.5. Conclusion.....	23
CHAPITRE 3 : LA SURVEILLANCE AUTOMATIQUE DU TRAFIC AERIEN.....	24
3.1. Introduction.....	24
3.2. Le partage de l'information dans le contrôle aérien il y a quelques années.....	24
3.2.1. <i>Contexte</i>	24
3.2.2. <i>Problématique</i>	25
3.2.3. <i>La solution proposée</i>	26
3.3. Le partage de l'information dans le contrôle aérien de nos jours.....	26
3.3.1. <i>Utilisation du système de surveillance radar</i>	27
3.3.2. <i>Le radar primaire</i>	28
3.3.2.1. Définition	28
3.3.2.2. Fonctionnement.....	29
3.3.2.3. Caractéristiques	29
3.3.3. <i>Le radar secondaire</i>	30

3.3.3.1. Définitions.....	30
3.3.3.2. Fonctionnement.....	30
3.3.3.3. Les modes.....	31
3.3.3.4. Caractéristiques techniques	31
3.4. Le système ADS/CPDLC.....	32
3.4.1. <i>Le système ADS</i>	32
3.4.1.1. L'ADS-C	34
3.4.1.2. L'ADS-B	34
3.4.2. <i>Messages ADS</i>	36
3.4.3. <i>Les informations données par l'ADS</i>	36
3.4.3.1. La position tridimensionnelle.....	36
3.4.3.2. La vitesse.....	36
3.4.3.3. Données de trajectoire	36
3.4.3.4. Données météorologiques	36
3.4.3.5. Données élémentaires.....	36
3.4.4. <i>Les contrats ADS</i>	36
3.4.5. <i>Les messages d'alerte de l'ADS</i>	37
3.4.5.1. Alertes	37
3.4.5.2. Les filets de sécurité	37
3.4.6. <i>Le système CPDLC</i>	38
3.4.6.1. Les messages CPDLC	39
3.4.6.2. Les fenêtres de messages.....	39
3.4.7. <i>Le système ADS/CPDLC spécifique pour Madagascar SAMAD</i>	40
3.4.7.1. Définition	40
3.4.7.2. Système de visualisation	40
3.4.8. <i>Système de Traitement de données de vol (Flight Plan Data Processing System - FDPS)</i>	41
3.4.9. <i>Fonctionnalités ADS</i>	41
3.4.10. <i>Fonctionnalités CPDLC</i>	41
3.4.11. <i>Moyens d'alerte</i>	41
3.4.12. <i>Autres fonctionnalités</i>	42
3.4.12.1. Système d'Enregistrement et Rejeu	42
3.4.12.2. Supervision	42
3.4.12.3. Simulateur	42
3.4.13. <i>Avantage du système SAMAD</i>	43
3.4.13.1. Bénéfices Techniques	43
3.4.13.2. Bénéfices Opérationnels	43
3.4.14. <i>Caractéristiques du système</i>	43
3.5. Les systèmes de communications de données en VHF.....	44
3.5.1. <i>Le réseau ACARS</i>	45

3.5.1.1. Caractéristiques techniques	45
3.5.1.2. Evolution du réseau ACARS.....	46
3.5.2. <i>La VDL mode 2 ou sous réseau VHF</i>	46
3.5.2.1. Caractéristiques techniques	48
3.5.2.2. Comparaison ACARS et VDL	48
3.5.2.3. Evolution futur du système VDL.....	49
3.6. Conclusion.....	49
CHAPITRE 4 : LA GESTION DU TRAFIC ET CAS DE CONFLIT.....	50
4.1. Introduction.....	50
4.2. Le plan de vol.....	50
4.2.1. <i>La préparation du vol</i>	51
4.2.2. <i>Dépôt de plan de vol</i>	51
4.2.3. <i>Formulaire du plan de vol</i>	52
4.3. La communication.....	53
4.3.1. <i>Les types de communications vocales</i>	53
4.3.1.1. Les communications AOC.....	53
4.3.1.2. Les communications AAC	53
4.3.1.3. Les communications APC	53
4.3.1.4. Les communications ATS.....	53
4.3.1.5. Les communications ATC	54
4.3.1.6. Les besoins opérationnels	54
4.3.2. <i>Les bandes de communication aéronautique</i>	54
4.3.2.1. La communication HF	55
4.3.2.2. La communication VHF	56
4.3.2.3. La communication HF	57
4.3.2.4. La communication par satellite	57
4.4. Quelques définitions importantes.....	58
4.4.1. <i>La clairance</i>	58
4.4.2. <i>L'espacement</i>	59
4.5. Les conflits dans le trafic aérien.....	59
4.5.1. <i>Normes de séparation</i>	59
4.5.2. <i>Conflits et clusters</i>	60
4.5.3. <i>Détection des conflits</i>	61
4.5.3.1. Cadre mathématique	61
4.5.3.2. Distance de risque de conflits.....	63
4.5.4. <i>Méthodes de résolution des conflits</i>	64
4.5.4.1. Les manœuvres.....	64

4.5.5. <i>Le système TCAS</i>	65
4.5.5.1. <i>Fonctionnement</i>	66
4.5.5.2. <i>Caractéristiques techniques</i>	66
4.5.5.3. <i>Remarques</i>	67
4.6. Les messages de détresse aéronautique	67
4.6.1. <i>Les messages d'urgence</i>	67
4.6.2. <i>Les messages de détresse</i>	68
4.7. Conclusion	69
CHAPITRE 5 : SIMULATION DU TRAFIC AERIEN ET CAS DE CONFLIT SOUS C++	70
5.1. But de la simulation	70
5.2. Fonctionnement	71
5.2.1. <i>Fiche de contrôle principale</i>	71
5.2.1.1. <i>Gestion de la cartographie</i>	71
5.2.1.2. <i>Gestion des avions</i>	72
5.2.1.3. <i>Simulation</i>	72
5.2.1.4. <i>Couleur des avions et des villes</i>	75
5.2.2. <i>Cas de collision</i>	75
CONCLUSION	77
ANNEXES	78
<i>ANNEXE 1 : LES INFRASTRUCTURES D'AIDES A LA NAVIGATION</i>	79
<i>ANNEXE 2 : CODE SOURCE DE LA PROGRAMMATION SOUS C++</i>	83
BIBLIOGRAPHIE	92
FICHE DE RENSEIGNEMENTS	96

NOTATIONS

\vec{v}_1	: Vitesse de l'aéronef 1
\vec{v}_2	: Vitesse de l'aéronef 2
dT	: Durée de temps de trajet
ft	: feet
t	: Temps
t_o	: Temps de dérivation de trajectoire
h	: hauteur de l'antenne (transpondeur) au sol
A	: Distance entre l'avion et le sol
D	: Séparation Standard
D_{ao}	: Distance verticale entre l'aéronef A et l'aéronef B
D_o	: Distance entre l'avion et la station au sol
D_{th}	: Distance entre l'aéronef B et la partie supérieure de l'aéronef A
D_{to}	: Distance entre aéronef A et aéronef B
In Hg	: pouce de mercure
Kt	: nœuds
l_1	: Distance entre l'aéronef 2 et le point de collision
l_2	: Distance entre l'aéronef 1 et le point de collision
N	: Narrow
NM	: Nautique Mile
R	: Distance entre le Radar et la cible
Tr	: Durée total du trajet allé et retour
V	: Vitesse de propagation
V_{ref}	: Signal de référence
V_{var}	: Signal Variable
τ	: Durée d'une impulsion
α	: Angle entre les trajectoires des deux aéronefs

LISTE DES ABREVIATIONS

AAC	: Airline Administrative Communication
ACARS	: Aircraft Communication Addressing and Reporting System
ACC	: Centre de Contrôle en Route
ADS	: Automatic Dependant Surveillance
ADS/B	: Automatic Dependant Surveillance Broadcast
ADS/C	: Automatic Dependant Surveillance Contract
AFN	: Afrique Francaise du Nord
AGL	: Above Ground Level
AMSL	: Above Median See Level
AMSS	: amplitude Modulation Signaling system
AOC	: Airline Administrative Control
APC	: Aircraft Passenger Communication
APP	: Centre de contrôle d'approche
APR	: Automatic Point Report
ARCW	: ADS Report Conformance Warning Checking
ARFA	: Agence de gestion de frequencis
ARINC	: Aeronautical Radio Inc
ASECNA	: Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
ASFC	: Above Surface
ASP	: Aircom Service Processor
ATC	: Air traffic Control
ATM	: Air Traffic Management
ATN	: Atlantic transnational network
ATS	: Automatic Terminal Service
AWY	: Airway
BDP	: Bureau de Piste
BF	: Basse fréquence
CCR	: Control Center Region
CDMA	: Code Division Multiple Access
CLAM	: Cleared Level Adherence Monitoring

CMU	: Combined Meteorological Unit
CNS/ATM	: Communication Navigation Surveillance
CPA	: Closest Point of Approach
CPDLC	: Controller Pilot Data Link Communications
CRNA	: Centre en Route de la Navigation Aérienne
CTR	: Control Terminal Region
D8PSK	: Eight-Ary Differential Phase-Shift Keying
DAIW	: Danger Area Infringement Warning
DCH	: Detecteur de Champ
DME	: Distance Measuring Equipement
DME/A	: Distance Measuring Equipement d'Atterissage
DME/N	: Distance Measuring Equipement Narrow
DME/P	: Distance Measuring Equipement de Précision
EMG	: Message Emergency
ETDMA	: ETO Estimated Time Overflight
ETO	: Estimated Time Overflight
FANS	: Futur Air Navigation System
FDPS	: Flight Data Plan Service
FIR	: Flight Information Region
FL	: Flight Level
FMS	: Flight Management System
FPASD	: Flight Plan Air Situation Display
FPCP	: Flight Plan Conflict Probe
FPL	: Flight Plan
FR	: From
GS	: Ground Speed
HEA	: Helmet Equipment Assembly
HF	: High Frequency
HIS	: Hostile Intelligence Service
IFF	: Identification Friend or Foe
IFR	: Instrument Flight Rules
ILS	: Instrumental Landing System

IMC	: Instrumental Meteorological Condition
IP	: Internet Protocol
LTA	: Lower Traffic Area
MLS	: Microwave Landing System
MSAW	: Minimum Safe Altitude Warning
MSI	: Manipulateur de Signal d'Identification
MSK	: Mass Shift-Keying
MTN	: Mondial Telecommunication Network
NDA	: Next Data Authority
NM	: Nautique Mile
OACI	: Organisation de l'Aviation Civile International
OBS	: Omni Bearing System
OTAN	: Organisation du traité de l'atlantique nord
PA	: Pilote Automatique
PCAS	: Portable Collision Avoidance System
PGS	: Remote Ground Stations
PPI	: Position Plan Indicator
QDM	: Relèvement Magnnétique
QDR	: Relèvement Quadratique
QNH	: Niveau de Vol
RA	: Resolution Advisory
RADAR	: RAdio Detecting And Ranging
RAM	: Route Adhérence Monitoring
RMI	: Remote Main Interface
RPL	: Repetitive Flight Plan
RSFTA	: Réseau et Service Fixe des Télécommunication Aéronautique
SAMAD	: Système ADS/CPDLC Madagascar
SATCOM	: Satellite Communication
SDCA	: Système de Détection et de Commandement Aéroporté
SELCAL	: Select Calling System
SFC	: Surface
SITA	: Société International Télécommunication Aéronautique

SRE	: Radar primaire de surveillance
SSR	: Secondary Surveillance Radar
STCA	: Short Term Conflict Area
TA	: Traffic Advisory
TAAATS	: The Australian Advanced Air traffic System
TCAS	: Traffic Collision Avoidance System
TCC	: Tableau de commande et de contrôle
TDMA	: Time Division Medium Access
TMA	: Terminal Control Area
TNR	: Antananarivo
TTS	: Time To Station
TVOR	: Terminal Very High Frequency Omnidirectional Range
TWR	: Tour de contrôle
UHF	: Ultra Haute Fréquence
UIR	: Upper Information Region
ULM	: Ultra Léger Motorisé
UTA	: Upper Traffic Area
VDL	: VHF Digital Link
VER	: Via Emetteur de Réserve
VFR	: Visual Flight Rules
VHF	: Very High Frequency
VMC	: Visual Meteorological Conditions
VOR	: Very High Frequency Omnidirectionnal Range
VOR/C	: Very High Frequency Omnidirectional Range Classic
VOR/D	: Very High Frequency Omnidirectinal Doppler
WCDMA	: Wideband Code Division Multiple Access

INTRODUCTION

Dans la navigation aérienne, la sécurité du trafic aérien est une tâche très importante et vraiment primordiale pour les contrôleurs au sol que pour les pilotes à bord des aéronefs. Dans LA GESTION DU TRAFIC AERIEN DANS UNE ZONE DEFINIE, les contrôleurs disposent 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 espace aérien. Une situation réelle et visualisable directement sur l'écran. La localisation, la direction et quelques caractéristiques générales du vol, incluant des paramètres nécessaires au pilote pour maîtriser ses déplacements seront transmis grâce aux systèmes d'aide à la navigation. L'informatisation et l'électronisation de plusieurs procédés rend la tâche plus facile, ils augmentent le nombre d'informations transmises et permet l'automatisation de plusieurs procédés. Pour la détection du danger, comme les conflits, les contrôleurs seront aidés par un système automatique de surveillance, fournissant un certain nombre d'alertes. Ces alertes sont le résultat de plusieurs traitements de données de différentes sources et sont annoncées au contrôleur à travers un changement de couleur, un texte d'alerte ou une alerte auditive.

Pour comprendre cela nous allons voir en premier lieu l'avion dans son environnement. En second lieu nous verrons le contrôle du trafic aérien. En troisième lieu nous allons aborder l'automatisation de ce trafic aérien. Ensuite, nous allons parler de la gestion du trafic et le cas de conflits. Enfin, la simulation qui sera établit sur le logiciel C++, se basera sur la gestion du trafic aérien en elle-même et la détection de conflits entre des avions en vol dans un espace aérien définie, à donner un message d'alerte au contrôleur sur la possibilité de collision entre les aéronefs, à donner les solutions possibles pour éviter l'abordage comme un changement d'altitude ou un changement de direction.

CHAPITRE 1 : L'AVION DANS SON ENVIRONNEMENT

1.1. Historique de l'avion [1]

Le mot aviation (du latin avis, oiseau, et actio, action) a été employé pour la première fois par Gabriel de La Landelle, en 1863, dans le livre Aviation ou navigation aérienne sans ballon. Le terme « avion » sera ensuite utilisé en 1875 par Clément Ader pour désigner sa série d'appareils volants, puis breveté par lui. Cet événement ne sera toutefois pas homologué comme étant le premier vol : la hauteur atteinte qui était de 50 mètres de longueur à 20 cm au dessus du sol était insuffisante pour le qualifier de tel. Le troisième prototype de Clément Ader, l'Avion III, effectue un vol sur 300 mètres devant un comité militaire le 14 octobre 1897 à Satory. Une autre raison à la non-homologation des vols de Clément Ader est que ces vols étaient soumis au secret militaire. Entre-temps, Otto Lilienthal, grâce à des prototypes qui étaient réalisés à partir de nervures de bambou entoilées de coton, pouvait planer jusqu'à 400 m en se lançant du haut d'une colline haute d'environ vingt mètres. Le contrôle de la machine se faisait par des déplacements du corps comme pour les deltaplanes pendulaires contemporains. Mais dans les premières années de l'aéronautique, après les exploits des frères Wright à partir du 17 décembre 1903, on ne parle guère d'avion mais d'aéroplane. C'est avec la première guerre mondiale que les mots « avion et aviation » deviennent communs. Certaines personnes prétendent qu'avion est un acronyme qui aurait été forgé par Clément Ader et signifiant « appareil volant imitant l'oiseau naturel », sans qu'aucune source fiable puisse corroborer cette assertion.

1.2. L'avion [1]

1.2.1. Définition

Un avion, selon la définition officielle de l'Organisation de l'aviation civile internationale ou OACI, est un aéronef plus lourd que l'air, entraîné par un organe moteur, dont la sustentation en vol est obtenue principalement par des réactions aérodynamiques sur des surfaces qui restent fixes dans des conditions données de vol. Celui ou celle qui le dirige est appelée pilote ou aviateur ou aviatrice. Lorsque la sustentation en vol est obtenue par des réactions aérodynamiques sur des surfaces en mouvement, généralement composés d'une ou plusieurs hélices principales dont les axes sont verticaux, l'appareil est alors appelé hélicoptère ou gyroptère. Un avion qui est muni d'un dispositif lui permettant de décoller et de se poser sur l'eau c'est-à-dire pouvant amerrir est un type d'avion appelé hydravion.

1.2.2. Caractéristiques

Généralement, un avion est constitué :

- d'une cellule comprenant le fuselage, les atterrisseurs, la voilure comprenant l'aile et l'empennage et les éléments mobiles de la voilure qui sont les ailerons, les gouvernes, et les volets, y compris des éléments aux fonctions combinées comme l'aérofreins, les spoilers, elevons et les flaperons.
- d'un ou de plusieurs groupes moteurs et propulseurs à hélice ou à réaction.
- de commandes de vol capables de transmettre les actions du pilote aux gouvernes.
- d'instruments de bord d'indications et de contrôle pour informer le pilote sur le déroulement du vol.
- de servitudes de bord.
- des instruments de navigation, de positionnement et de liaison avec le sol et les autres aéronefs.

1.2.3. Classification

Les avions sont généralement classés en deux catégories : les avions civiles et les avions militaires.

- les avions civiles : ce sont les avions qui sont utilisés dans le domaine commercial ou touristique. Voici quelques exemples : les ultras légers (ULM), les avions légers, les avions d'affaire, les avions de ligne.
- les avions militaires : ce sont les avions qui sont susceptibles d'avoir un rôle dans la guerre. On peut les classés selon leur mode d'emploi respectifs : avion de chasse ou chasseur, bombardier (tactique, stratégique ou nucléaire), avion de transport, chargé de transporter du fret et/ou du personnel comme les parachutistes, avion d'entraînement, avion conçu pour l'entraînement initial (Fouga Magister) ou avancé (Alpha Jet), avion de reconnaissance ou de surveillance, c'est-à-dire Système de détection et de commandement aéroporté (SDCA), avion multi rôles, le drone, avion sans pilote.

1.2.4. Fonctionnement

Un avion subit trois types de force :

- la poussée du réacteur ou la traction de l'hélice entraînée par le moteur.
- le poids, effet de la gravité terrestre sur la masse de l'appareil.

- la résultante des forces aérodynamiques décomposée en portance et en traînée. Dont la portance, créée par le déplacement dans l'air d'une aile profilée et la traînée, somme des résistances aérodynamiques est opposée au mouvement.

Ces forces sont représentées par quatre vecteurs : la traction, la traînée, la portance et le poids. La traction vers l'avant s'oppose à la traînée vers l'arrière et la portance vers le haut s'oppose au poids vers le bas.

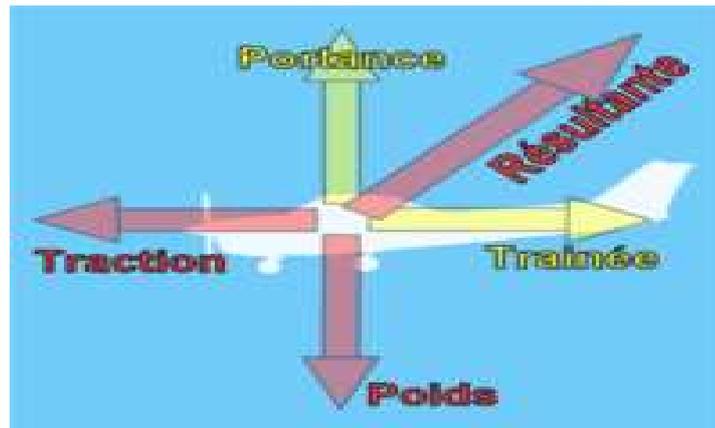


Figure 1.01 : Les forces agissant sur un avion

1.3. La navigation aérienne [1][2][3][4]

1.3.1. Définition

La navigation aérienne est l'ensemble des techniques permettant à un pilote d'aéronef de maîtriser ses déplacements en suivant une route bien déterminée. En général, cette route débute et se termine sur un aéroport. La navigation aérienne est largement héritière de la navigation maritime et la terminologie utilisée est identique. Elle s'en distingue par le fait que l'avion peut survoler aussi bien des zones maritimes que des zones terrestres qui comportent des obstacles. Il en résulte que le calcul de la position, puis de la route à suivre, doit être effectué plus souvent et plus rapidement. La navigation aérienne, au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, s'est développée grâce à la radionavigation, aidée par le fait que la propagation des ondes radioélectriques est plus facile entre le sol et l'air qu'au niveau du sol. Le développement et la généralisation, au début du XXI^e siècle, des moyens satellitaires de navigation tendent à supprimer toute spécificité à la navigation aérienne.

1.3.2. Les différents types

On peut distinguer plusieurs types de mode de navigation :

- la navigation à vue ou VFR (Visual Flight Rules).
- la navigation aux instruments ou IFR (Instrument Flight Rules).
- la navigation astronomique.
- la navigation inertielle.
- la navigation satellitaire.

1.3.3. La navigation à vue ou VFR

Le vol à vue est la façon la plus simple de voler, la plus libre aussi, où il s'agit simplement de voir et d'éviter. C'est la technique qui nécessite le moins d'instruments sophistiqués. La navigation à vue est pratiquée depuis les origines de l'aéronautique et reste encore le moyen le plus utilisé par l'aviation légère. Le pilote connaît sa position en cherchant au sol des repères qui figurent sur sa carte. Il s'agit donc de maintenir son avion dans une configuration propre au vol (attitude, vitesse) sur sa trajectoire pour l'emmener vers sa destination en s'orientant par rapport à l'extérieur (reliefs, routes, villes, ...) à l'aide d'une carte. Il suit une trajectoire en se déplaçant d'un point de repère à l'autre, ou même en suivant un repère continu tel qu'une autoroute ou une rivière. La navigation à vue ne nécessite aucun instrument mais elle n'est praticable que lorsque les conditions météorologiques permettent de voir le sol. Il existe trois modes de navigation en mode VFR : le cheminement, la navigation à l'estime et la navigation par erreur systématique.

1.3.3.1. Le cheminement

Cheminer consiste à suivre les lignes naturelles caractéristiques bien visibles depuis un avion. Cette méthode peut être utilisée chaque fois qu'une partie du parcours amène à longer un repère naturel ou artificiel (autoroute, rivière importante) pendant un certain temps. Il est important de choisir de bons repères, facilement visibles et reconnaissables, comme les fleuves, les autoroutes, les côtes, les voies ferrées importantes. On appelle aussi cheminement le fait de se diriger, à vue, d'un point connu à un repère identifié, puis de celui-ci à un autre repère identifié. On peut enfin cheminer de VOR en VOR ou Very High Frequency Omnidirectional Range, en utilisant les moyens de radionavigation.

1.3.3.2. La navigation à l'estime

Le principe de l'estime est simple : connaissant une position de départ, il s'agit de déterminer le cap à prendre et l'HEA pour arriver sur un point caractéristique ou sur un aéroport. Il peut s'agir aussi, après un temps de vol à un cap donné, de déterminer la position de l'avion. L'estime est la technique de navigation adaptée lorsque l'on souhaite joindre deux points par le trajet le plus direct : la ligne droite. La méthode est la suivante : au départ, étant en possession des informations météorologiques, vous avez une estimation du vent prévu sur votre trajet. Vous pouvez donc estimer approximativement la dérive et l'afficher dès le départ. En vol, le premier tronçon permet de tester cette dérive et d'en faire éventuellement une nouvelle estimation pour le tronçon suivant. D'autre part, vous avez estimé, lors de la préparation du vol, le temps nécessaire pour parcourir la distance entre deux repères. En vol, l'écart entre l'heure estimée et l'heure réelle de passage du premier repère, dû au vent éventuellement rencontré, permet d'estimer plus finement l'heure de passage au repère suivant : si vous avez mis plus de temps que prévu pour rejoindre ce premier repère, vous augmentez proportionnellement le temps estimé pour rejoindre le repère suivant. Au passage sur ce dernier repère, l'écart entre l'heure réelle de passage et l'heure estimée vous permet de recalculer l'heure de passage au repère suivant. Cette technique est répétée au passage de chaque repère.

1.3.3.3. La navigation par erreur systématique

Combinaison des deux précédentes méthodes. Elle consiste à naviguer à l'estime en direction d'un repère facilement « cheminable » (côte maritime par exemple, fleuve etc.) mais très en amont (erreur systématique) du repère que l'on souhaite réellement atteindre, la destination par exemple. Il suffit alors de cheminer le long du premier repère, la côte dans notre exemple. L'erreur systématique permet de connaître à coup sûr la direction à prendre à partir de ce premier repère remarquable.

1.3.4. La navigation aux instruments ou IFR

Un pilote effectue un vol selon les règles de vol aux instruments soit, en anglais, Instrument flight rules ou IFR lorsqu'il respecte un certain nombre de règles lui permettant, avec l'aide de ses instruments et du contrôle aérien, qui sont de :

- maintenir son avion dans une configuration propre au vol (altitude, vitesse).

- suivre une trajectoire imposée par les organismes de circulation aérienne (pour assurer la séparation avec le relief, les obstacles et les autres avions).
- respecter la réglementation et les procédures publiées.

Notamment, lorsqu'il n'est pas possible de maintenir les conditions VMC (Visual Meteorological Conditions) permettant de voler à vue, on parle alors de conditions IMC (Instrumental Meteorological Conditions), le vol doit s'effectuer selon les règles de vol aux instruments. Les matériels utilisés se trouvent au sol, ils sont en charge de guider l'avion lors du décollage et surtout lors de l'atterrissage et ils sont aussi responsable du cheminement de l'avion depuis la zone de départ jusqu'à la zone d'arriver.

1.3.5. La navigation astronomique

Pour les très longues distances, ce type de navigation, utilisée dans la marine, a également été utilisée en avion. Pour la navigation astronomique les avions étaient équipés d'une bulle sur le dos du fuselage pour permettre l'utilisation d'un sextant.

1.3.6. La navigation inertielle

La navigation inertielle utilise un instrument, la centrale inertielle, qui dispose d'un ensemble d'accéléromètres et de gyroscopes capables de mesurer les accélérations et les vitesses de rotation selon les trois axes de l'espace. L'intégration de ces mesures au cours du temps permet de calculer la vitesse et l'attitude de l'avion et donc sa trajectoire. Cette technique est totalement indépendante des moyens extérieurs, discrète puisqu'elle n'utilise pas la radio et reste la plus précise pour les besoins militaires (erreur circulaire de l'ordre du kilomètre par heure de vol). La navigation inertielle utilise un instrument très coûteux et n'est plus utilisée que pour les besoins militaires. Elle a été utilisée par l'aviation commerciale dans les régions dépourvues d'infrastructures radioélectriques avant l'apparition des moyens satellitaires. La dérive des centrales nécessite d'effectuer un recalage de temps en temps lorsqu'on doit effectuer une navigation précise.

1.3.7. La navigation satellitaire

A partir de 1990, les États-Unis ont mis en place un système de navigation, le GPS, utilisant des balises sur satellites. Le principe de base est identique à celui de la radionavigation. En recevant l'émission en provenance d'une balise le récepteur calcule sa distance, il est donc sur une sphère centrée sur le satellite. L'intersection de deux sphères donne un cercle ; l'intersection avec une

troisième sphère donne deux points et enfin un point unique avec la réception d'une quatrième émission. L'avantage des systèmes satellitaires sur les systèmes classiques de radionavigation est son accessibilité et sa précision constante sur l'ensemble du globe terrestre. Le défaut principal du GPS est qu'il appartient au ministère de la défense des États-Unis et qu'il est susceptible d'être rendu indisponible sur simple décision politique. Sur le plan technique, les systèmes satellitaires de navigation sont actuellement les plus précis. Le très faible coût des récepteurs permet d'envisager l'équipement de tous les types d'aéronefs. Le problème le plus épineux du GPS concerne l'intégrité du système, notamment pour l'utilisation future lors d'approches de précision. L'intégrité d'un système est sa capacité à détecter une dégradation au-delà d'un seuil fixé et à avertir l'utilisateur sans excéder un temps d'alarme.

1.4. Règles de mesure dans l'aviation [5]

1.4.1. Généralités

Pour comprendre les règles de vol, voici quelques concepts de mesure propres à l'aviation :

- l'altitude de vol est mesurée en « pieds », noté ft (feet) et se mesure soit par écart à la surface ASFC (Above surface) ou AGL (Above Ground Level), soit par écart au niveau moyen de la mer AMSL (Above Median See Level).
- la hauteur de survol d'un obstacle est mesurée aussi en pieds.
- les hauteurs des obstacles et les distances de séparation verticale et horizontale se mesurent en mètres.
- les niveaux de vols FL (Flight Level) sont des altitudes conventionnelles qui s'expriment en centaines de pieds d'altitude-pression, qui est l'altitude indiquée par un altimètre calé sur 1013 hectopascals.
- les distances de vol se mesurent en milles nautiques NM (Nautique Mile) et les vitesses sont mesurées en nœuds kt.

1.4.2. Les unités

- le pied (ft), pour mesurer des distances verticales :
1 ft = 0,3048 m
- le mille marin, ou nautique (NM), pour mesurer des distances horizontales :
1NM = 1852 m

- le pouce de mercure (inHg), pour mesurer des pressions d'admission :
1inHg \approx 33,86 hPa.

Notons aussi des unités dérivées telles que :

- le pied par minute (ft/min), pour mesurer une vitesse verticale :
100ft/min = 0,508 m/s
- le nœud (kt), ou mille nautique par heure, pour mesurer une vitesse horizontale :
1 kt \approx 0,514 m/s

1.5. Outils de base nécessaire à l'aviation [2]

- la montre : La pratique de la navigation requiert l'usage d'une montre pour le calcul des heures estimées de passage aux points de report et de l'heure d'arrivée à destination. Elle permet aussi de déterminer la vitesse sol de l'avion en mesurant le temps nécessaire pour parcourir une distance et en comparant ce résultat avec le temps qu'il aurait fallu sans vent. La montre fut utilisée à partir de 1956 dans la navigation aérienne.
- le rapporteur : Il est indispensable de pouvoir mesurer les angles sur la carte pour naviguer. La trajectoire dans le plan horizontal est en effet caractérisée par une route, que l'on exprime par un angle par rapport au Nord vrai.
- la règle : Il en existe plusieurs types, les plus adaptées au cockpit des avions étant les règles de petite taille. Elles permettent, outre le tracé des routes, de mesurer les distances à parcourir.
- le crayon et la gomme : Le crayon et la gomme permettent de tracer la route sur la carte aéronautique pour un vol donné. Il sera préférable d'utiliser une mine grasse pour permettre d'effacer sans traces.

1.6. Conclusion

L'invention de l'avion est une grande révolution dans le domaine du transport, il a une grande rapidité de déplacement, peu parcourir de longue distance et surtout le plus en sécurité parmi les autres moyens de transports, maritimes et terrestres. De nos jours, cette invention a eu de grand développement technologique et la maniabilité d'un appareil se fait de plus en plus automatiquement. Le contrôle de ces avions pour avoir une bonne fluidité du trafic sera entamée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2 : LE CONTROLE DU TRAFIC AERIEN

2.1. Introduction [6]

Le contrôle du trafic aérien est un ensemble de services rendus aux aéronefs par les contrôleurs aériens basés au sol. Ceci afin d'aider à une exécution sûre, cohérente, rapide et efficace des vols.

Les services du contrôle du trafic aérien sont généralement fournis dans l'espace aérien et sont à la disposition de tous les usagers que cela soit privés, commerciaux ou militaires. Cet espace aérien est appelé « espace aérien contrôlé » à la différence de l'espace aérien non contrôlé que nous aborderons plus tard.

Le contrôle du trafic aérien comprend plusieurs entités humaines et nécessite plusieurs infrastructures techniques importantes pour assurer le bon déroulement du vol, c'est-à-dire à partir du décollage jusqu'à l'atterrissage de l'aéronef. Le but majeur de tout cela est de :

- prévenir les collisions entre les aéronefs et le sol ou les véhicules d'une part, et les collisions en vol entre aéronefs d'autre part (autrefois appelés "abordages"). Il consiste aussi à accélérer et à ordonner la circulation aérienne.
- fournir les avis et renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace du vol : informations météorologiques, information sur l'état des moyens au sol de navigation, information sur le trafic
- fournir un service d'alerte pour prévenir les différents organismes appropriés lorsque les aéronefs ont besoin d'aide de secours et de sauvetage, et de prêter à ces organismes le concours nécessaire.

2.2. Les différentes entités de la circulation aérienne [7][8][9]

2.2.1. La tour de contrôle (TWR)

2.2.1.1. Définition et objectifs

C'est l'endroit le plus élevé d'un aéroport, appelé aussi « centre de contrôle de l'aérodrome » sous l'acronyme TWR pour Tower ou tour de contrôle. La tour est chargée d'assurer les services de la circulation aérienne dans une zone restreinte (de l'ordre d'une dizaine de kilomètres) autour d'un aérodrome afin d'assurer l'acheminement sûr, ordonné et rapide de la circulation aérienne. Sa principale attribution est la gestion de la piste d'atterrissage et de décollage depuis la vigie. Elle transmet les clairances ainsi que des renseignements aux aéronefs évoluant dans la circulation d'aérodrome afin de prévenir les abordages entre :

- les aéronefs en vol dans le circuit d'aérodrome.

- les aéronefs en train d'atterrir ou de décoller.

Les collisions entre :

- les aéronefs évoluant sur l'aire de manœuvre.
- les aéronefs et les véhicules évoluant sur l'aire de manœuvre.
- les aéronefs sur l'aire de manœuvre et les obstacles se trouvant sur cette aire.

2.2.1.2. Mode de fonctionnement

La première méthode pour contrôler le trafic aérien au sol et aux abords immédiats d'un aéroport est l'observation visuelle à partir d'une tour de contrôle. Cette dernière, haute structure vitrée, offre aux contrôleurs aériens une vue panoramique qui couvre l'aéroport et ses environs. Les contrôleurs d'aérodrome ou contrôleurs « tour » sont responsables de la séparation et du mouvement efficace des aéronefs et des véhicules qui manœuvrent sur les voies de circulation et les pistes de l'aéroport ainsi que des aéronefs en vol à proximité de l'aéroport.

2.2.1.3. Domaines de responsabilités

Les domaines de responsabilité des contrôleurs tour sont répartis en trois disciplines opérationnelles générales : le Contrôle « sol », le Contrôle « tour » et la « mise en route ». Bien que chaque procédure tour varie et que plusieurs équipes dans des tours plus importantes peuvent contrôler plusieurs pistes, il existe un concept général de délégation de responsabilités au sein de l'environnement tour :

- mise en route ou "clearance delivery" : La « Clearance delivery » est responsable de la gestion globale des flux de trafic aérien et le centre de contrôle aérien « en-route » pour obtenir l'autorisation de mise en route d'un avion en partance. Dans des conditions normales, ceci se fait de façon quasi automatique. Lorsqu'il faut faire face à des conditions météo difficiles ou à une très forte demande pour un aéroport ou un secteur de contrôle aérien déterminé, un étalement dans le temps ou un reroutage du trafic, voire dans les cas extrêmes un slot (créneau horaire et donc un retard), sont utilisés pour s'assurer que le système ne soit en aucun cas surchargé. La première responsabilité de la position « clearance delivery » est de garantir que l'avion reçoive la bonne route de départ et le bon créneau horaire de décollage.
- contrôle sol : Le Contrôle sol est responsable des zones de mouvements d'un aéroport. Ces dernières comprennent toutes les voies de circulation, aires d'attente et certaines aires de

manœuvre ou intersections où arrivent les avions qui ont quitté la piste ou les portes d'embarquement. Les responsabilités ainsi que les zones de travail imparties à chaque contrôleur sont clairement définies dans des documents et accords locaux propres à chaque aéroport. Les avions et les véhicules se déplaçant dans ces zones de mouvement doivent avoir une autorisation du contrôleur sol. Ceci s'effectue normalement par le biais d'un contact radio, mais il peut y avoir des cas particuliers où l'on applique d'autres méthodes telles que la communication par signaux optiques par exemple.

- contrôle air : Le Contrôleur air est responsable des mouvements sur les pistes ainsi que du trafic aérien aux abords immédiats de l'aéroport. Il autorise ainsi les avions à décoller ou à atterrir en s'assurant que la piste attribuée est libre pour la manœuvre envisagée. Pour ce qui est du trafic en vol, le contrôleur air est responsable de la gestion d'un espace aérien contrôlé appelé "CTR" qui chapeaute l'aéroport et dans lequel il assure la sécurité des appareils en approche ou au décollage en émettant les instructions adéquates. Si le contrôleur air détecte des conditions potentiellement dangereuses, il peut ordonner au pilote d'un avion en phase d'atterrissage de remettre les gaz ou encore donner l'ordre d'abandonner un décollage à un appareil en partance.

2.2.2. Le centre de contrôle d'approche (APP)

2.2.2.1. Définitions et objectifs

Il est chargé d'assurer les services de la circulation aérienne aux abords d'un aérodrome, dans une zone de contrôle dont la taille est variable. Il s'agit pour le contrôleur d'approche de guider les aéronefs depuis la croisière vers l'axe de la piste où ils seront pris en charge par la Tour. En cas de surcharge, le contrôleur peut ouvrir des circuits d'attente où les aéronefs vont attendre en faisant des hippodromes appelés aussi stacks (cf. figure 2.01) au-dessus d'une balise. Les contrôleurs aériens sont généralement situés dans la vigie d'une tour de contrôle, ou dans une salle radar spécialement aménagée.

2.2.2.2. Modes de fonctionnement

Les contrôleurs d'approche sont chargés de fournir tous les services ATC aux aéronefs évoluant dans la zone terminale de l'aéroport (TMA). Le flux de trafic est généralement divisé en départs, arrivées et survols. Lorsque, après le décollage, un appareil quitte les abords de l'aéroport, le contrôleur air de la tour de contrôle en transfère la responsabilité à un contrôleur départ situé à l'APP. Ce dernier, au moyen du radar ou du satellite, le guide au travers des flux d'appareils en approche et gère la partie initiale de sa montée. A l'inverse, lorsque qu'un avion quitte son niveau de croisière et entame sa descente, le contrôleur en route le transfère à une altitude et un point convenus à un contrôleur arrivé. Comme son collègue le contrôleur départ, le contrôleur arrivé est situé à l'APP. Le rôle du contrôleur arrivé sera de gérer les descentes et d'amener les différents avions en approche sur l'axe de la piste d'atterrissage en respectant les distances de sécurité. Une fois les avions établis « en finale », le contrôleur arrivé les transfère au contrôleur air à la tour (TWR) qui délivrera l'autorisation d'atterrissage.

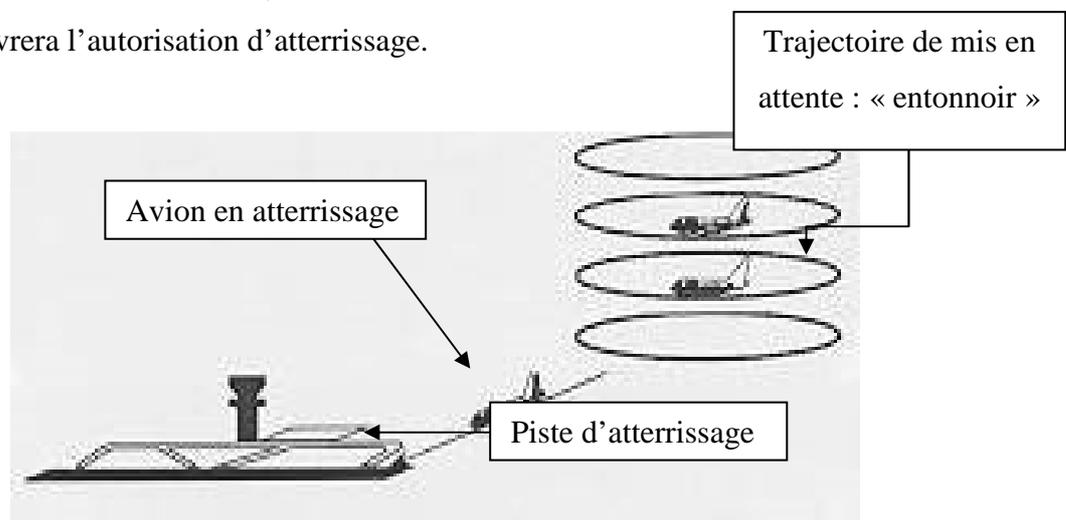


Figure 2.01 : Trajectoire de mise en attente des avions en atterrissage

Il prend le relais du contrôle en route pour gérer la phase de descente de l'avion jusqu'à 6 ou 10 milles nautiques de la piste c'est à dire entre 11 et 18 km.

2.2.3. Le Centre de contrôle en route CRNA ou ACC

2.2.3.1. Définitions et objectifs

Ce centre est aussi appelé Centre de Contrôle Régional (CCR). Il est chargé d'assurer les services de la circulation aérienne au bénéfice des aéronefs en croisière (hors proximité d'aérodrome). Il gère tout l'espace aérien en route. Il contrôle les aéronefs qui, après avoir décollé, quittent la zone terminale d'un aéroport (TMA) jusqu'à leur arrivée dans l'espace aérien de la zone terminale de

l'aéroport de destination. Le contrôle en route concerne donc principalement la navigation en croisière sur les routes aériennes, qui permettent de joindre les zones terminales d'aéroport.

2.2.3.2. Modes de fonctionnement

Les contrôleurs en route ont la mission de mener l'aéronef à l'altitude requise et, en même temps, de s'assurer que l'aéronef respecte les distances de sécurité qui doivent le séparer des autres aéronefs. De plus, l'aéronef doit être inséré dans un flux de trafic qui correspond à son plan de vol. Cette tâche peut être rendue plus difficile par le trafic croisé, de mauvaises conditions météorologiques, des missions spéciales qui requièrent une allocation importante d'espace aérien ou une forte densité du trafic. Lorsque l'aéronef s'approche de sa destination, le centre de contrôle doit appliquer des restrictions d'altitude et fournir un flux de trafic aux nombreux aéroports de destination, ce qui prévient l'encombrement des arrivées. Ces restrictions interviennent souvent dès la moitié du vol, lorsque le contrôleur positionne les aéronefs qui ont la même destination afin qu'ils soient, à l'approche de celle-ci, ordonnés en séquence. Lorsqu'un aéronef atteint la limite de la zone de contrôle d'un centre ACC, il est transféré («handed over») au centre suivant. Dans certains cas, ce transfert s'accompagne d'une communication, entre contrôleurs, de l'identification et de données concernant l'aéronef afin que le service de navigation aérienne soit rendu sans intermittence. Dans d'autres cas, des accords locaux peuvent permettre des transferts « silencieux », si le trafic est présenté d'une manière concertée, une coordination n'est plus requise. Après un transfert, le pilote de l'aéronef reçoit une nouvelle fréquence pour communiquer avec le contrôleur suivant. Ce processus continue tout au long du vol jusqu'à ce que l'aéronef soit transféré à un contrôleur d'approche (APP). Les avions circulent à l'intérieur de couloirs larges de 10 milles nautiques (18 km) et sont séparés verticalement de 300 m. Ces organismes ont été différenciés car les compétences requises, les règles applicables, et les moyens techniques nécessaires ne sont pas les mêmes. Un centre de contrôle en route nécessite un radar ou une liaison satellite, tandis que l'outil principal en contrôle d'aérodrome est la vue. En approche, tous les avions veulent aller au même endroit : la piste, on a ainsi un phénomène "d'entonnoir" (cf. figure 2.01). En route, les avions ont tous des provenances et destinations différentes, les problèmes sont donc pour beaucoup éparpillés et aléatoires. Ces différences, et d'autres, ont conduit à cette classification.

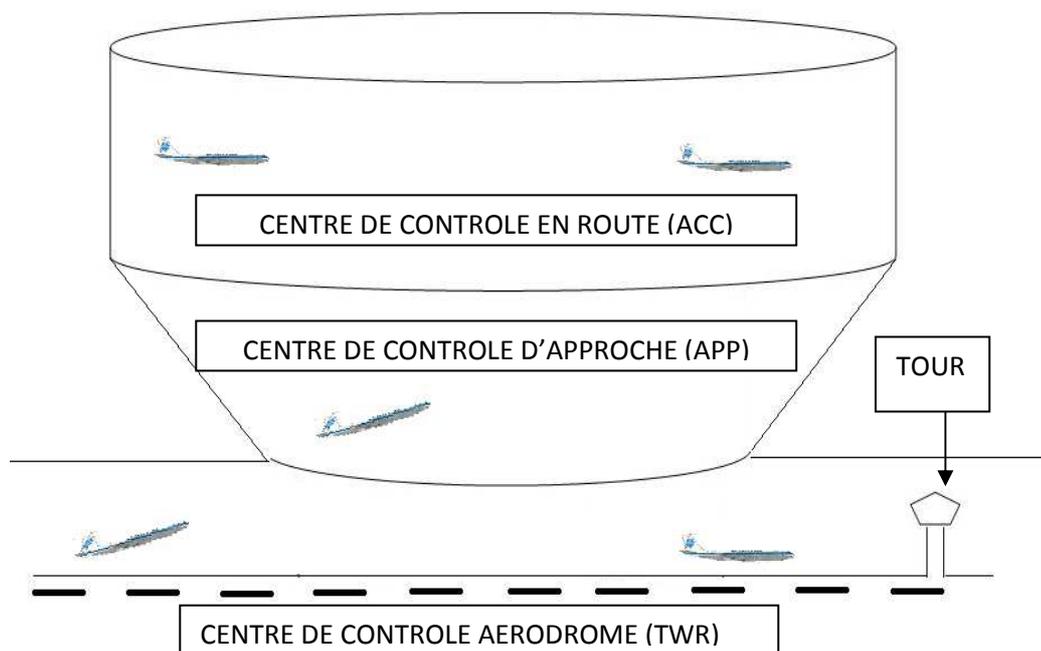


Figure 2.02 : Disposition des différents centres de contrôle

2.2.4. Le contrôleur aérien

Un contrôleur aérien parfois appelé Aiguilleur du ciel est une personne chargée d'assurer le contrôle, la sécurité et la gestion de la circulation aérienne.

Sa mission est de séparer les avions, et les autres appareils volants (l'ensemble étant appelé aéronefs). Des normes d'espacement sont établies et le contrôleur doit s'assurer que ces normes soient respectées à chaque instant. Il aide également à fluidifier et organiser la circulation des aéronefs dans le ciel, mais également au sol sur les aéroports. Pour cela, il peut regarder directement dehors (en tour de contrôle, appelée aussi vigie) ou utiliser son écran radar. Pour compenser la charge de stress élevée, ainsi que le travail de nuit, les contrôleurs ne peuvent travailler plus de 32 heures par semaine glissante. Par ailleurs, ce temps de travail doit être composé à 25% de pauses. Bien que cela ne soit pas le cas de tous, et pour respecter cette réglementation, un contrôleur aérien ne travaille donc généralement pas plus de trois jours par semaine.

2.3. L'espace aérien [10][11]

2.3.1. Découpage de l'espace aérien

Les territoires nationaux sont découpés en régions d'information de vol appelé FIR ou Flight Information Region. Les FIR vont de la surface (SFC) au niveau de vol 195 (inclus) ou FL 195, Flight Level 195, c'est-à-dire 19.500 pieds à la pression de 1013 hPa, soit environ 5 800 m. Les FIR sont gérées par le centre de contrôle en route. Au-dessus de la FIR, il y a une seule région, la région d'information supérieure UIR ou Upper Information Region. Elle va du niveau FL 195 (exclu) au FL660. Horizontalement, l'espace est divisé en tranches :

- l'espace aérien inférieur LTA ou Lower Traffic Area du niveau 115 (exclu) au 195 (inclus), 3 400 m à 5 800 m, espace contrôlé principalement de classe D, c'est à dire contact radio obligatoire.
- l'espace aérien supérieur UTA ou Upper Traffic Area du niveau 195 (exclu) au 660, 5 800 m à 20 000 m, espace contrôlé de classe C depuis novembre 2004, c'est à dire réservé aux aéronefs en régime de vol aux instruments IFR (cf. chapitre 1) et à certains VFR sur réservation de zone.

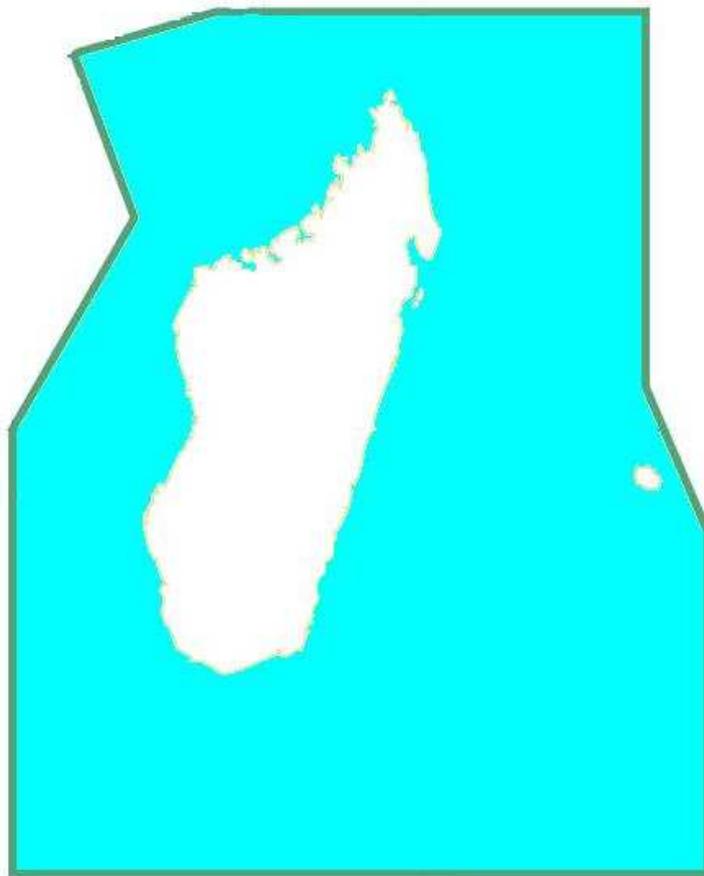


Figure 2.03 : Espace aérien de Madagascar appelé « FIR TANA »

2.3.2. Zone contrôlés ou non contrôlés

Il existe des espaces contrôlés de taille plus petite, pour permettre de gérer le trafic aérien aux abords des aérodromes :

- la zone de contrôle terminale CTR ou ConTRol zone, souvent de forme cylindrique, centrée sur un aérodrome important, qui permet de gérer les décollages et atterrissages ainsi que les circuits de piste. Elle a une hauteur faible (généralement 500 mètres) et démarre au sol.
- la région de contrôle terminale TMA ou TerMinal control Area, de plus grande taille qui chapeaute bien souvent une ou plusieurs CTR, qui permet de protéger les trajectoires de départ et d'arrivée d'un aéroport, ou de plusieurs aéroports
- la voie aérienne AWY ou Airway, qui relie les TMA entre-elles.

2.3.3. Classe de l'espace aérien

Les classes d'espace aérien associent à des zones tridimensionnelles dans l'espace aérien un code, en l'occurrence une lettre, qui détermine le niveau de contrôle de la zone en question. Par « niveau de contrôle » on entend un ensemble de procédures auxquelles doit se conformer le pilote, ainsi qu'un ensemble de règles qu'il doit respecter, lorsqu'il circule dans la zone. Lorsqu'une zone est contrôlée, le pilote est en contact radio avec un organisme de contrôle, qui peut être par exemple la tour d'un aérodrome, ou bien un centre de contrôle plus conséquent. Le centre de contrôle peut exiger certaines actions du pilote, par exemple qu'il mette en marche un appareil dans l'avion (transpondeur) permettant au centre de contrôle de l'identifier au radar. Le centre de contrôle offre, en échange, une aide au pilote, et le décharge d'un ensemble de tâches dont le centre assure le contrôle. Dans la définition des classes d'espace aérien on trouve des règles s'appliquant distinctement aux conditions VFR (« Visual Flight Rules ») et IFR (« Instrument Flight Rules »). Les conditions VFR s'appliquent au « vol à vue » c'est à dire que le pilote utilise la vue de son cockpit comme source d'information principale. Dans le cas des IFR, le pilote utilise ses instruments comme source de connaissance de l'environnement.

2.3.3.1. Classe d'espace contrôlé

- classe A : Le vol VFR est interdit en classe A sauf dérogation express accordée par l'autorité compétente. Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Elle est utilisée dans les espaces avec un très fort trafic IFR.

- classe B : Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont hors des nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100).
- classe C : Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.
- classe D : Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que la classe C. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.
- classe E : le vol VFR n'est pas un vol contrôlé. Par conséquent, un vol VFR est dispensé de clairance et de contact radio dans cette classe d'espace, sauf dans le cas du VFR spécial, où il redevient un vol contrôlé. Un vol IFR est lui un vol contrôlé, et a obligation de contact radio et de clairance pour pénétrer un espace de classe E. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que les classes C et D. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.

2.3.3.2. Classe d'espace non contrôlé

- classe F : Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que les classes C et D. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.
- classe G : Il s'agit de la classe d'espace la plus répandue. Quand aucun espace aérien n'est défini, l'espace est de classe G. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que les classes C et D. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.

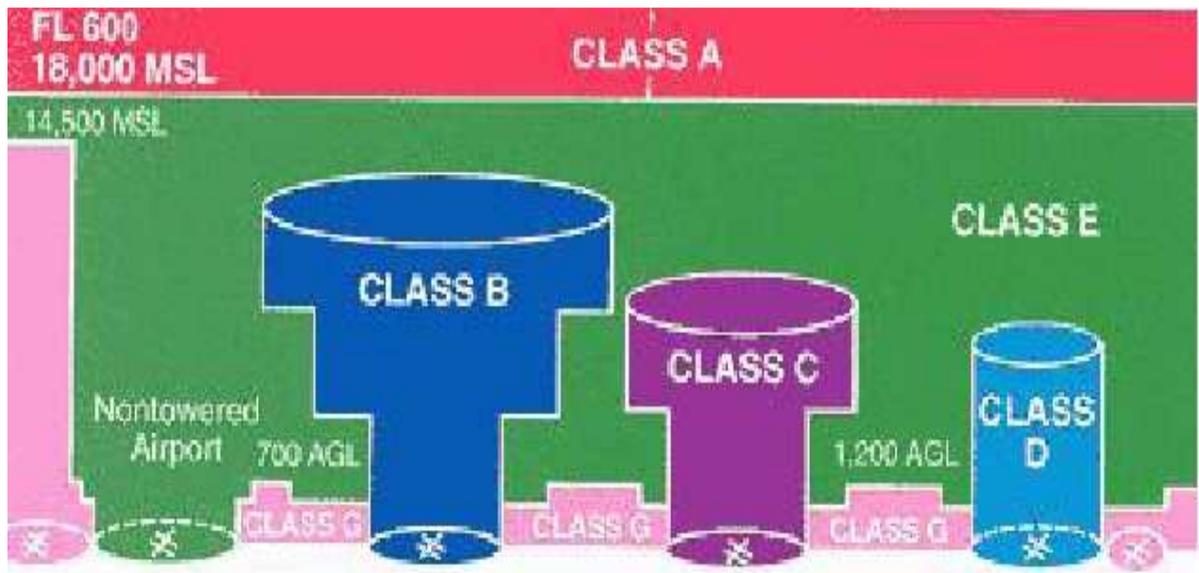


Figure 2.04: Classes de l'espace aérien

AGL: Above Ground Level

FL: Flight Level

MSL : Mean Sea Level

2.3.4. Zone particulière

Ces zones sont beaucoup utilisées par les militaires pour protéger leurs évolutions, mais il en existe quelques unes pour des besoins civils. Il existe trois types de zones :

- zone dangereuse (D): Les zones D, dangereuses, définies pour annoncer un danger permanent ou à certaines heures pour les aéronefs. La pénétration dans la zone n'est pas interdite même en cas d'activité. Il s'agit par exemple, de champs de tir militaires ou de zones de barrage en montagne avec de nombreux câbles. A ne pas confondre avec l'espace de Classe D.
- zone réglementée (R) : Les zones R, réglementées, définies pour protéger une zone, principalement d'évolution d'avions militaires.
- zone interdites (P) : Les zones P, interdites de l'anglais prohibited, sont complètement interdites à tout aéronef civil.

2.4. La communication entre contrôleur et pilote [6][12][13][14]

2.4.1. La radiotéléphonie

La radiotéléphonie, appelée couramment « fréquence » ou « micro », est le principal outil des contrôleurs. Le contrôle aérien utilise principalement des radiocommunications VHF, mais aussi parfois, notamment pour le contrôle océanique, des fréquences HF qui ont une plus longue portée. Son but est de recevoir des informations de la part des pilotes et de délivrer des clairances (instructions) aux aéronefs. La caractéristique pratique de la radiotéléphonie de l'aviation civile est d'être une communication unilatérale : une seule station peut émettre à un moment donné. Si deux stations émettent en même temps, la fréquence est brouillée et on n'entend aucun des locuteurs.

2.4.1.1. La phraséologie

Les échanges d'informations se font en code appelé « phraséologie ». Elle est étudiée pour que les messages soient : concis, clairs et sans ambiguïté. Le collationnement (readback) est obligatoire pour la plupart des instructions : il s'agit de répéter l'instruction (ou du moins les éléments principaux) pour confirmer la bonne compréhension. Par exemple, pour autoriser un avion au décollage, le contrôleur lui communiquera l'instruction cleared for take off ou « autorisé au décollage », il donnera la direction et la vitesse du vent et le numéro de la piste. Le pilote doit confirmer en répétant l'instruction donnée.

Voici le tableau montrant la phraséologie utilisé en aéronautique :

Lettre	Alphabet Radio International	Alphabet Morse
A	Alpha	.-
B	Bravo	-...
C	Charlie	-.-.
D	Delta	-..
E	Echo	.
F	Fox Trot	..-.
G	Golf	-.
H	Hotel
I	India	..
J	Juliett	.-.
K	Kilo	-.
L	Lima	.-..
M	Mike	--
N	November	-.
O	Oscar	--
P	Papa	.-..
Q	Québec	-.-.
R	Roméo	.-.
S	Sierra	...
T	Tango	-
U	Uniform	..-
V	Victor	.-.
W	Whiskey	-.-.
X	X-Ray	-.-.
Y	Yankee	-.-
Z	Zulu	-.-.

Tableau 3.01 : alphabet radio en aéronautique

La structure du message entre le contrôleur et le pilote se constitue comme ceci :

- le message initial (prise de contact) doit comporter l'appelé et l'appelant : "Ivato de Fox Alpha Bravo, bonjour".
- un message de demande commence par l'appelant : "Fox Alpha Bravo, au seuil 22, prêt pour alignement et décollage"
- un message d'instruction ou d'information (clairance ou indication du sol) commence par l'appelé : "Fox Alpha Bravo, autorisé alignement et décollage piste 22"
- un message de collationnement fini par l'appelant : "Je m'aligne et décolle, piste 22, Fox Alpha Bravo".

Voici un autre exemple de discussion entre pilote et contrôleur pour montrer le collationnement :

- contrôleur : "Mike Delta Golf, autorisé à pénétrer, le QNH 1013, piste en service 22, transpondez 5123, rappelez verticale"
- pilote : "Autorisé à pénétrer, QNH 1013, piste 22, transpondeur 5123, je rappellerais verticale, Mike Delta Golf".

2.4.1.2. Le service d'information

Le service d'information consiste à délivrer aux aéronefs les renseignements et avis nécessaires à l'exécution sûre et efficace du vol. Ces renseignements peuvent être :

- météorologiques : conditions météo sur un terrain, présences d'orages...
- information sur le trafic : information sur un trafic connu ou inconnu, en fonction des éléments disponibles, pouvant interférer avec un aéronef
- état des aides à la navigation
- état des équipements sol d'un terrain
- amendements de plan de vol
- information sur la position, aide aux pilotes perdus, autres...

2.4.2. Le strip

2.4.2.1. Définitions

Les strips sont de petites « bandes de progression » en papier sur lesquelles sont inscrites les informations relatives aux vols pris en charge par le contrôle aérien. À chaque vol correspond donc des strips, où sont imprimés les détails connus du vol : indicatif d'appel en radio téléphonie, route, provenance, destination, type d'aéronef, niveau de vol ou altitude. Le contrôleur utilise

ensuite ce strip pour y inscrire les instructions qu'il donne à l'aéronef : changements de cap, d'altitude ou encore de vitesse, autorisations d'atterrissage ou de décollage, horaires de passage de certains points... Par la suite, le strip est archivé et utilisé comme preuve pour facturer le service de contrôle aérien à la compagnie aérienne.

2.4.2.2. Les strips électroniques

Dans certains systèmes modernes les strips en papier sont remplacés par des « strips électroniques » qui s'affichent à l'écran. Le contrôleur recevra automatiquement un détail du vol en cours sans prendre contact avec le pilote. Les informations qui étaient disponibles sur les strips papiers sont facilement introduites dans le système. Ainsi le système peut mettre à jour la situation et donner des alarmes dans le cas échéant. Le partage d'informations entre secteur est possible contrairement au strip papier qui n'est lisible que par les contrôleurs à proximité.

2.4.3. *La liaison de données ou Data Link*

C'est encore un système compris dans le contrôle automatique du trafic aérien. Créé initialement pour aider au contrôle du trafic au dessus des espaces océaniques, ce système 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'avion appelé ADS, les données des calculateurs de bord (position, altitude, vitesse, météo) sont collectées, puis transmises à intervalles réguliers par satellite au dessus des océans vers les équipements au sol. Une interface graphique permet de visualiser ces éléments et leur mise à jour sur un écran. Il s'agit aussi d'utiliser une messagerie électronique pour les dialogues entre pilotes et contrôleurs qui s'appelle CPDLC. Ces dialogues sont codifiés pour des raisons de sécurité : messages préformatés 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.

2.5. Conclusion

Le contrôle du trafic aérien est une tâche nécessitant beaucoup de vigilance et beaucoup de compétence de la part du contrôleur au sol. Mais en tant qu'être humain les erreurs ne peuvent pas être exclues, d'où on a opté pour l'automatisation de certains procédés que nous verrons dans la suite.

CHAPITRE 3 : LA SURVEILLANCE AUTOMATIQUE DU TRAFIC AERIEN

3.1. Introduction [15]

L'évolution de la technologie se développe de jours en jours en jours. Face à l'augmentation du trafic aérien le contrôle de la navigation aérienne doit évoluer. Cette évolution est également l'occasion d'améliorer de manière globale la sécurité du transport aérien car dans l'aéronautique la sécurité des passagers, le bon déroulement du vol et la fiabilité du trafic sont des facteurs essentiels. Le manque d'informations sur la position des aéronefs en vol ou au sol rend leur guidage difficile. Donc la solution réside sur le partage d'information entre pilotes d'aéronefs et contrôleurs aériens. Leur tâche commune est de permettre à tous les aéronefs du secteur de contrôle concerné d'effectuer les actions suivantes : 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. Le partage de ces informations se faisait par l'intermédiaire de la radiotéléphonie et le radar secondaire. L'utilisation des liaisons de données se limite à des transferts d'informations unidirectionnels et peu interactifs : l'aéronef reçoit régulièrement des bulletins d'informations météorologiques d'aéroport, ou internes aux compagnies aériennes. De son côté, le contrôleur aérien reçoit de l'aéronef son numéro de vol et quelques paramètres de vol comme l'altitude et la vitesse de l'aéronef par l'intermédiaire du transpondeur. Et tout cela n'était pas fiable et ne dépendait que de l'approximation et de plusieurs calculs. D'où l'automatisation de ce procédé faciliterait le contrôle et augmenterait la sécurité du trafic.

Un système de contrôle automatisé du trafic aérien a pour but d'aider le contrôleur aérien à remplir sa mission de contrôle. Ce système est composé de plusieurs sous-systèmes électroniques et informatiques interconnectés.

3.2. Le partage de l'information dans le contrôle aérien il y a quelques années [15]

3.2.1. Contexte

Il y a quelques années les principaux moyens de communication utilisés pour le contrôle de la navigation aérienne sont la radiotéléphonie et le radar secondaire. Les informations sont transmises par la voix c'est-à-dire utilisation d'une communication vocale et par la localisation se fait par l'utilisation du radar. Du point de vue du contrôleur aérien, la situation du trafic à un instant donné est indiquée essentiellement par une image radar, et par des bandes de progression appelé strips qui sont des bandes de papiers indiquant les détails connus du vol : indicatif d'appel

en radio téléphonie, route, provenance, destination, type d'aéronef, niveau de vol ou altitude .Ces informations sont complétées et remises à jour via communication vocale par la radiotéléphonie par les pilotes d'aéronef. Les informations transmises aux contrôleurs incluent la position exacte et la route prévue de l'aéronef issue de l'ordinateur de vol (FMS), la trajectoire prévue de l'aéronef issue du pilote automatique (PA), et l'état général de l'aéronef. Ces informations complémentaires sont notées sur les bandes de progression ou stockées dans la mémoire du contrôleur aérien qui élabore une image mentale du trafic actuel et futur.

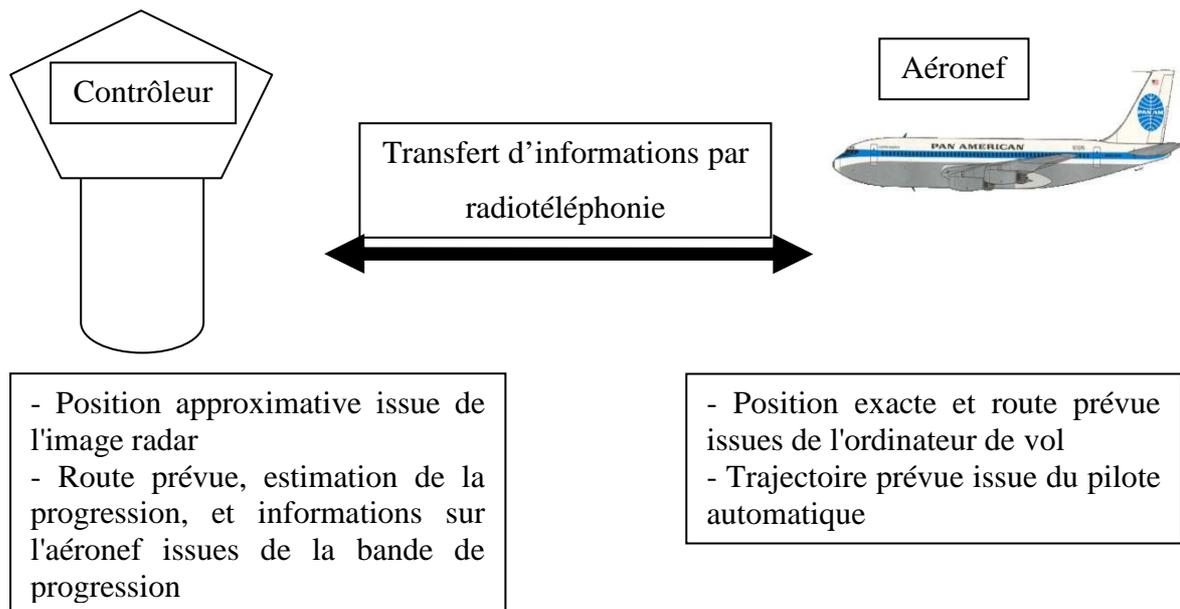


Figure 3.01 : Partage d'informations entre contrôleur et aéronef il y a quelques années

3.2.2. Problématique

Les experts ont constatés que le nombre de trafic augmente très rapidement et les fréquences radio utilisés par les contrôleurs seront saturées. Pourtant l'augmentation du nombre de fréquences disponibles n'est pas une solution envisageable car elle signifierait une augmentation du nombre de changements de fréquence par aéronef préjudiciable à la sécurité. De même, une meilleure organisation et harmonisation du trafic aérien ne ferait que reculer l'échéance. Il apparaît donc que d'autres solutions doivent être envisagées pour faire face à l'accroissement du trafic et pour augmenter de manière générale la sécurité des mouvements des aéronefs en vol mais aussi au sol. D'où, de nouveaux outils doivent être envisagés pour améliorer la connaissance du trafic.

3.2.3. La solution proposée

Les experts du domaine ont donc proposé, comme solution technique, l'utilisation des liaisons de données ou « data link » permettant une meilleure communication entre les aéronefs et le contrôle aérien. Théoriquement cela fonctionne comme ceci : en consultant son ordinateur de vol, le pilote connaît sa position exacte et la progression de son aéronef sur la route qu'il a saisie dans l'ordinateur. Le pilote informe le contrôle aérien de sa position et de ses intentions par radiotéléphonie. Ce transfert radiotéléphonique sera remplacé par une liaison de données automatique. Une nouvelle sorte de transpondeur plus complet peut être affecté à ce transfert. Le contrôleur au sol connaîtrait alors la position, la trajectoire, la route prévue, et la progression de l'aéronef en temps réel directement sur son écran de contrôle sans aucune intervention du pilote. Le contrôleur disposerait alors des mêmes informations que le pilote remises à jour à chaque modification. De plus, cette solution permettrait dans l'avenir d'ajouter au sein du contrôle aérien un système automatique de prévention des abordages utilisant directement les données issues des ordinateurs de vol des aéronefs. Les négociations de trajectoire peuvent être simplifiées par une liaison de données bidirectionnelle interactive où pilote et contrôleur s'échangent des propositions de trajectoire. L'échange de trajectoires par liaisons de données permet une diminution sensible du volume des communications radiotéléphoniques réduits à des messages d'accompagnement. De plus, le contrôleur aérien peut disposer dans une base de données, des trajectoires d'atterrissage usuelles. Ainsi, il est en mesure d'informer rapidement un aéronef en phase d'atterrissage d'un changement tardif de piste. Cette possibilité réduit les risques de confusion fréquents lorsque la charge de travail est élevée. La suppression d'une partie des transferts d'information radiotéléphoniques a pour conséquence immédiate une perte du party line. Nous proposons de remplacer le party line effectué par le pilote sur la fréquence radiotéléphonique par un party line électronique (système ADS/CPDLC dans le futur) dont les systèmes de bord de l'aéronef sont responsables. Les systèmes de bord écoutent les informations de position envoyés par les autres aéronefs au contrôle aérien. Le pilote dispose ainsi sur son écran de navigation de la position et de la trajectoire prévue des aéronefs susceptibles de l'intéresser.

3.3. Le partage de l'information dans le contrôle aérien de nos jours [16][17][18]

De nos jours, le partage des informations dans le contrôle de trafic aérien se fait automatiquement par l'intermédiaire des différents capteurs de surveillance qui sont le premier maillon de la

chaîne car ces systèmes ont pour mission de "voir" les avions et de transmettre toutes les informations disponibles aux systèmes de poursuite.

Le système de contrôle automatisé du trafic aérien peut être utilisé pour les missions suivantes :

- contrôle opérationnel : le contrôle du trafic en temps réels avec toutes les données nécessaires pour établir un vol.
- test et évaluation : tous les sous-systèmes sont soumis à plusieurs phases de test et de validation.
- formation : Le système doit fournir un mode simulation pour la formation des contrôleurs aériens et cela doit pouvoir se faire dans de bonnes conditions et sur du trafic simulé.
- archivage, rejeu et visualisation, pour des raisons légales (incidents, accidents) mais aussi pour évaluer le montant de la redevance au service de contrôle auprès des compagnies aériennes. Le système doit comporter l'enregistrement de tous les messages émis et reçus par le système et toutes les actions contrôleur et d'autre part, le rejeu de ces messages sur une position dédiée afin d'obtenir une sorte de boîte noire ou de preuves si il y a un accident ou une défaillance technique quelconques.

3.3.1. Utilisation du système de surveillance radar

Une des systèmes utilisés pour le contrôle automatique du trafic aérien est le radar, plus précisément le radar primaire et le radar secondaire. Le radar est une abréviation de l'anglais RADIO Detecting And Ranging. C'est un instrument d'alerte et de mesure car il a la capacité de détection et de localisation. Les radars dit de surveillance résulte de l'application du principe de directivité des aériens et de la mesure du temps de propagation d'une onde et permettent de mesurer la distance de l'avion à la station et l'azimut de l'avion par rapport au Nord. On dispose à cet effet d'un aérien directif ayant une couverture aussi étendue que possible dans le plan vertical entre la station et l'horizon, et une couverture aussi étroite que possible dans le plan horizontal , tout en tournant à vitesse constante. Connaissant à chaque instant la position de l'aérien en azimut et la distance de l'avion à la station, on en déduit facilement la position de l'avion en distance et en azimut par rapport à la station. Cette information est donnée par un indicateur qui est appelé « PPI » ou Indicateur de Plan de Position. Les impulsions émises se suivent à un rythme très rapide de 300 à 1000 par seconde. La distance de la cible est calculée par l'émission dirigée qui mesure la durée aller retour :

$$\text{Distance} = (\text{Vitesse} / 300\,000 \text{ km/s}) \times (\text{Temps} / 2) \quad (3.01)$$

Du même coup la direction, le relèvement en sorte, est connue.

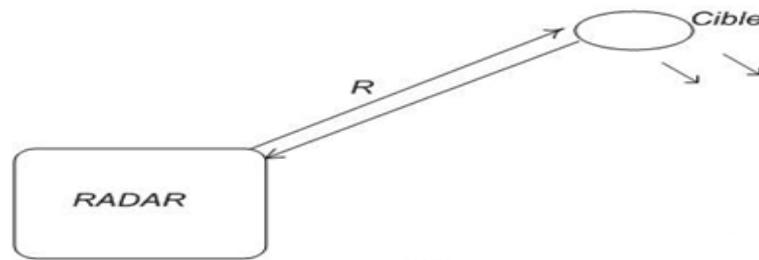


Figure 3.02 : caractéristique du radar

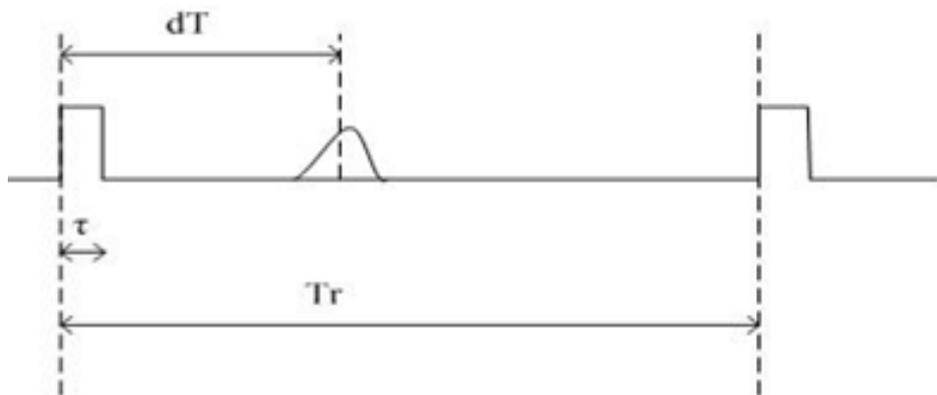


Figure 3.03 : caractéristique de propagation radar

$$R = \frac{V \cdot dT}{2} \quad (3.02)$$

dT : durée de temps de trajet

V : vitesse de propagation

3.3.2. Le radar primaire

3.3.2.1. Définition

Un radar primaire est un capteur qui illumine une portion d'espace avec une onde électromagnétique et qui reçoit en retour les ondes réfléchies par les cibles se trouvant dans cet espace. Le terme de « radar primaire » désigne un système radar utilisé pour détecter et localiser des cibles potentiellement coopératives et est spécifique au domaine du contrôle aérien où on l'oppose au Radar secondaire.

3.3.2.2. Fonctionnement

Son fonctionnement est basé sur le principe de l'écho, on émet une impulsion de forte puissance qui est convertie en un front d'onde étroit qui se propage à la vitesse de la lumière (300.000 km/s). Ensuite on écoute les éventuels échos issus de la réflexion. Donc on effectue des émissions, écoute en continu, ce qui permet de couvrir l'espace sur 360°. Les fonctions du radar primaire se traduisent donc par des détections et mesures à l'aide de moyens radioélectriques, la détection étant la décision de présence d'une cible par la reconnaissance du signal utile. On mesure avec un radar primaire :

- la distance D basée sur la durée de propagation de l'onde sur son trajet aller/retour.
- un angle θ basé sur la position d'une antenne directive en azimuth.
- une vitesse radiale par effet Doppler.

On peut donc remarquer qu'un radar situe un objet volant sur un quart de cercle dans le plan vertical, mais on ne peut pas connaître exactement les coordonnées géographiques horizontales, ni l'altitude d'un avion. Ces informations sont obtenues par triangulation de plusieurs radars.

3.3.2.3. Caractéristiques

Le Radar primaire détermine l'azimut et la distance. Et il est à noter qu'il détecte les avions en direction (azimut) mais non en altitude dans un rayon de 50 à 100 Nm.

Les caractéristiques du Radar panoramique SRE sont :

- une fréquence de 3 GHz avec impulsions de récurrence 800 Hz.
- une portée d'au moins 25 Nm et de 10 000 ft.
- une précision de 1° à 2° en azimuth et de 5 % en distance.
- une puissance de quelques centaines de W.
- une antenne parabolique balayant l'horizon au moins 15 fois par minute.
- un rayon d'action de 15 Nm.
- un secteur d'approche situé de 10° de part et d'autre de la piste.

L'avantage du radar primaire est qu'il peut être utilisé pour la surveillance au sol, mais l'inconvénient est que les informations sur la cible sont restreintes.

3.3.3. Le radar secondaire

3.3.3.1. Définitions

Le Radar secondaire de surveillance ou SSR aide le pilote à se repérer et à l'identifier dans un espace aérien contrôlé ou non contrôlé. C'est un dispositif de contrôle aérien qui interroge le ciel. Ce type de radar permet de déterminer, comme tous les radars, la position de l'avion à l'aide d'un gisement et d'une distance relatifs à l'antenne. Le radar secondaire a plusieurs avantages qui lui sont propres. Comme un transpondeur est nécessaire pour être détecté par un radar secondaire, seuls les plots pertinents seront visualisés, les obstacles ou oiseaux n'apparaîtront pas, évitant ainsi une pollution visuelle. Un autre avantage est le fait que des données peuvent être transmises au système radar. Les données dépendent du mode du transpondeur utilisé par l'avion, et des capacités de l'antenne radar. L'IFF permet entre autre d'obtenir l'altitude de l'appareil par mode d'interrogation. Le sigle IFF, (Identification Friend or Foe), désigne un dispositif électronique embarqué développé par les Alliés pendant la Seconde Guerre mondiale permettant, par interrogation radar, d'identifier les aéronefs "amis" ou "ennemis". Le mode d'interrogation 3/C est directement relié à l'altimètre de l'appareil. De par sa conception, le radar IFF est de taille très réduite, d'autre part le trajet de l'information est divisé par deux comparé à n'importe quel radar.

3.3.3.2. Fonctionnement

La cible doit donc être équipée d'un transpondeur, mode A, calé sur un code à quatre chiffres donné par l'opérateur radar ou contrôleur, grâce auquel ce dernier identifie la cible et recueille sa position. Dans ce cas, le radar secondaire interroge le transpondeur qui lui répond. Si le transpondeur est doté d'un alticodeur Mode C, il fournit en plus de la position, le niveau de vol de l'avion qui est en doté. C'est pourquoi, même en navigation hors zones contrôlées, on demande au pilote de brancher son transpondeur sur 7000 car il permet aux radars de le repérer mais aussi et surtout aux avions équipés d'un T-CAS (système de prévention des abordages en vol) de disposer de renseignements sur l'avion. Ainsi, le radar secondaire de surveillance SSR ne détecte pas l'écho renvoyé par une cible mais reçoit une réponse radioélectrique de celle-ci. L'installation au sol envoie des impulsions espacées de 8 microsecondes. Quand l'appareil de bord les reçoit, il renvoie une réponse codée par le pilote sur les directives de l'opérateur au sol (affichage d'un code transpondeur déterminé). Ainsi, un symbole caractéristique apparaît sur l'écran du radar, évitant alors les confusions d'écho. Le Radar secondaire de surveillance est donc utilisé pour identifier les avions équipés d'un transpondeur et ayant pré affichés un code qui permet de situer l'avion en

direction et en altitude parmi les autres. Pour cela, les avions doivent être munis d'un répondeur de bord appelé « Transpondeur ».

3.3.3.3. Les modes

- mode A (Alpha) : Le mode A est le plus simple des modes de transmission de données entre l'avion et le sol. La seule information transmise est un code SSR, de quatre chiffres entre 0 et 7 inclus. Le code sera affiché sur la visualisation radar du contrôleur. Chaque avion se voit attribuer un code unique, donc ce code permet d'établir une relation entre un plot et un avion, d'identifier avec certitude que ce plot correspond à cet avion. On appelle cela l'identification radar. Avec le mode A, le contrôleur dispose donc de la position de l'avion, et d'un moyen d'identification radar.
- 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'avion, transmise au radar, puis visualisée sur l'écran du contrôleur. Souvent désigné par « Alt » sur les transpondeurs actuels.
- mode S (Sierra) : 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'avion pourra être transmis. Au lieu de l'altitude, n'importe quelle donnée pourra être transmise, aussi bien de l'avion vers le sol que du sol vers l'avion. Les applications sont nombreuses.
- modes Militaires : L'IFF effectuée dans les avions militaires les mêmes fonctions que le transpondeur. Il ajoute une fonction militaire d'identification ami/hostile. Il existe différents modes militaires: 1, 2, 3, 3C, 4 et 5. Le mode 3 et 3C sont les équivalents militaires aux modes Alpha et Charlie. Les modes 1, 2, 4 et 5 sont exclusivement militaires. Les modes 4 et 5 sont cryptés et le mode 5 permet un véritable dialogue informatique.

3.3.3.4. Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques du radar secondaire SSR sont :

- une fréquence UHF située entre 1030 Mhz (pour l'interrogation) et 1090 MHz (pour la réponse avec un retard de 2 μ s).

- une puissance moyenne de quelques KW pour l'installation au sol car il s'agit d'une interrogation radioélectrique et d'une puissance faible d'environ 500 W pour l'appareil à bord de l'avion.
- un codage de 4096 codes possibles.
- des antennes dipôles solidaires de la parabole du radar primaire pour assurer le synchronisme.
- ses avantages sont : Une faible puissance, chaque écho est identifiable, et le virage d'identification est inutile, cout moins élevé.

Le radar secondaire est en général associé à un radar primaire avec lequel il est synchronisé. Par contre, le transpondeur ne répond que s'il est interrogé, c'est-à-dire au passage du faisceau radar. Ainsi, le radar secondaire de surveillance (SSR) associé au radar primaire de surveillance (SRE), permet de procéder à l'identification de l'avion équipé d'un transpondeur et à la transmission simultanée de son altitude au contrôle.

3.4. Le système ADS/CPDLC [19][20][21][22][23][24][25][26]

Le système courant de contrôle de trafic aérien se fonde fortement sur des communications en phonie entre les contrôleurs de la navigation aérienne et les pilotes pour retransmettre des instructions de commande et toute autre information critiques au vol expéditif.

Ces communications sont exigées pour soutenir la coordination du mouvement d'avions dans toutes les phases de vol, pour assurer la séparation d'avions, transmettre des bulletins de renseignements et de dégagements, et pour fournir d'autres services dans l'aviation. Pendant que le trafic aérien continue à augmenter, la communication de contrôleur-pilote a grimpé jusqu'au point de saturation au cours des périodes du trafic maximal à beaucoup d'endroits.

Grâce au tandem ADS-CPDLC, les contrôleurs constateront des améliorations importantes au chapitre de la vitesse, de l'exactitude et de l'efficacité par rapport aux procédures anciennement utilisés.

3.4.1. Le système ADS

Le système ADS ou Automatic Dependant Surveillance à été développé par l'OACI dans le cadre du concept « Communication-Navigation-Surveillance » pour améliorer la surveillance dans les zones peu denses. Le principe de l'ADS est comme ceci : un aéronef va transmettre spontanément

et à intervalle régulier au système de contrôle au sol, son adresse, son identification, sa position, sa vitesse, son cap, etc. On distingue deux types d'ADS :

L'ADS-C, les messages sont transmis par liaison de données (Satellite ou VHF) dans le cadre d'un contrat entre l'avion et le centre de contrôle toutes les 15 à 30 mn (5 mn dans des situations particulières). Utilisé principalement en environnement océanique (Océan Pacifique, Atlantique Nord). L'ADS-Broadcast: les messages sont émis vers tout utilisateur équipé d'un système de réception.

Dans l'ADS c'est l'avion lui-même qui diffuse en permanence sa position exacte, fournie par le GPS, sans avoir besoin d'être détecté par un radar. La position de chaque appareil, captée par des stations au sol est alors retransmise aux contrôleurs aériens. Et, fin de la fin. Peut être captée par tous les autres avions en vol (ADS-B). Les pilotes peuvent donc surveiller l'ensemble du trafic aérien autour d'eux. Alors qu'ils n'ont aucun accès aux informations obtenues directement par les radars au sol.

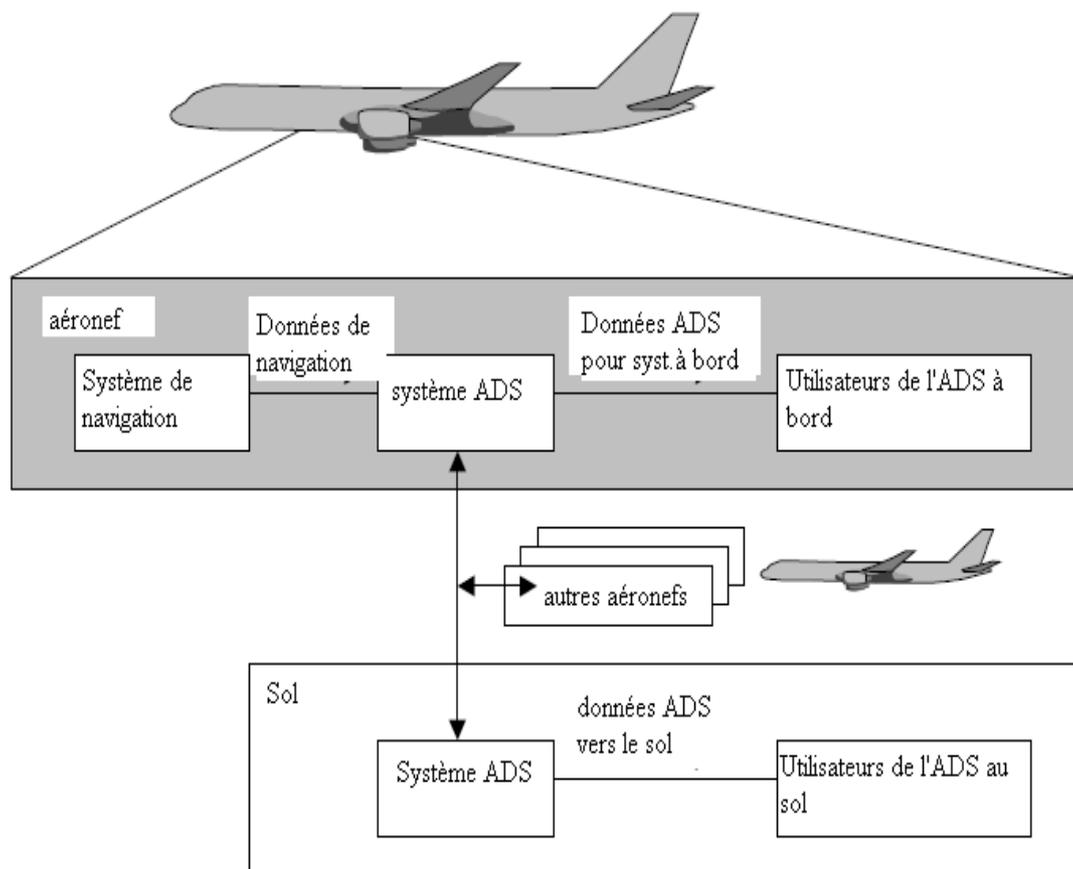


Figure 3.04 : Frontière des systèmes ADS

3.4.1.1. L'ADS-C

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

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

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

Les informations de l'ADS-C sont transmises via des communications point à point, par VHF ou par satellite. Les systèmes sol et embarqués négocient les conditions suivant lesquelles ces transmissions s'effectuent (périodiques, sur événement, à la demande, ou sur urgence). L'ADS-C est typiquement utilisé dans les zones désertiques ou océaniques où il n'y a pas de couverture radar.

Les avantages de l'ADS-C sont :

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

L'inconvénient de l'ADS-C est qu'il dépend entièrement de l'avion et de la correction des données qu'il transmet.

3.4.1.2. L'ADS-B

Avec l'ADS-B ou Automatic Dependant Surveillance - Broadcast, l'avion utilise ses systèmes de navigation satellitaires ou inertiels pour automatiquement déterminer et diffuser sa position et d'autres informations (vitesse, indicatif de vol...).

La position et la vitesse sont chacune transmises deux fois par seconde. Les messages ADS-B (squitters) sont diffusés, par opposition à l'ADS-C qui utilise un protocole de communication point à point. Par conséquent, l'ADS-B est utilisé non seulement pour l'ATC, mais également pour des applications de surveillance embarquées.

Les avantages de l'ADS-B sont :

- l'utilisation pour l'ATC et pour des applications de surveillance embarquées.

- le taux de rafraîchissement élevé.
- la liaison de données air/sol (comme pour le Mode S et l'ADS-C).

Les inconvénients de l'ADS-B sont :

- il dépend entièrement de l'avion et de la correction des données qu'il transmet.
- en 2005, un tiers des avions survolant l'Europe ne sont pas équipés pour l'ADS-B et donc non détectés

ADS-B utilise la navigation par satellite et les liaisons de données afin de permettre à l'avion de diffuser des informations comme identification, position, altitude, vitesse et intention. Cette diffusion d'information permet d'améliorer la connaissance du contexte opérationnel, la résolution de conflits, la surveillance et la gestion de l'espace, afin d'avoir une meilleure efficacité opérationnelle et de capacité accrue.

Le concept de l'ADS-B :

La Surveillance Automatique Dépendante par Diffusion transmet la position de chaque avion qui peut être reçue et communiquée à la fois à l'ATC et aux avions se trouvant dans le champ de visualisation, afin que le pilote et le contrôleur puissent visualiser l'ensemble des avions se trouvant dans le secteur. L'ADS-B peut être utilisé à la fois pour les tâches :

- pour éviter les collisions, et construit afin de continuer à transmettre la dernière position connue après un crash afin de déclencher les recherches et les sauvetages, et peut être connecté pour recevoir des informations complémentaires, par exemple à des équipements de détection météorologique ou à des systèmes inertiels électroniques. En plus des données de position et de navigation classiques, l'ADS-B peut également fournir des informations de relief et d'obstacles, afficher des informations de trafic et, dans certaines limites, des conditions météorologiques dangereuses et à éviter. D'autres avions ont également la possibilité de vous voir sur leur écran, ainsi que l'ATC sur un écran-radar. (ou un écran à cristaux liquides)
- en-route, un pilote peut « voir et éviter » un autre trafic sur écran, une sorte de « VFR dans les nuages ». L'ATC assure le séquençage des arrivées et des départs, et agit comme un filet de sécurité ou secours. De plus, l'ADS-B peut guider l'avion au sol dans le brouillard, en toute sécurité, de la piste d'atterrissage jusqu'au terminal ou vice versa, en indiquant le trafic au sol afin d'éviter les collisions.

3.4.2. Messages ADS

On constate deux types de messages ADS

- le message de liaison montante constitué par un contrat périodique, contrat d'événement, contrat de demande ou décommander un contrat
- le message de liaison descendante constitué par des transmissions depuis l'avion des données selon les contrats

3.4.3. Les informations données par l'ADS

3.4.3.1. La position tridimensionnelle

La position tridimensionnelle des avions ou des véhicules, il y a la latitude, la longitude, l'altitude géométrique et l'altitude barométrique. On note que l'altitude géométrique est l'altitude minimum d'une tangente plate à l'ellipsoïde de terre.

3.4.3.2. La vitesse

Le système rapporte les informations suivantes : vitesse des avions ou véhicules au sol, Angle de trajectoire dérivée par avion, vitesse anémométrique.

3.4.3.3. Données de trajectoire

Les données de position, latitude, longitude, altitude, type de point, changement de direction et de rayon.

3.4.3.4. Données météorologiques

L'ADS est capable de fournir les données météo élémentaires : direction du vent, vitesse du vent, température, turbulence...

3.4.3.5. Données élémentaires

Le système ADS sera extensible afin de soutenir les données élémentaires additionnelles qui seront considérés nécessaire à l'avenir comme l'identité des avions, le temps...

3.4.4. Les contrats ADS

L'aéronef fournit des informations aux services ATC dans les cas suivants :

- contrat à la demande : L'aéronef fournit les informations sur demande du contrôleur aérien

- contrat périodique : L'aéronef fournit des informations périodiquement
- contrat d'événement : L'aéronef fournit des informations lorsque certains événements sont détectés et plus particulièrement : Changement d'un point de cheminement, écart par rapport à la gamme de niveau, changement d'écart latéral.

3.4.5. Les messages d'alerte de l'ADS

3.4.5.1. Alertes

- DAIW : Danger Area Infringement Warning qui permet au contrôleur aérien de surveiller l'évolution de l'aéronef et d'alerter en cas d'intrusion dans une zone réglementée.
- ARCW: ADS Report Conformance Warning Checking, permet de surveiller la conformité de la route du plan de vol et la route programmée à bord de l'aéronef, transmise dans le groupe route prévu du message ADS.
- RAM : Route Adherence Monitoring, surveillance de la route du plan de vol.
- CLAM : Cleared Level Adherence Monitoring, surveillance du niveau de vol autorisé
- APR : compte rendu de position automatique.

3.4.5.2. Les filets de sécurité

- STCA ou Short Term Conflict Area : Alerte de conflit à court terme, avertit le contrôleur quand la distance qui sépare deux aéronefs tend à être inférieure à la minimale requise.

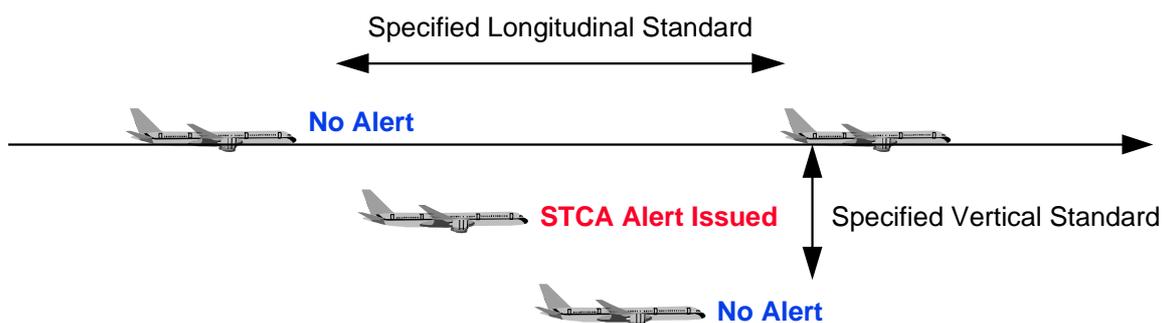


Figure 3.05 : Alerte STCA

- MSAW ou Minimum Safe Altitude Warning : Avertissement de sur l'altitude de sécurité minimale. Avertit le contrôleur si l'aéronef tend à survoler trop bas.

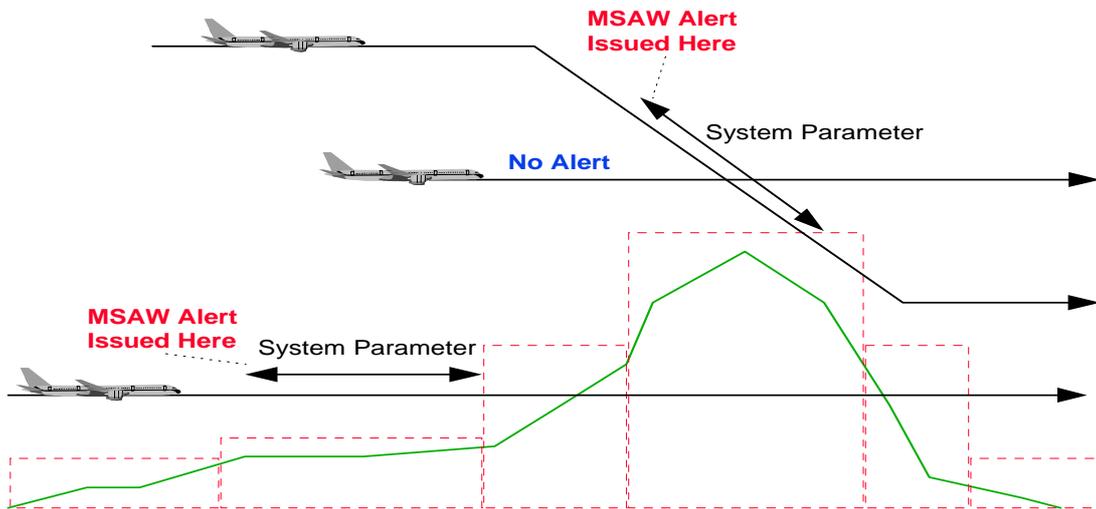


Figure 3.06 : Alerte MSAW

- DAIW ou Danger Area Infringement Warning: Avertissement de violation de secteur dangereux, avertit le contrôleur quand le vol va franchir un secteur bien définie ou réglementé.

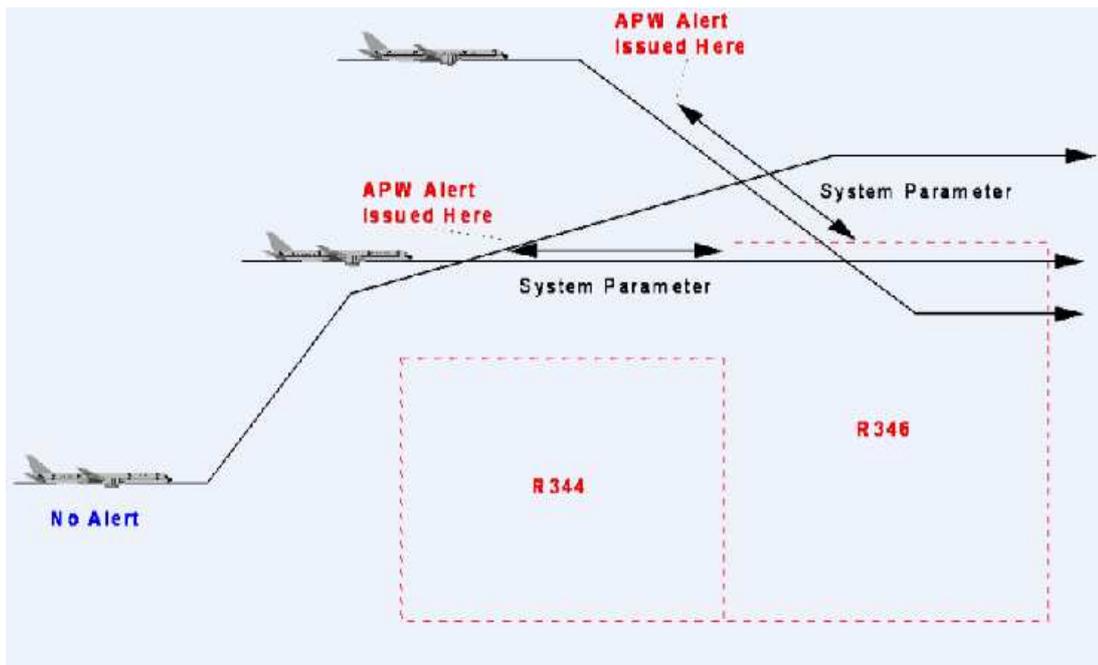


Figure 3.07 : Alerte DAIW

3.4.6. Le système CPDLC

La méthode standard de communication entre un contrôleur au sol et un pilote est la communication vocale par la radio, en utilisant des bandes VHF pour la communication de proximité ou de bande HF pour une communication plus lointaine surtout dans les zones

océaniques. Mais le problème de cette méthode de communication est la saturation des fréquences utilisées car tous les pilotes sont accordés sur une même fréquence. D'où l'utilisation d'une nouvelle méthode, le CPDLC. Ce dernier veut dire Controller Pilote Data Link Communication. C'est une application de liaison de données qui tient compte de l'échange direct des messages de base par texte entre un contrôleur et un pilote. L'application CPDLC fournit des transmissions de données air-sol pour l'ATC. Ceci inclut un ensemble d'éléments de dégivement comme l'information, message de demande qui correspondent à la phraséologie de voix utilisée par des procédures de contrôle du trafic aérien. Le contrôleur peut envoyer les messages suivants : les contraintes de croisement, les déviations latérales, les changements et les dégivements d'itinéraire, les transferts de vitesse, les tâches de radiofréquence, et la diverse demande de renseignements. Le pilote est équipé de possibilités pour répondre aux messages, aux dégivements de demande et l'information, à l'information de rapport, et pour déclarer ou annuler une urgence. Des possibilités de « texte libre » sont également fournies qui peut être non conforme aux formats définis. Des possibilités auxiliaires sont fournies pour permettre au système au sol d'employer la liaison de transmission de données pour expédier un message de CPDLC à un autre système au sol.

3.4.6.1. Les messages CPDLC

Le CPDLC correspond à un ensemble de messages à transmettre par liaison de données et obéissant à des règles définies. Un message CPDLC peut avoir deux formats différents: pré-formaté et en texte libre. Les messages pré-formatés comprennent :

- une partie VOCABULAIRE
- éventuellement une partie PARAMETRES à compléter

3.4.6.2. Les fenêtres de messages

Pour créer et envoyer un message à un aéronef en CPDLC on utilise la fenêtre d'édition ou « CPDLC Editor Window ». Il y a trois types de fenêtres :

- CPDLC Editor Window : fenêtre d'édition, elle permet au contrôleur de rédiger et d'envoyer ses messages.
- CPDLC Current Message Window : fenêtre des messages courants, fenêtre où sont visualisés tous les messages de dialogue en cours entre le contrôle au sol et les aéronefs. Y sont aussi affichés: les messages générés par le système, les messages NDA « Next Data

Authority» (Up), les messages « connection request » (Up), les messages « connection confirm » (Down)

- CPDLC Message History Window : fenêtre historique, permet d'afficher tous les messages de dialogue d'un vol. (Il faut préalablement sélectionner un vol).

3.4.7. Le système ADS/CPDLC spécifique pour Madagascar SAMAD

La mise en œuvre du projet ADS ASECNA à Madagascar concrétise le résultat de cinq années d'études et d'expérimentation menées dans le domaine de l'automatisation et de l'ADS à l'ASECNA. L'exploitation opérationnelle de ce système doit permettre d'améliorer la qualité du service rendu aux usagers et le confort de travail des contrôleurs.

3.4.7.1. Définition

Le système SAMAD est dérivé du système Australien TAAATS et qui a déjà été installé à Maurice et Singapour. La FIR Antananarivo a été choisie pour la mise en œuvre du premier système automatisé de traitement de données de vol, ayant des fonctionnalités ADS/CPDLC et flextracks en raison des activités CNS/ATM importantes des fournisseurs de services ATS et des compagnies aériennes de l'océan indien et pour positionner l'ASECNA dans une zone sous forte influence sud-africaine. Son Objectif est d'évaluer puis mettre en œuvre opérationnellement un système de traitement de données de vol (FDPS) équipé de fonctionnalités ADS/CPDLC.

Les moyens utilisés sont :

- réalisation des spécifications des besoins
- sélection et installation d'un système sol pré-opérationnel éprouvé, répondant aux besoins ASECNA, intégrant un système de Traitement de données de vol de Vol (FDPS), les applications ADS/CPDLC (compatible FANS1/A) et d'un système de visualisation des vols (FPASD) sur routes conventionnelles et flexibles,
- formation des agents d'exploitation,
- rédaction et validation des procédures d'exploitation.

3.4.7.2. Système de visualisation

Le système SAMAD utilise trois méthodes de poursuite des avions dans la FIR Antananarivo :

- le traitement de données de vol (FDPS)
- l'ADS (Automatic Dependant Surveillance)

- le CPDLC (Controller-Pilot Datalink Communication)

3.4.8. Système de Traitement de données de vol (Flight Plan Data Processing System - FDPS)

C'est le cœur du système. En effet le traitement plan de vol du système SAMAD fournit un moyen simple et efficace de gérer les données planes de vol reçues par l'intermédiaire du réseau RSFTA, entrées manuellement (BDP) 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 (Flight Plan Air Situation Display - FPASD). 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, dans le but de simplifier interfaces et coordination avec les centres adjacents.

3.4.9. Fonctionnalités ADS

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 avions basée sur les données de position reçues lors des reports ADS.

3.4.10. Fonctionnalités CPDLC

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).

3.4.11. 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 :

- EMG : message emergency : Alerte CPDLC reçu pilote
- DAIW : Danger or Restricted Area Infringement Warning : le profil de vol indique une pénétration dans une zone de danger ou réglementée,
- ETO : Estimated Time Overflight : Différence entre les heures reportées et celles estimées par le FDPS,
- CLAM : Clearance Level Adherence Monitoring : déviation de l'altitude du niveau de vol accordé,
- ARCW : Automatic Route Comformance Warning : indique 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.

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.

3.4.12. Autres fonctionnalités

3.4.12.1. Système d'Enregistrement et Rejeu

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

3.4.12.2. Supervision

SAMAD permet une équipe de moyens de 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.

3.4.12.3. Simulateur

SAMAD offre un segment simulateur indépendant, composé de 2 positions élève identiques à celle du segment opérationnel et de 2 positions instructeurs, permettant l'établissement des liaisons de données (AFN), l'envoi de reports ADS, l'échange de messages CPDLC et l'envoi de messages RSFTA.

3.4.13. Avantage du système SAMAD

3.4.13.1. Bénéfices Techniques

- les avantages techniques principaux du système SAMAD sont les suivants :

Communications 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,

- intégration air / sol : les aéronefs participent activement au 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.

3.4.13.2. Bénéfices Opérationnels

L'ADS et le CPDLC, nouveaux moyens CNS/ATM mettent à la disposition des services de contrôle du trafic aérien des fonctionnalités, qui couplées à un système de traitement et de visualisation des données de vol ressource permettent :

- 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'avion et de la progression du trafic aérien par le contrôleur
- amélioration du traitement et du transfert de l'information entre les exploitants, les aéronefs et les organes ATS
- extension de la surveillance du trafic aérien
- détection immédiate des erreurs d'insertion de point de cheminement pour les pilotes et autres erreurs grossières
- respect du profil de vol souhaité, dans toutes les phases du vol, en fonction des objectifs de l'exploitant
- amélioration de la détection et la résolution des conflits et adaptation rapide à des conditions de circulation changeantes.

3.4.14. Caractéristiques du système

Les échanges de données Sol-Bord se font selon certaines règles qui sont des protocoles recommandés par l'OACI concernant :

- l'information position (ADS-C)

- la communication contrôleur-pilote (CPDLC)

SAMAD est compatible avec le standard industriel : FANS-1 pour le BOEING car c'est l'appareil le plus utilisé à Madagascar. Le réseau utilisé pour communiquer est le réseau ACARS ou Aircraft Communication Addressing and Reporting System. Les sociétés fournissant un service ACARS sont: SITA pour les pays européens et ARINC plutôt pour les pays ANGLO-SAXON.

Les données sont échangées via les réseaux satellite et SITA. L'échange de données entre les avions et le centre de contrôle inclut : la position de l'aéronef, les intentions du pilote ou les autorisations de contrôle, les messages de communication.

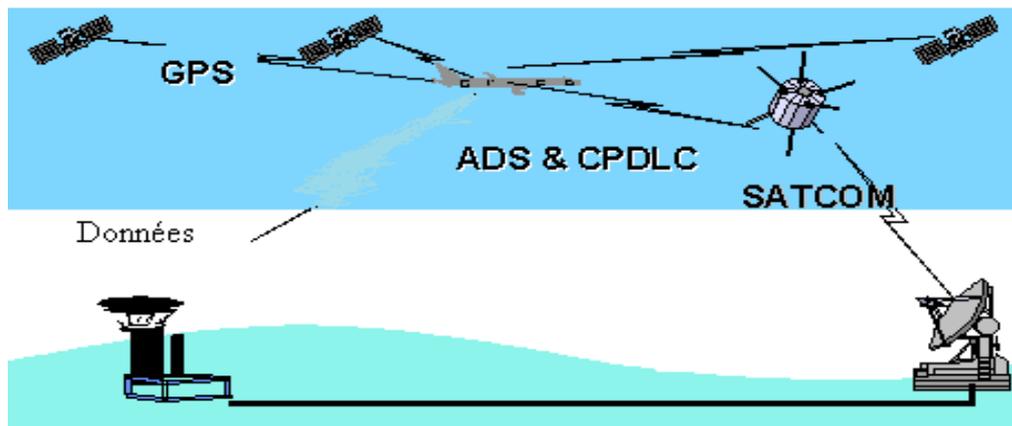


Figure 3.08 : Concept data link Air-Sol

Les dialogues de données via le réseau ACARS remplacent les communications phoniques. Des messages textes pré-formatés sont échangés entre l'aéronef et un système de contrôle. Des messages libres peuvent être utilisés là où les messages pré-formatés ne suffisent plus. Un avion équipé ADS-C peut maintenir une connexion et envoyer des reports jusqu'à cinq destinataires différents. Chacune de ces connexions est indépendante (elle a son propre taux de report et son propre contrat). Toute tentative d'envoi de messages par d'autres centres ATC se traduira par le rejet de ces messages par l'avionique elle-même sans présentation au pilote.

3.5. Les systèmes de communications de données en VHF [7][8][27]

Les communications vocales air/sol sont peu performantes : large spectre utilisé au regard de la quantité d'information transmise, adaptées aux communications entre acteurs humains. D'où on a besoin de support de communication entre calculateurs qui est nécessaire pour une automatisation de l'ATC et pré-requis pour la mise en place de l'ATM.

Besoins spécifique des compagnies aériennes sont :

- communications AOC (opérationnelle compagnie)
- faciliter les opérations de maintenance avion
- un système de communication unique serait souhaitable

3.5.1. Le réseau ACARS

ACARS ou Aircraft Communications and Reporting System 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: échanges AOC (Airline operational control) et échanges ATC. Il en service depuis 1977. Ses principales clientèles sont : les principales compagnies mondiales, principales compagnies régionales US, aviation d'affaires. Avec un volume d'échange de plus de 250,000 de messages par jour, 10 millions de messages par mois, plus de 25 messages par vol. Avec les types de message : Airline Operational Control (AOC), Airline Administrative Control (AAC), Air Traffic Control (ATC).

3.5.1.1. Caractéristiques techniques

Utilise des canaux VHF standards

- 25 kHz
- canaux réservés exclusivement en Europe + canaux sur gros aéroports

Utilise une modulation MSK (bas débit)

- compatible avec les radios VHF de bord (modem externe à la radio, dans le Management Unit)
- débit de 2400 b/s

Utilise à bord la même radio que pour les communications vocales et nécessite un ordinateur qui gère la partie protocole de communication (modem) et la couche application. Le réseau de télécommunication ACARS/SITA qui est organisé autour d'un centre unique de traitement mondial (Singapour)

- annapolis est le centre de traitement d'ARINC
- s'appuie sur un réseau sol/sol X25 mondial
- structuré autour de plusieurs nœuds principaux (Londres pour l'Europe)

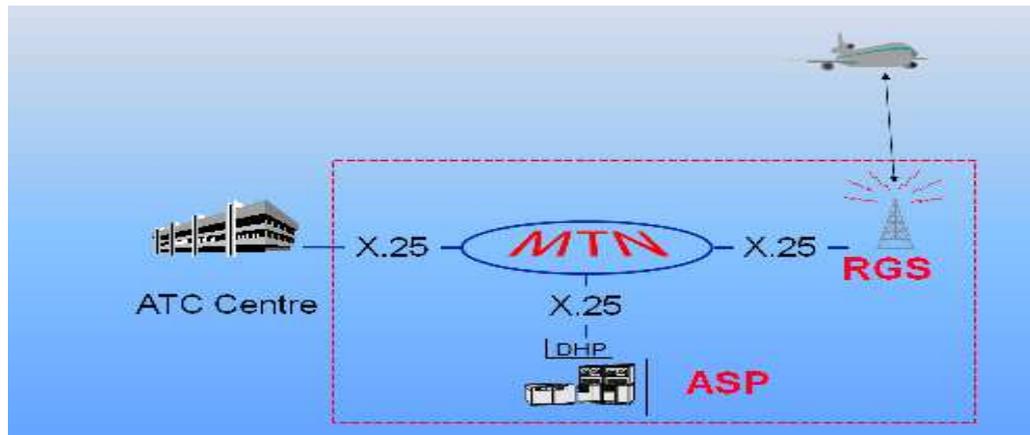


Figure 3.09 : Architecture technique air-sol

RGS: Remote Ground Stations

ASP: Aircom Service Processor

MTN: Mondial Telecommunication Network

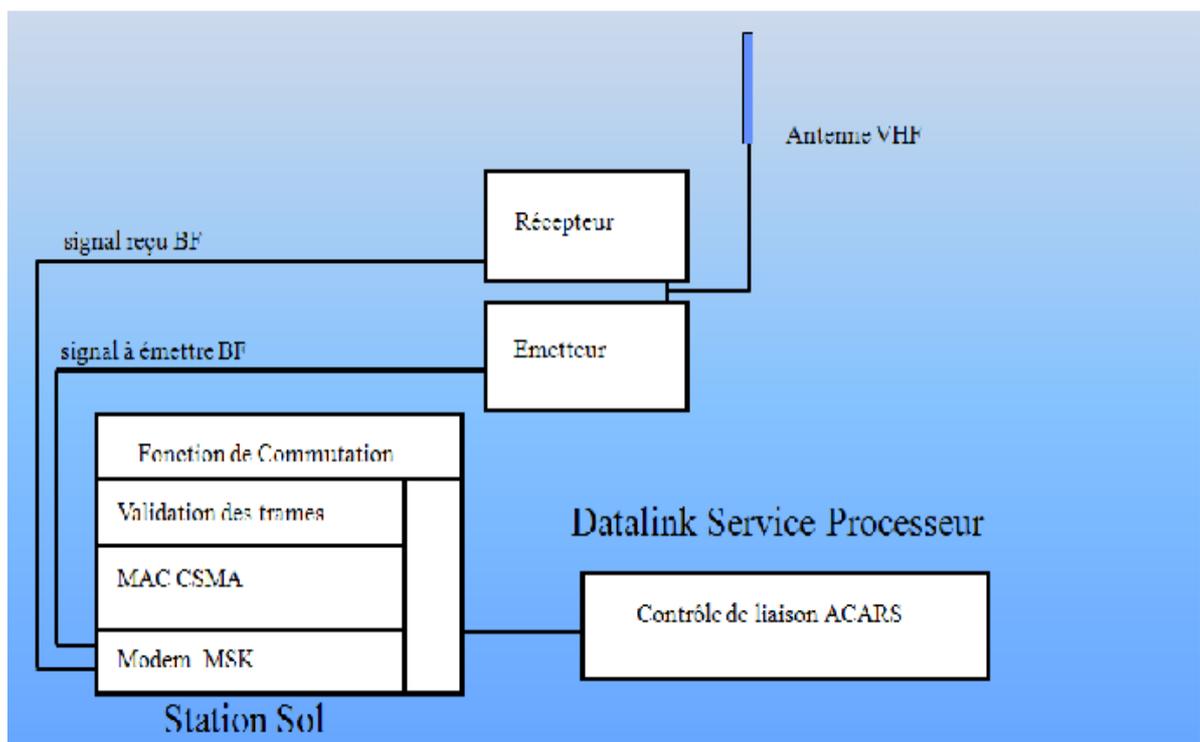


Figure 3.10 : Architecture de la station au sol

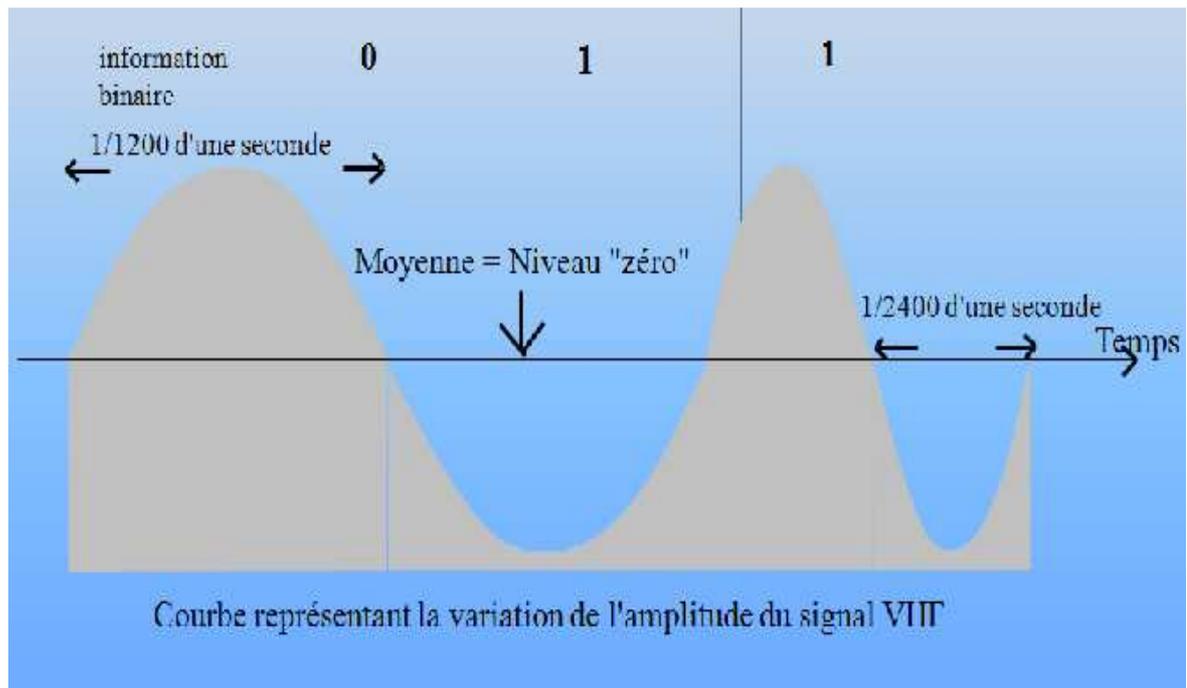


Figure 4.11 : Modulation ACARS VHF (MSK)

3.5.1.2. Evolution du réseau ACARS

- 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 (émulation ATN sur ACARS identique au processus Uencoding sur Internet) ; utilisation de la couche liaison de la VDL mode 2 pour transmettre les trames ACARS, d'où : Augmentation significative du débit, Pas de besoin de modifier les applications existantes, Meilleure robustesse de la liaison, Réduction des collisions.

3.5.2. La VDL mode 2 ou sous réseau VHF

C'est un système conforme à la structure OSI (ISO) et aux exigences de l'ATN. Avec mode d'accès canal de type CSMA « Écouter avant d'émettre ». Système ne permettant pas d'éviter les collisions entre messages.

3.5.2.1. Caractéristiques techniques

- utilise des canaux VHF standards : 25 kHz et 4 canaux réservés exclusivement au niveau mondial (4 canaux supérieurs)
- utilise une modulation numérique D8PSK avec un débit de 31500 bit/s
- nécessite une radio numérique à bord
- nécessite une radio numérique (couche 1 et 2 -couche MAC-)
- nécessite un calculateur (CMU) qui gère les couches 3 et une partie de la couche 2, ainsi que les couches supérieures (partie application)
- l'utilisation de radio multi mode est une solution économique (VDR comportant les modes vocaux 25 et 8,33 kHz ainsi que les modes numériques VDL)

3.5.2.2. Comparaison ACARS et VDL

ACARS :

- modulation Minimum Shift Keying (MSK)
- 1 bit/symbole et 2400 symboles/seconde

VDL :

- modulation Differential 8-Phase Shift Keying (D8PSK)
- bits par symbole et 10500 symboles par seconde
- augmentation = $315000/2400 = 1312\%$

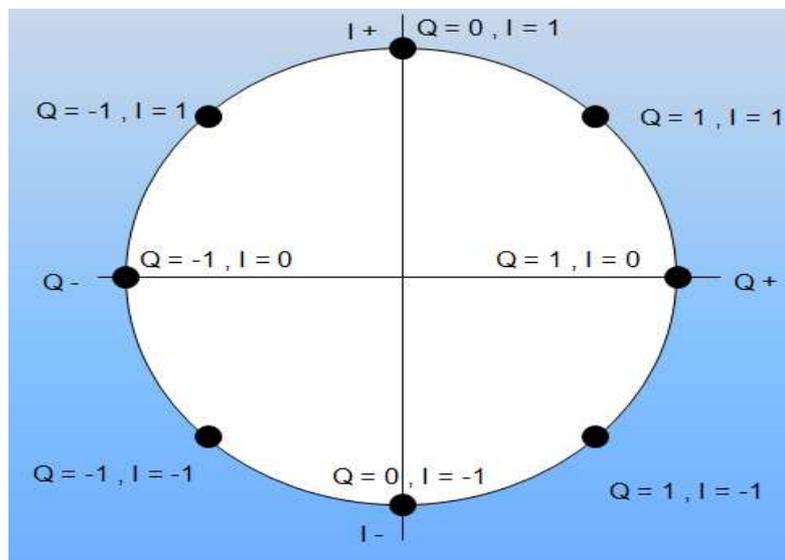


Figure 3.12 : Schéma de modulation D8PSK

Après la transmission d'un état, il est possible de continuer de transmettre le même état ou de passer à un des 7 autres états. Il y a donc 8 possibilités ce qui permet d'encoder 8 combinaisons binaires, et donc trois bits, par symbole de modulation.

3.5.2.3. Evolution futur du système VDL

- mise en œuvre à terme d'un mode d'accès plus performant utilisant les techniques TDMA (Time Division Medium Access) ou CDMA (Code Division Medium Access): (ETDMA, WCDMA, etc...)
- normalisation des interfaces entre les couches sous réseau et la couche ATN ou IP pour gérer les qualités de service dans les couches sous réseau.
- possibilité d'intégration voix et données sur un même canal physique permettant les communications simultanées indépendantes et sans interférence VDL mode 3 mais cette solution à été abandonnée.
- indépendance voix/données privilégiée.

3.6. Conclusion

Un système de contrôle automatisé du trafic aérien a pour but d'aider le contrôleur aérien à remplir sa mission de contrôle. Ce système est composé de plusieurs sous-systèmes électroniques et informatiques interconnectés. L'automatisation de certains procédés du contrôle du trafic aérien à été une grande révolution dans l'histoire de l'aéronautique, ainsi la sécurité des avions à augmenté et le travail des contrôleurs diminué. Néanmoins la vigilance des deux entités pilotes et contrôleurs ne doit jamais être négligé car les possibilités de conflits existent toujours.

CHAPITRE 4 : LA GESTION DU TRAFIC ET CAS DE CONFLIT

4.1. Introduction [28]

Avant le décollage plusieurs procédures sont faites par les pilotes et les contrôleurs au sol. Et cela en commençant par le remplissage du formulaire du plan de vol. On désigne par gestion du trafic aérien l'ensemble des méthodes et moyens destinés à permettre l'écoulement du trafic. Il regroupe les aérodromes, les moyens de navigation, de communication et de détection, l'organisation de l'espace, les procédures de contrôle, les personnels impliqués,... La gestion du trafic aérien a de très fortes contraintes de sécurité, mais aussi d'efficacité. Quelques thèmes évoqués ont été déjà vu dans les chapitres auparavant, mais le principal but de ce chapitre est les procédures utilisées avant le décollage et les niveaux de sécurité requise en illustrant par le cas de collision. Globalement le taux d'accident catastrophique (perte totale de l'appareil) est de l'ordre de 10^{-8} par heure de vol. Et en ce qui concerne les collisions en vol, l'OACI a fixé pour la zone transatlantique, une valeur seuil qui peut être prise comme référence, qui est de $2,5 \cdot 10^{-9}$ par heure de vol.

4.2. Le plan de vol [28][29][30]

La première procédure à faire avant d'entamer un vol est la mise en connaissance des autorités responsable du trafic l'itinéraire et les caractéristiques du vol ou « le dépôt de plan de vol ». Un plan de vol est l'ensemble des renseignements intéressant un vol et permettant de décrire précisément sa trajectoire, l'aéronef utilisé, et les règles qui seront appliquées à ce vol. Tout vol contrôlé doit faire l'objet d'un dépôt de plan de vol. Les plans de vol commerciaux sont déposés longtemps à l'avance (sur une période de 6 mois), ce qui permettra de faire des prévisions du trafic. Par contre de nombreux vols non réguliers ne sont connus que tardivement. Le plan de vol contient les informations décrivant le vol prévu : type d'avion, immatriculation, heure de décollage prévue, aérodromes de départ et d'arrivée, route prévue, niveau de croisière souhaité... A partir de ces données, et en utilisant un modèle de performance avion, on détermine quels secteurs de contrôle seront traversés par le vol, et on communique en temps voulu les informations nécessaires aux contrôleurs concernés. Ces informations sont l'indicatif et le type de l'avion, son niveau de vol courant, le niveau demandé, et les heures de passage estimées sur les balises de la route.

4.2.1. La préparation du vol

Une préparation minutieuse et détaillée doit être obligatoirement précéder tout voyage aérien. Cela pour éviter toutes sortes de problèmes qui pourraient engendrer une défaillance, une panne ou d'autres problèmes graves. La préparation du voyage dépend des conditions météorologiques et de la visibilité du moment, de la nature des régions à traverser, des zones à restrictions à contourner ou à pénétrer, de l'autonomie de l'avion. Son objectif est :

- de construire une trajectoire en conformité avec la réglementation et les espaces aériens nominaux ou éventuels en cas de déroutements.
- d'intégrer la météo en route et à l'arrivée. A noter que la météo au départ a aussi son importance, mais le pilote part rarement par mauvais temps. En outre trajectoire et météo conduisent au calcul du temps de vol.
- de déterminer, en fonction de ce temps de vol, la quantité de carburant nécessaire (délestage + sécurité + déroutement + réserve) et de choisir, parmi les procédures de suivi de consommation indiquées dans le manuel de vol ou recommandées par l'exploitant, celle qui est la plus adéquate.

4.2.2. Dépôt de plan de vol

Un plan de vol peut être déposé de trois façons :

- plan de vol répétitif (RPL) utilisé par les compagnies aériennes pour décrire des vols réguliers.
- plan de vol déposé (FPL), formulaire déposé avant le vol décrivant la totalité du vol. C'est le plus souvent à ce type de plan de vol auquel on fait référence
- le plan de vol réduit, déposé en vol par radiotéléphonie à un organisme de la circulation aérienne, sous la forme d'éléments intéressant une partie du vol.

Un plan doit être obligatoire dans les cas suivants :

- tout vol IFR
- tout vol qui devra franchir des frontières
- pour le vol VFR de nuit (voyage-navigation hors vol local)
- pour les survols maritimes au-delà de la distance la plus faible des 2 distances suivantes : distance permettant en cas de panne d'un moteur, d'atteindre une terre se prêtant à un atterrissage d'urgence ; distance égale à 15 fois l'altitude de l'aéronef.

- tout vol devant évoluer dans des régions, sur des routes ou pendant des périodes désignées par arrêté du ministre chargé de l'aviation civile pour faciliter la fourniture du service d'alerte ou les opérations de recherche et de sauvetage (zones inhospitalières)
- tout vol devant évoluer dans des régions ou sur des routes désignées par arrêté du ministre chargé de l'aviation civile pour faciliter la coordination avec les organismes militaires ou les organismes de la circulation aérienne d'états voisins et éviter la nécessité éventuelle d'une interception aux fins d'identification.

Le dépôt d'un plan de vol est obligatoire quelque soit le régime de vol choisi (VFR ou IFR). Le modèle de plan de vol utilisé est conforme au plan de vol OACI et le plan de vol doit être déposé 30 minutes au moins avant l'heure de départ prévue au bureau de piste de l'aérodrome de départ, dans le cas seulement où le FPL peut être transmis aux organismes destinataires. Lorsqu'il se produit un retard de plus d'une heure par rapport à l'heure de départ prévue, un nouveau FPL doit être déposé et l'ancien FPL annulé.

4.2.3. Formulaire du plan de vol

Il s'agit d'un formulaire remis aux organismes de la circulation aérienne. Il comporte les éléments suivants :

- identification de l'aéronef
- règles et type de vol
- nombre et type d'aéronef, catégorie de turbulence de sillage
- équipement
- aérodrome et heure de départ
- vitesse et niveau de croisière
- route
- aérodrome d'arrivée et durée totale estimée
- 1^{er} et 2^e aérodromes de décollage
- autonomie
- nombre de personnes à bord
- moyens de secours, couleurs et marques de l'aéronef
- les remarques
- nom du commandant de bord.

L'organisme qui reçoit le plan de vol doit le vérifier, éventuellement le modifier et en communiquer l'acceptation.

4.3. La communication [7][8]

Une des procédures de sécurité efficace utilisée pour établir le contact entre le sol et l'aéronef est la communication vocale. Il peut y avoir plusieurs types de communication

4.3.1. Les types de communications vocales

4.3.1.1. Les communications AOC

Les communications AOC ou Aircraft Operation Communications correspondent aux échanges liés à l'exploitation entre les avions d'une compagnie et leur base c'est-à-dire :

- gestion de la logistique à l'arrivée d'un vol
- coordination des correspondances (gestion « hub »)
- échanges de paramètres liés au suivi technique du vol

Ces échanges sont de plus en plus automatisés en liaisons de données, ces communications devraient à court et moyen termes être transformées en échange de données: c'est le domaine qui justifie le plus la mise en place de data-link air/sol.

4.3.1.2. Les communications AAC

Les communications AAC ou Airline Administrative Communications regroupent l'ensemble des communications liées aux besoins de la compagnie exploitante c'est-à-dire :

- changement de programme lors d'une rotation
- gestion des déroutements et échanges divers

4.3.1.3. Les communications APC

Les communications APC ou Aircraft Passenger Communications correspondent au service de correspondance publique offert sur avion c'est-à-dire :

- besoin émergeant depuis moins de 10 ans
- service de base du système AMSS/SATCOM d'Inmarsat

4.3.1.4. Les communications ATS

Les communications ATS ou Air Traffic Services regroupent:

- les services de communications relatifs à l'information en vol : FIS (Flight Information Service) qui sont : les informations météorologiques, informations générales (ex: fréquences radio de certains services)
- les services de communications de contrôle du trafic aérien : ATC (Air Traffic Control)
- les actions de contrôle comme la clairance et le compte rendu systématique de vol

4.3.1.5. Les communications ATC

Quelque soit l'espace aérien concerné, la voix est le moyen primaire de communication car il assure une fonction de sécurité: plus les espacements seront faibles plus la fonction communication sera critique, c'est le cas de l'Europe occidentale et des USA. En zone océanique avec des espacements de 100 Nm les communications sont moins critiques c'est-à-dire qu'il n'est pas très efficace d'où le contenu sémantique des messages est faible.

4.3.1.6. Les besoins opérationnels

Pour la catégorie ATS/ATC les besoins opérationnels sont :

- assurer les communications de sécurité entre avions et service du contrôle aérien
- disponibilité élevée : exigence de redondance des segments sol et bord, protection des services contre les interférences
- assurer les échanges d'information relative aux services d'information en vol : exigences moins sévères

Pour la catégorie APC:

- besoin spécifique nécessitant la mise en œuvre de système spécifique : problème des bandes de fréquences, intégration avion et garantie de non interférence
- compétition entre plusieurs technologies: réseau satellite (GEO, MEO ou LEO) et réseau cellulaire sol

4.3.2. Les bandes de communication aéronautique

Le service mobile de communication aéronautique couvre aujourd'hui quatre bandes de fréquences:

- la bande HF en zone océanique ou désertique
- la bande VHF en zone continentale (limité par la visibilité optique d'une station sol)

- la bande UHF en zone continentale (même limitation) réservée aux avions militaires opérant dans des espaces civils
- la bande L réservée aux communications par satellite

4.3.2.1. La communication HF

Utilisé pour les besoins des zones océaniques et désertiques la bande de fréquence HF utilise la gamme de 3 MHz à 30 MHz. Son utilisation est d'augure pour les espaces où les séparations sont larges (entre 50 et 100 Nm entre avions). Les ondes ne se propagent pas seulement en ligne droite, et c'est bien ce phénomène qui est utilisé pour porter à des distances qui vont très largement au-delà de l'horizon. Les ondes HF voyagent en se réfléchissant sur plusieurs couches invisibles de l'atmosphère. Ces couches sont formées par la réaction de l'air atmosphérique aux particules solaires, elles dépendent donc de l'ensoleillement, et pour simplifier, elles sont tour à tour réfléchissantes ce qui est bon pour la propagation et absorbantes, ce qui l'est nettement moins, bien sûr. Pour porter loin, il faut descendre le plus possible la fréquence des ondes. Alors pour porter le plus loin possible, on en arrive à la limite de ce qui est nécessaire pour transporter une voix humaine intelligible. C'est ainsi que la seule solution possible est l'emploi des ondes dites «Hautes Fréquences».

Les avantages du système HF sont:

- couverture très large bénéficiant d'une propagation multimodale : onde directe, onde de sol, réflexion sur les couches de l'atmosphère
- technologies simple
- équipements bon marché
- maintenance aisée et peu coûteuse
- coût d'exploitation modéré: les stations sont implantées sur les mêmes sites que les centres de contrôle

Les points faibles du système HF sont :

- mauvaise qualité de la liaison (fading)
- bruit de fond important (y compris sans trafic) : pas de protection d'un canal par rapport aux autres services qui le partagent
- station sol assez complexe : gestion de plusieurs fréquences dans une bande large

Une des particularités du système de communication HF aéronautique est le système SELCAL : Le SELCAL est un dispositif d'appel sélectif du centre de contrôle vers l'avion en vol. C'est un véritable outil de sécurité et de confort puisqu'il permet à l'équipage d'être appelé en tant que de besoin par le contrôle et par conséquent de baisser le volume de veille de la HF. Le SELCAL comporte un code de 4 lettres propre à chaque avion que le contrôleur compose pour faire retentir une sonnerie dans le cockpit de l'avion. En entrée de zone HF, un test SELCAL est exécuté pour vérifier si ce dispositif fonctionne et en particulier, si le code avion est le bon.

Son objectif est de:

- identifier automatiquement le destinataire du message sol-air, cela facilite le travail des équipages
- transmettre un entête codé au message vocal : chaque avion a une adresse affectée ; le code est transmis en MSK ; le silencieux bord est activé sur décodage de l'adresse avion

4.3.2.2. La communication VHF

La bande aéronautique VHF est une bande de fréquences du spectre radioélectrique. Elle est utilisée pour les communications à courte et moyenne distance entre les pilotes et le personnel des stations au sol. Elle permet de transmettre des clairances et des informations importantes pour la sécurité de la circulation aérienne et l'efficacité de la gestion du trafic aérien. Elle est également utilisée pour la radionavigation (balises pour la navigation en route, l'approche et l'aide à l'atterrissage). La bande de fréquence utilisée couvre 118 - 137 MHz, 760 canaux espacés de 25 kHz avec une modulation d'amplitude à double bande latérale (DSB-AM) et un fonctionnement canal en alternat. La portée des ondes VHF étant quasi-optique, cette bande est utilisée pour des communications à courte ou moyenne distance. Pour des communications sur de grandes distances (traversée des océans, etc.), la bande HF est utilisée. La portée D (en milles nautiques) entre un aéronef de hauteur H (en pieds) et une station au sol de hauteur h (en pieds) est exprimée par la relation :

$$D = 1,23(\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad (4.0.1)$$

Les avantages du système VHF sont :

- couverture limitée à la portée optique
- propagation stable: bonne qualité de transfert vocal, puissance faible, faible distorsion, système de suppression du bruit efficace

- technologie très développée : faible coût des équipements, matériel très compact facilement intégrable
- fiabilité des composants radio très élevée

Les limites du système sont :

- nécessite l'exploitation de nombreuses stations déportées : coût d'exploitation élevé lié aux liaisons sol-sol entre centre et station, requiert une supervision centralisée des stations isolées
- couverture limitée à la portée optique

4.3.2.3. La communication UHF

La bande aéronautique internationale est nommée bande UHF afin d'être différenciée de la bande VHF proprement dite. Cette bande est utilisée en aéronautique militaire. La bande de fréquence utilisée couvre 240 - 410 MHz.

Ses caractéristiques sont :

- réservée aux besoins militaires
- bande gérée par l'ARFA (Agence de gestion des fréquences de l'OTAN)
- canaux espacés de 25 kHz : Modulation d'amplitude à double bande latérale (DSB-AM), fonctionnement canal en alternat.

Elle permet une utilisation dans les espaces aériens civils en « couplage » avec les communications en VHF :

- une fréquence UHF associée à chaque fréquence VHF
- permet aux avions d'arme de ne pas embarquer des radios VHF
- dans un même secteur de contrôle, garantit, pour le contrôleur, la transparence des communications civiles et militaires

4.3.2.4. La communication par satellite

Les bandes de fréquence utilisées couvrent:

- 1545 - 1555 MHz pour la liaison satellite - avion
- 1645 - 1655 MHz pour la liaison avion - satellite
- système AMSS conforme au standard INMARSAT (SDM) : système recommandé par le comité FANS pour remplacer la HF dans les zones océaniques

Points forts du système AMSS AERO-H :

- système multifonction : voix (vocodage à 9,6 kbps), données, correspondance publique (voix et fax)
- couverture mondiale (4 Géostationnaires): exception des régions polaires
- bonne qualité (pas les inconvénients de la HF)

Points faibles du système AMSS :

- coûts du matériel bord élevé : pas de redondance (antenne à balayage) : pas de fonction critique
- coûts d'exploitation élevés
- situation de monopole générant des coûts de communication sans référence au marché
- utilisation faible : problème de rentabilité
- pas d'application ATS vocales opérationnelles : problème de coût d'exploitation
- préférence aux communications de données (CPDLC) : plus proche du modèle anglo-saxon avec opérateur
- faible proportion d'avions équipés : liée aux accords entre compagnies et opérateurs

4.4. Quelques définitions importantes [29]

4.4.1. La clairance

Une clairance est une autorisation. Ce n'est pas un ordre, mais une garantie de la part du contrôleur, de l'absence de danger connu si le pilote suit sa clairance. Si la clairance ne convient pas au pilote, il est libre d'en demander une autre au contrôle. Le but de tout le monde est de faire arriver l'avion au parking de sa destination sans problème, et suivre la clairance du contrôle est le meilleur moyen pour cela. Les pilotes le savent, et acceptent dans la mesure du possible les clairances du contrôle. Une clairance doit être obtenue pour effectuer un vol contrôlé ou la partie contrôlée d'un vol. Un pilote doit demander une clairance aux organismes du contrôle de la circulation aérienne au plus tard à l'entrée de l'espace aérien contrôlé considéré. Les clairances ne dégagent en aucune façon la responsabilité du commandant de bord vis-à-vis du respect des règlements et procédures en vigueur, ni de l'exercice d'une vigilance constante en vue d'éviter les abordages avec les autres aéronefs ou les collisions avec les obstacles. Inversement, les clairances doivent être délivrées uniquement dans le but de fournir le service de contrôle. Il ne doit pas être délivré de clairance qui, si elle était suivie par le commandant de bord, entraînerait une violation

des règles de l'air. Voici quelques exemples de clairance : Clairance de roulage, de décollage, en route, complémentaires, approche a vue, séparation à vue et clairance VMC.

4.4.2. L'espace

Un espace est un des moyens utilisés par les services de la circulation aérienne pour assurer le service de contrôle. Il consiste à ménager entre deux aéronefs une distance verticale ou horizontale permettant de garantir la sécurité. L'espace vertical le plus courant est de mille pieds (environ 300m). Cet espace est assuré grâce à l'altimètre des aéronefs, qui a une grande précision (l'erreur maximale est de l'ordre de 300 pieds, ou 100m). Cependant, la précision des altimètres diminue avec l'altitude, donc au dessus d'une certaine altitude, la norme d'espace passe en général à 2000 pieds. L'espace horizontal est plus varié, environ 9 km. Les moyens utilisés pour obtenir la position des aéronefs varient suivant les espaces. Quand cette position est obtenue au moyen du radar, l'espace à assurer est appelé norme radar, et dépend de la précision des moyens radars. Les normes les plus courantes sont 8 ; 5 et 3 miles nautiques.

4.5. Les conflits dans le trafic aérien [32][33][34][9][31]

La gestion de trafic aérien (ATM, pour Air Traffic Management) a pour objectif de permettre aux aéronefs de réaliser leur vol selon leurs préférences (en matière d'horaires, de vitesse, de niveau de vol) tout en assurant leur sécurité. En particulier, le contrôle du trafic aérien (ATC, pour Air Traffic Control) assure la séparation entre aéronefs au cours de leur vol. Une situation où les normes de séparations entre aéronefs sont potentiellement violées est appelée « conflit ». La détection et la résolution des conflits font partie des missions du contrôle aérien. La conception d'outils fiables d'aide à la détection et à la résolution pour le contrôleur aérien, répond à l'enjeu de l'augmentation de la capacité du contrôle et de la capacité de l'espace aérien en termes de nombre de vols. La résolution de conflit repose généralement sur l'exécution par un ou plusieurs aéronefs de manœuvres d'évitement : en général, manœuvres de déviation dans le plan horizontal, dans le plan vertical, ou modification de la vitesse de croisière. Ces manœuvres sont similaires à celles ordonnées par les contrôleurs aériens.

4.5.1. Normes de séparation

Afin de disposer d'une marge de sécurité, on définit des normes de séparation entre aéronefs, à la fois dans le plan vertical et dans le plan horizontal :

- la distance normale de séparation horizontale, en contrôle radar en route est actuellement entre 5 et 8 NM selon les saturations.
- dans le plan vertical, on considère que deux avions sont séparés s'ils sont stabilisés sur des niveaux de vol voisins. Toutefois, en ce qui concerne les avions évolutifs en montée ou en descente, l'incertitude sur les vitesses verticales, ainsi que les valeurs susceptibles d'être atteintes, imposent des marges beaucoup plus larges d'environ 300 m.

L'objectif premier de la gestion du trafic est de garantir que tous les aéronefs contrôlés restent en permanence séparés, soit dans le plan horizontal que dans le plan vertical.

Remarques : Pour deux avions de même type, dans des conditions atmosphériques similaires, les taux de montée ou de descente affichés peuvent varier sensiblement en fonction de la masse, de consignes compagnie, ou de pilote. Un avion commercial évolue couramment à 1500 ft/mn, mais peut dépasser 3000 ft/mn en descente. Certains avions d'affaires atteignent 6000 ft/mn en montée. Ces chiffres sont à mettre en parallèle avec le taux de rafraîchissement de l'image radar en route, qui est de 10 s, avec de plus un retard de 5 à 10 s entre détection et affichage. Le contrôleur ne peut pas donner de consigne de vitesse verticale, d'une part parce qu'il ne connaît pas précisément les limitations de chaque avion, d'autre part parce qu'un taux de montée inadapté peut entraîner une surconsommation importante.

4.5.2. Conflits et clusters

Détecter les conflits entre deux avions consiste à savoir si ces deux avions vont se retrouver en perte de séparation dans le futur (violation simultanée de la norme horizontale et de la norme verticale). On voit donc que la détection de conflits s'appuie sur la prévision de trajectoire et que, celle-ci étant imprécise, on pourra détecter certains avions comme étant en conflit potentiel, alors que, dans la réalité, le conflit n'aura jamais lieu. Lorsque deux avions sont sur des trajectoires qui risquent de les amener à violer les normes de séparation, on dit qu'ils sont en conflit, c'est-à-dire que deux avions sont en conflit lorsqu'à un instant de la situation anticipée, leur différence d'altitude est inférieure à une norme de séparation verticale et que simultanément la distance entre leurs projections dans le plan horizontal est inférieure à une norme de séparation horizontale. Le rayon de détection doit être suffisamment important pour assurer que deux avions qui seraient en conflit au cours des prochaines minutes seront identifiés comme étant en conflit. Un cluster d'avions est une fermeture transitive d'avions en conflits potentiels. Si l'avion A est en conflit potentiel avec l'avion B et si l'avion B est en conflit potentiel avec les avions C et D, alors on dit

que les avions A, B, C et D appartiennent au même cluster. On trouvera par la suite l'expression conflit à n avions qui signifie en fait cluster à n avions. Ainsi, dans l'exemple présenté dans la figure 5.1, l'avion B est en conflit avec l'avion A, et l'avion A est en conflit avec l'avion C. L'avion D n'est pas en conflit. On définit donc le cluster (A, B, C), l'avion D restant indépendant.

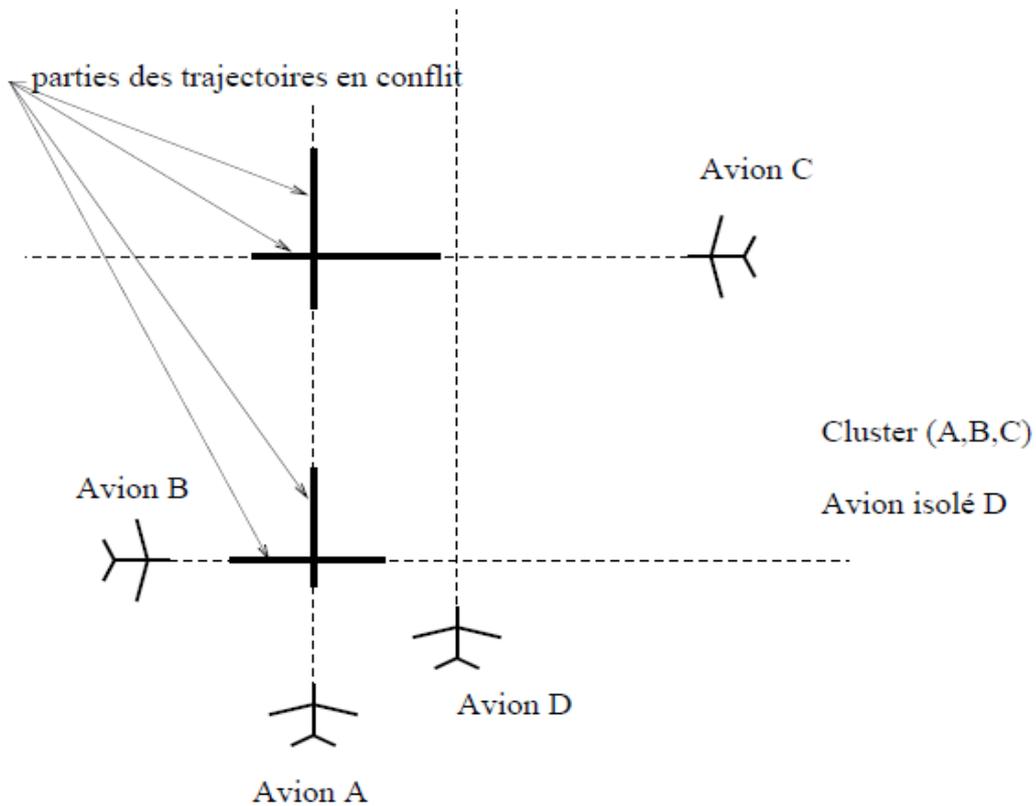


Figure 4.01 : Exemple de cluster

4.5.3. Détection des conflits

4.5.3.1. Cadre mathématique

Considérons la figure 4.02, un conflit classique entre deux avions évoluant à des vitesses \vec{v}_1 et \vec{v}_2 , qui sont constantes et convergeant sous un angle α .

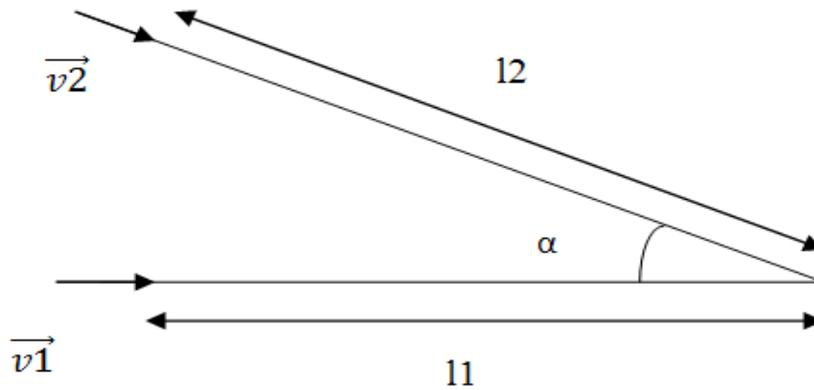


Figure 4.02 : Conflit à deux avions

Soient : $r = v_2/v_1$

D = séparation standard

A_1 = l'avion sur le segment inférieur, à une distance l_1 du point de croisement.

Nous souhaitons savoir dans quel intervalle du segment supérieur se trouvent les appareils conflictuels. Nous avons dans un repère orthonormal les équations:

$$x_1 = v_1 t - l_1 \quad (4.01)$$

$$y_1 = 0$$

$$x_2 = \cos(\alpha) (v_2 t - l_2)$$

$$y_2 = \sin(\alpha) (l_2 - v_2 t)$$

Pour que les deux avions soient en conflit, on doit satisfaire :

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \leq D^2 \quad (4.02)$$

Soit, une inégalité de degré 2 en t qui n'est satisfaite ni pour t tendant vers $+\infty$ ni pour t tendant vers $-\infty$.

Elle ne peut être satisfaite que si :

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 - D^2 = 0 \quad (4.03)$$

admet moins une racine.

Si le discriminant :

$$\Delta = D^2(v_1^2 - 2v_1v_2 \cos(\alpha) + v_2^2) - \sin^2(\alpha) (l_2v_1 - l_1v_2)^2 \quad (4.04)$$

est négatif, il n'y aura jamais de conflit.

Sinon il y aura conflit pendant $[t_1, t_2]$, t_1 et t_2 étant les racines de l'équation. Le discriminant Δ est lui-même une équation de deuxième degré en l_2 . Comme c'est l'intervalle conflictuel qui nous

intéresse, d'où on prend celui compris entre ces racines. Si l'on exclue les cas $\alpha = 0$ (rattrapage) et $\alpha = \pi$ (face à face), on obtient la longueur de cet intervalle :

$$L = 2D \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 - 2\left(\frac{v_2}{v_1}\right)\cos(\alpha)}{\sin^2\alpha}} \quad (4.05)$$

$$L = 2D \sqrt{\frac{1 + r^2 - 2r\cos(\alpha)}{\sin^2\alpha}}$$

L : Intervalle conflictuel

4.5.3.2. Distance de risque de conflits

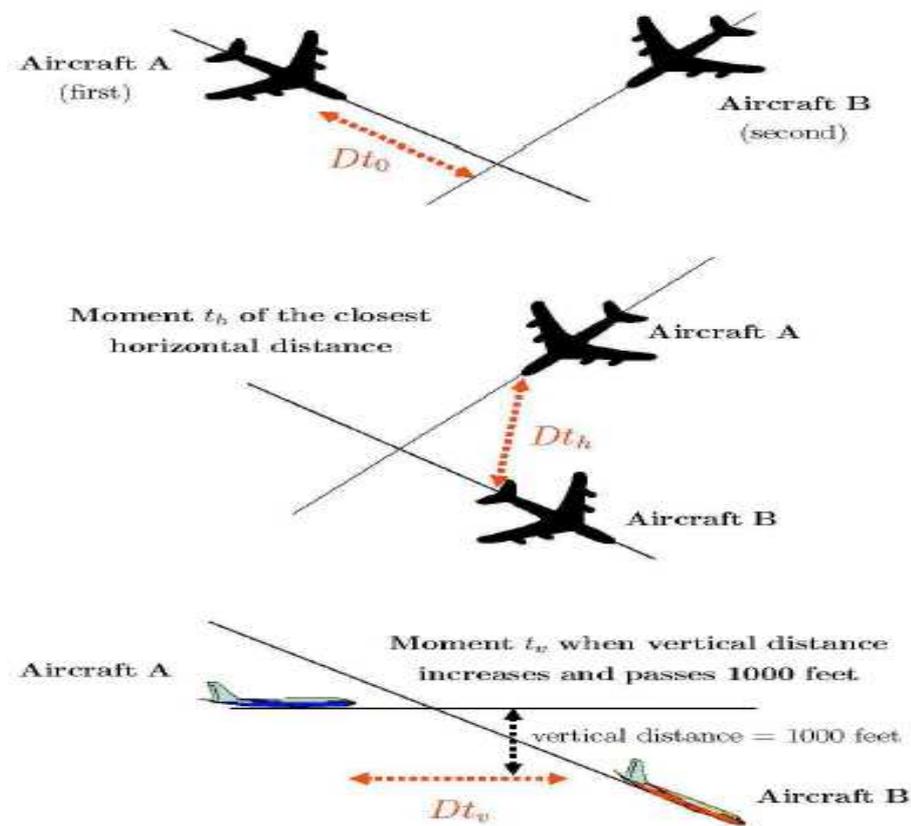


Figure 4.03 : Les distances de risques de conflit

Un conflit aérien est une situation spécifique, pendant laquelle deux avions ou plus sont en positions trop proches. On doit différencier les deux types de conflit aérien: local et opposite :

- conflit local : Un conflit local apparaît si deux avions ou plus volent à travers un point donné (presque toujours une ville) et si des conditions comme les suivantes sont données:

la différence de temps est 4 minutes ou moins au passage en un même point ; la distance horizontale est 30 unités de longueur ou moins.

- conflit opposé : Un conflit opposé apparaît lors de la présence des conditions suivantes: au moins deux avions se rencontrent (on peut reconnaître cela, si par exemple un avion pars de la ville A vers la ville B et l'autre avion de la ville B vers la ville A) ; pendant le vol, la différence de temps est 4 minutes ou moins au passage en un même point. (on peut le percevoir par rapport couloir aérien en comparant la différence de temps de l'avion 1 à la ville A avec l'avion 2 à la ville B et puis la différence de temps de l'avion 2 à la ville A avec l'avion 1 à la ville B) ; pendant le vol la distance horizontale est 30 unités de longueur ou moins (on peut le percevoir par rapport couloir aérien en comparant l'altitude de l'avion 1 à la ville A avec l'altitude de l'avion 2 à la ville B et puis l'altitude de l'avion 2 à la ville A avec l'altitude de l'avion 1 à la ville B)

4.5.4. Méthodes de résolution des conflits

La résolution de conflit repose généralement sur l'exécution par un ou plusieurs aéronefs de manœuvres d'évitement : en général, manœuvres de déviation dans le plan horizontal, dans le plan vertical, ou modification de la vitesse de croisière. Ces manœuvres sont similaires à celles ordonnées par les contrôleurs aériens. Il y a aussi l'utilisation du système embarqué TCAS qui est un système d'alerte pour éviter des collisions. Mais la plus importante est la méthode appelée « voir et éviter », qui repose sur les facteurs humains c'est-à-dire la vigilance du pilote à bord, qui n'as pas de règles particulières mais seul la perception et l'agilité du pilote est de rigueur.

4.5.4.1. Les manœuvres

Les manœuvres d'évitement doivent être simples à réaliser par un pilote humain, et faciles à comprendre par les pilotes des avions voisins concernés, ces manœuvres sont donc fortement des procédés déjà utilisées dans le cadre du contrôle actuel. Pour les avions, Il y a deux types de manœuvres d'évitement : des manœuvres de déviation dans le plan horizontal et des manœuvres dans le plan vertical. Les manœuvres du premier type sont de type point tournant : l'avion altère son cap de 10, 20 ou 30 degrés à droite ou à gauche de sa trajectoire à t_0 et reprend un cap vers sa destination à t_1 (cf. Figure 4.04). Ce type de manœuvre permet de rester proche de la trajectoire optimale. Les manœuvres du deuxième type dépendent de la phase de vol de l'avion. Ainsi pour

un avion stable, la manœuvre consiste à amorcer sa descente vers le niveau de vol inférieur au temps t_0 et d'amorcer sa remontée au temps t_1 .

- manœuvre horizontale : déviation au temps t_1 ; angle α { 10, 20, 30 } à droite ou à gauche ; retour sur la trajectoire au temps t_1 .

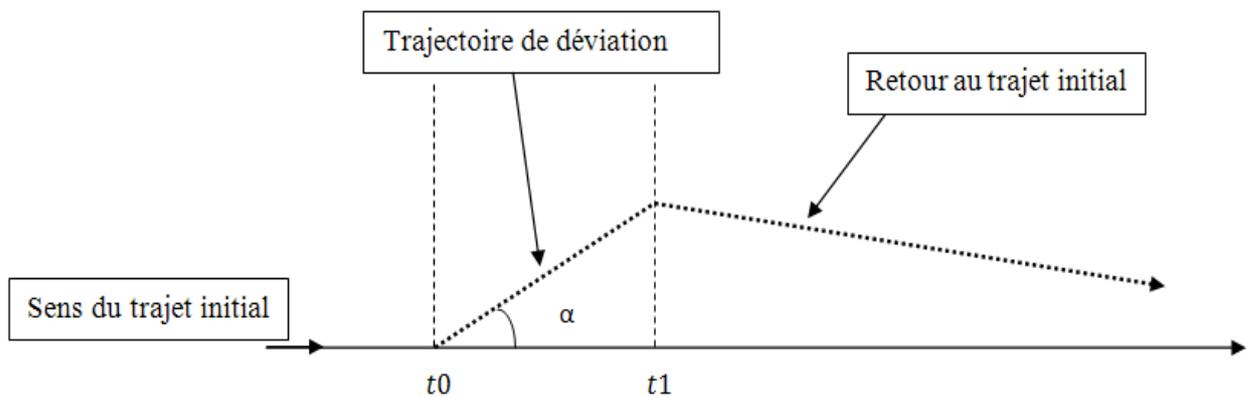


Figure 4.04 : Manœuvre dans le plan horizontale

- manœuvre verticale : interruption de montée ; anticipation de descente ; changement de niveau de vol

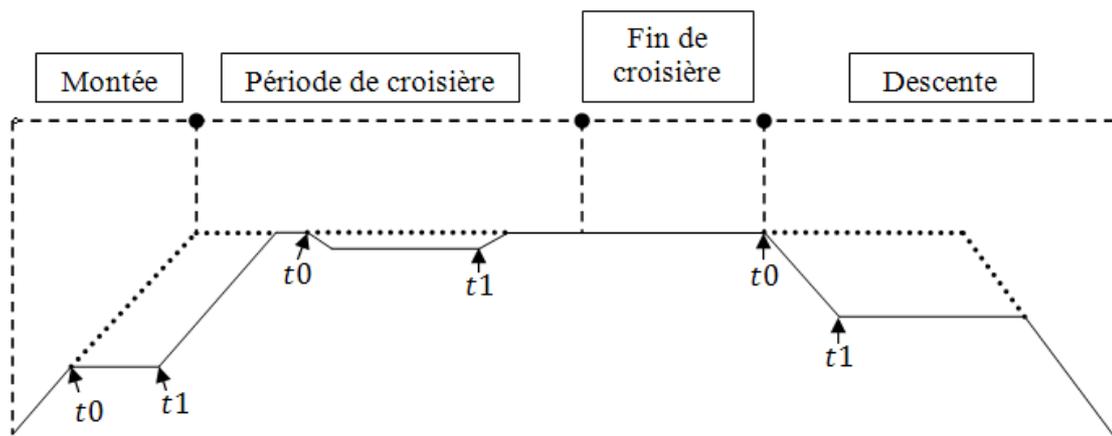


Figure 4.05: Manœuvre verticale

4.5.5. Le système TCAS

Le Traffic alert and Collision Avoidance System ou TCAS veut dire en français, « système d'alerte de trafic et d'évitement de collision ». C'est un instrument de bord d'avion destiné à éviter les collisions en vol entre aéronefs. L'Organisation de l'aviation civile internationale le prescrit pour les avions de plus de 5700 kg ainsi que pour ceux qui sont autorisés à transporter plus de 19 passagers.

4.5.5.1. Fonctionnement

Le TCAS signale au pilote tout autre avion équipé d'un TCAS dès qu'il est, selon les réglages effectués au préalable par le pilote, à une distance variant de moins de 2,5 à moins de 30 miles nautiques. En cas de collision potentielle, une alerte auditive émise par le « Traffic Advisory » (TA). Ce dernier informe le pilote qu'un autre avion se trouve à proximité, en annonçant vocalement « traffic, traffic », mais ne suggère pas de manœuvre d'évitement. Néanmoins, si la situation s'aggrave et que la collision semble imminente, un message audio et une alerte visuelle sont produits par le « Resolution Advisory » (RA), indiquant l'avion concerné et signalant l'action à effectuer par le pilote, à savoir de maintenir la trajectoire actuelle, monter, descendre ou encore surveiller la vitesse verticale. Le système est conçu de manière à ce que le TCAS de l'autre avion conseille une autre manoeuvre (il ne serait pas très intéressant que les deux avions s'évitent en montant tous deux). Bien souvent, le TCAS indique à un avion de monter et à l'autre de descendre, ce qui augmente considérablement la distance entre les deux appareils. Quand l'alerte est terminée, le système annonce « clear of conflict » qui veut dire qu'il n'y a plus de conflit. Le TCAS est un système interrogatif, qui questionne les avions proches sur la fréquence 1030 MHz. L'avion répond ensuite sur la fréquence 1090 MHz. L'évitement de collision peut également être passif, comme par exemple le PCAS ou Portable Collision Avoidance System (système portable d'évitement de collision), qui ne fait qu'écouter les réponses des autres appareils, sans émettre. Ce système portable est typiquement utilisé dans l'aviation générale (principalement les avions d'affaire).

4.5.5.2. Caractéristiques techniques

ACAS et TCAS sont utilisés pour désigner les systèmes d'antiabordage embarqués. L'antiabordage embarqué est fondé sur une logique prédictive. A partir de plusieurs réponses successives du transpondeur d'un autre avion, en divisant la distance par la vitesse de rapprochement, le TCAS calcule le temps disponible avant que soit atteint le point de rapprochement maximal, ou CPA (Closest Point of Approach). Ce temps est le paramètre principal pour la génération des alarmes. La période de rafraîchissement des données transpondeur est de l'ordre de la seconde, la logique TCAS est basée sur un cycle d'actualisation d'une seconde. Le TCAS est capable de gérer une situation à risques multiples : il peut traiter simultanément jusqu'à trente « intrus » avec une portée nominale de 14 NM pour les avions équipés d'un transpondeur mode A ou C et 30 NM pour ceux en mode S.

4.5.5.3. Remarques

Bien que le système cause parfois de fausses alertes, les pilotes ont maintenant l'instruction stricte de considérer tous les messages TCAS comme des alertes réelles nécessitant une intervention immédiate. La réglementation de l'Administration fédérale de l'aviation américaine et des autorités de la plupart des autres pays précisent qu'en cas de différence entre les instructions du TCAS (RA) et du contrôle du trafic aérien (ATC), le TCAS (RA) a toujours la priorité. La collision d'Überlingen, en 2002, a été provoquée par des ordres contraires du contrôleur de vol et des TCAS des appareils, un des appareils suivant son TCAS, l'autre appareil suivant les instructions du contrôle au sol, contraires à ceux de son TCAS. Depuis cette catastrophe, l'OACI préconise la prévalence des instructions du TCAS sur celles des contrôleurs aériens.

4.6. Les messages de détresse aéronautique [35]

Les messages de détresse sont utilisés lorsqu'il y a des vies humaines en danger. Deux grandes catégories de messages ayant la priorité sur toutes les autres communications sont utilisées en aéronautique. Ce sont les messages d'urgence et de détresse. Bien que certaines règles soient applicables pour différencier les deux, le choix final ne se fait que sur décision du commandant de bord. Les fréquences à utiliser sont soit la fréquence du contrôle avec qui vous êtes en contact, soit la fréquence 121,500 MHz.

4.6.1. Les messages d'urgence

Le message d'urgence est utilisé si une vie humaine n'est pas en danger, mais qu'il y a un problème grave à bord. Par exemple, si vous êtes dans un bimoteur et qu'un des moteurs est en panne. Un aéronef en situation d'urgence jouit d'une priorité sur tout le trafic aérien, excepté le trafic en situation de détresse. Un aéronef en état d'urgence, ne requiert pas d'assistance immédiate. Voici un exemple de message standard, idéalement envoyé en anglais, ou en français pour la France et Belgique, est le suivant :

Structure du message : « PAN PAN PAN, this is (Immatriculation de l'avion), on (Fréquence utilisée), for any aircraft or control in the vicinity, my position is (Position), (Altitude), (Vitesse), (Tous autres renseignements susceptibles de faciliter le sauvetage), (Nature du problème), (intentions)».

Exemple de message d'urgence: « PAN PAN PAN, this is OO-ABC on 121.5, to any aircraft or control in my vicinity, my position is 6 miles north east of EBLG, 5000 feet, 90 knots, right

engine fire, 1 Engine Down, 1 engine Left, Requesting priority landing at EBLG and fire assistance ».

Cela signifie en français : « PAN PAN PAN, ici OO-ABC sur 121,5, à tout avion ou contrôle dans mon secteur, ma position est 6 miles au Nord-Est de EBLG, 5000 pieds, 90 nœuds, réacteur droit en feu, un réacteur hors service, un réacteur restant, demande atterrissage prioritaire à EBLG et assistance anti-incendie ».

Les appels d'urgence sont généralement utilisés dans le cas où il y a une panne d'un moteur sur un multimoteur.

4.6.2. Les messages de détresse

Le message de détresse est utilisé lorsqu'une vie humaine est en danger, c'est-à-dire si l'avion est en feu, ou bien tous les moteurs sont en panne. Le commandant d'un avion de ligne est tenu d'ouvrir une situation de détresse s'il a moins d'essence que la limite légale de 30 minutes (Turbopropulseur et Jet) ou bien de 45 minutes (Piston).

Structure du message : « MAYDAY MAYDAY MAYDAY, this is (Immatriculation de l'avion), on (Fréquence utilisée), for any Aircraft or control in the vicinity, my position is (Position), (Altitude), (Vitesse), (Tous autres renseignements susceptibles de faciliter le sauvetage), (Nature du problème), requesting immediate assistance ».

Exemple de message de détresse : « MAYDAY MAYDAY MAYDAY, this is OO-ABC on 121.5, to any aircraft or control in my vicinity, my position is 6 miles north east of EBLG, 5000 feet, 90 knots, Squawk 7700 engine fire, engine down, no oil pressure, requesting medical and fire assistance when crash landing completed in my vicinity ».

Cela signifie en français : « MAYDAY MAYDAY MAYDAY, ici OO-ABC sur 121,5, à tout avion ou contrôle dans mon secteur, ma position est 6 miles au Nord-Est de EBLG, 5000 pieds, 90 nœuds, transpondeur 7700, réacteur en feu, réacteur hors service, pas de pression huile, demande assistance médicale et anti-incendie après atterrissage d'urgence dans mon secteur ». On peut également passer le code 7700 au transpondeur qui est un signal de détresse. Les appels de détresse sont généralement utilisés dans les cas suivants: feu à bord (Cabine, Électrique, Moteur), panne moteur, plus de fuel.

4.7. Conclusion

Les collisions entre les aéronefs sont des accidents rares mais bien présent dans le trafic aérien. Malgré les évolutions de la technologie aéronautique, les cas de conflits et de collision ne sont pas à exclure. Car, même si les techniques et les systèmes utilisés sont performants, l'initiative dépend toujours de l'homme.



Figure 5.01 : page d'accueil

5.1. But de la simulation [36]

L'objectif de la simulation est de visualiser l'écoulement du trafic en générale dans un espace aérien bien définie qui est Madagascar, et aussi pour comprendre le cas de conflits et les solutions préalable pour éviter les collisions entre les aéronefs. La programmation s'est construite avec le langage C++, car c'est le langage de programmation phare sur les micros et mini-ordinateurs, grâce à sa facilité d'utilisation, son adéquation au langage machine qui permet une compilation rapide, un code performant et sécurisé, elle possède la fonctionnalité de programmer par objets, mode de programmation qui s'est beaucoup répandu ces dernières années.

5.2. Fonctionnement

5.2.1. Fiche de contrôle principale

Dès la mise en marche du logiciel, la première fenêtre qui s'affiche est la fiche de contrôle principale. Elle comprend 3 menus principaux : gestion de la cartographie, gestion des avions et simulation et 2 autres menus secondaires qui sont : la couleur des avions et la couleur des villes.



Figure 5.01 : La Fiche de contrôle principale

5.2.1.1. Gestion de la cartographie

Ce menu gère la cartographie en générale, c'est-à-dire que l'on peut ajouter une ou plusieurs villes ou en supprimer. Par contre les six provinces de Madagascar sont incluses par défaut dans la carte et ne peuvent pas être supprimé.



Figure 5.02 : Gestion de la cartographie

5.2.1.2. Gestion des avions

Ce menu présente toutes les caractéristiques du vol et de l'avion, elle ressemble à un plan de vol généralisé. Elle comprend l'ajout et la suppression d'avions. Aussi, les paramètres des avions entrés peuvent encore être modifiés.



Figure 5.03 : Gestion des avions

Le remplissage de ce menu est vraiment identique au remplissage d'un plan de vol réelle mais avec quelques informations en moins, on peut voir : le type de l'avion associé à son nom, il a deux

types d'avions qui sont mis par défaut pour bien différencier les vitesses des aéronefs, un Boeing 737 et un ATR 42 ; l'altitude et les horaires sont des paramètres à remplir mais qui n'affecteront pas directement la simulation car ce sont des valeurs approximatives, par contre les paramètres de la vitesse sont vraiment visualisable sur l'écran car elle est spécifique pour chaque type d'appareils. Après insertion de tous ses paramètres, on click sur ajouter à la liste et l'aéronef sera perçu dans la case « Liste des aéronefs ».

On peut ajouter plus de 5 aéronefs en même temps pour bien simuler le trafic aérien.

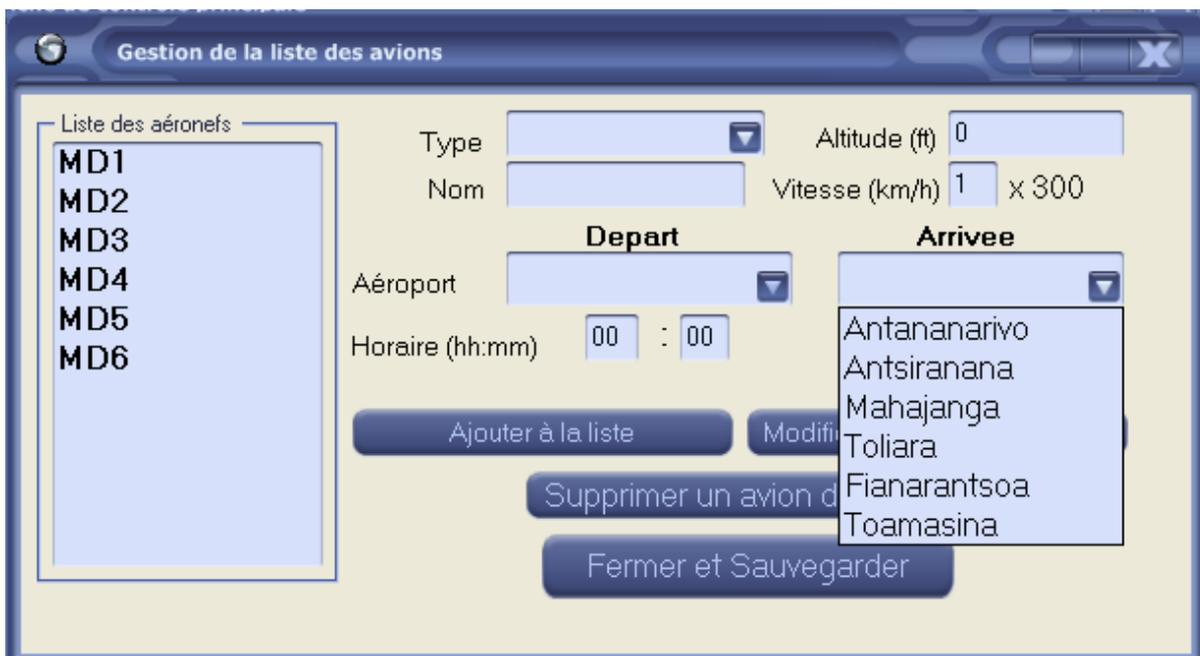


Figure 5.04 : Ajout de plusieurs aéronefs

Dans la partie départ et arrivée, on peut constater une liste déroulante des six provinces de Madagascar : Antananarivo, Antsiranana, Mahajanga, Toliara, Toamasina et les nouvelles villes ajoutés lors de la gestion de la cartographie.

5.2.1.3. Simulation

La partie simulation est la finalité de tous les paramètres introduits dans les deux menus précédents. Elle montre le déplacement de ou des avions depuis le point de départ jusqu'au point d'arriver selon les coordonnées entrés.



Figure 5.05 : déplacement d'un aéronef

Nous pouvons constater que si on click sur l'aéronef en cours de route qui est en point jaune, des informations concernant le vol s'affiche sur le coté droit de la carte.

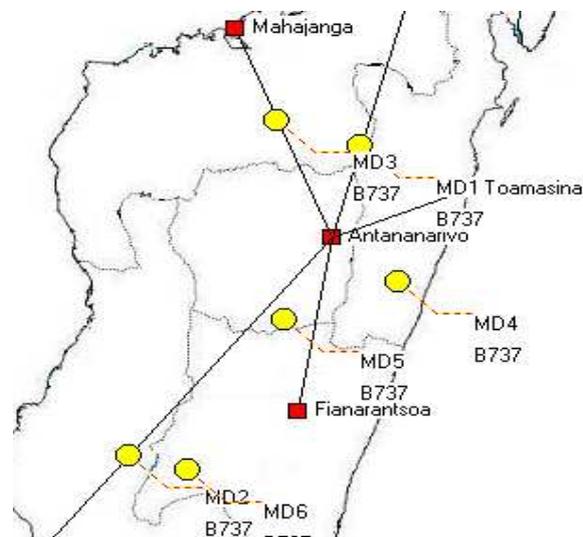


Figure 5.06 : Déplacement de plusieurs aéronefs

5.2.1.4. Couleur des avions et des villes

Pour mieux différencier la visualisation des villes et des avions, il existe les deux menus : couleurs des avions et couleurs des villes. Cela afin de bien observer le trafic en cours de route pendant la simulation.

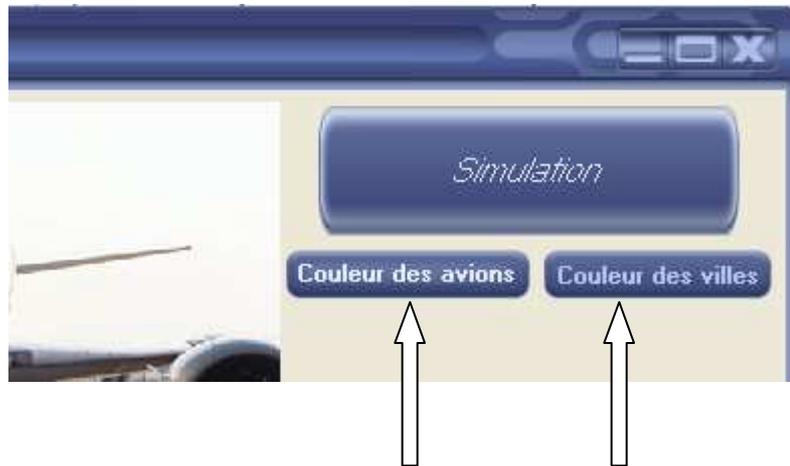


Figure 5.07 : Les menus secondaires

5.2.2. Cas de collision

Le programme peut simuler le cas de collision entre deux ou plusieurs aéronefs et en générant un alerte par un cercle rouge entourant les aéronefs en conflits et en montrant un message d'alerte visuel avec les solutions à prendre.

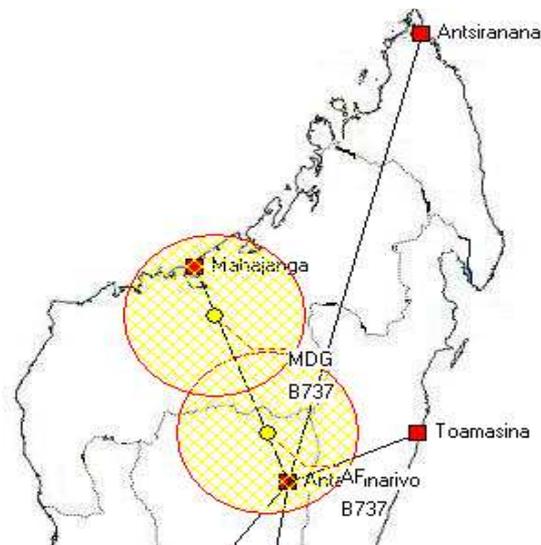


Figure 5.08 : aéronefs en conflits

Le message d'erreur ou d'alerte pour prévenir une possibilité de collision s'affiche avec des solutions proposés pour l'utilisateur selon son besoin.



Figure 5.09 : Message d'erreurs

Lorsque deux ou plusieurs avions sont en conflits, ce message d'erreur s'affiche avec des propositions de solution. En générale on peut les groupés en deux : Ne rien faire, cela laissera les aéronefs continuer leur approche entre eux et ils seront en collision et faire quelque chose, c'est-à-dire toutes les autres solutions comme dévier l'avion, corriger la trajectoire...Ce dernier permet aux aéronefs d'éviter la collision, de continuer leur route sans problème sans un abordage.

CONCLUSION

Face à ces nombreuses évolutions possibles, tant sur le plan des méthodes de travail que des technologies, il est bien difficile de prévoir à quoi ressemblera la gestion du trafic aérien d'ici une quinzaine d'années. On ne distingue pas a priori de voie qui soit objectivement meilleure qu'une autre, et on ne peut prévoir les choix conceptuels, voire idéologiques, qui influenceront sur les évolutions futures du système. On peut cependant affirmer que le système actuel dispose en lui-même d'une certaine inertie : il existe et fonctionne malgré tout, avec plus ou moins d'efficacité. La mise en place d'un système alternatif introduisant de nouvelles méthodes de contrôle ou l'automatisation de certaines autres tâches devra d'une part savoir gérer la transition à partir du système actuel, et d'autre part démontrer un gain effectif dans la capacité à traiter plus de trafic en toute sécurité. Le contrôle de la navigation aérienne doit évoluer pour faire face à l'augmentation du trafic aérien. Cette nécessaire évolution est également l'occasion d'améliorer de manière globale la sécurité du transport aérien

Le déplacement d'un aéronef d'un point à un autre est toujours sous haute surveillance et ne sera jamais laissé sans contrôle. C'est pour cela que l'avion est le moyen de transport le plus sécurisé de nos jours. Les contrôleurs travaillent sans relâche et la moindre inattention ou déconcentration de leur part peuvent engendrer de grands problèmes pour le trafic aérien dont ils sont à la charge et pour les autres à proximité.

La notion de sécurité aérienne au niveau tactique ne peut avoir recours aux indicateurs traditionnels tels que le nombre d'avions par unité de temps entrant dans un secteur ou passant sur un point de jonction, ou un nombre d'avions présents simultanément dans un secteur, pour la simple raison que points et secteurs ne font plus nécessairement partie de l'arsenal tactique du contrôle automatisé d'aujourd'hui.

Ainsi, de nouvelles perspectives de mis en place de nouveaux systèmes plus performants et plus précis que celles existants aujourd'hui doivent être étudiées. Certains sont déjà en cours d'expérimentation d'autres sont encore au niveau d'études. Cela ne pourra se faire que grâce à l'évolution de l'informatique, de l'électronique et surtout de la télécommunication.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LES INFRASTRUCTURES D'AIDES A LA NAVIGATION

Système de positionnement ou VOR

Dans la navigation aérienne le positionnement de l'aéronef est un critère très important et indispensable. L'équipement utilisé pour cela est le VOR ou Very High Frequency Omnidirectionnal Range. Un VOR permet de déterminer le relèvement magnétique par rapport à une station au sol qui est une balise émetteur. En d'autres termes, c'est un radiophare aéronautique qui travaille à courte et moyenne distance en très haute fréquence. Définissant l'espace de 360 directions d'azimut d'un cercle. Il permet de déterminer l'angle que fait l'axe de l'avion avec la station VOR du sol sur une ligne appelé Radiale dont l'axe de référence est le nord magnétique. En prenant comme repère les quatre radiales 0° , 90° , 180° , 270° , cela permet au pilote d'en déduire sa route magnétique. Rappelons que la route magnétique est l'angle orienté du Nord magnétique vers la trajectoire que suit l'avion. Le principe du VOR se base sur l'émission de signaux radioélectriques par des balises au sol. Le signal, reçu à bord de l'avion, donne le relèvement de la balise. Le VOR travaille en polarisation horizontale. Le signal émis est à la fréquence caractéristique de la balise entre 108 et 118 MHz. La porteuse est modulée en amplitude (30 %) par une sous-porteuse à 9 960 Hz modulée en fréquence par un signal de 30 Hz et l'ensemble du signal obtenu est également modulé en amplitude par un autre signal de 30 Hz. C'est le déphasage entre les deux signaux à 30 Hz, le signal de fréquence de 30 Hz fixe (30ref) et 30 Hz variable (30var) qui permet d'avoir la valeur du QDR qui est l'angle entre le nord et l'avion. Ces deux signaux sont de la forme :

$$\text{Signal de référence :} \quad V_{\text{ref}} = A1 \cos(Wt) \quad (\text{a.01})$$

$$\text{Signal variable :} \quad V_{\text{var}} = A2 \cos(Wt - \emptyset) \quad (\text{a.02})$$

\emptyset_{ref} et \emptyset_{var} : phases respective de V_{ref} et V_{var}

\emptyset : angle d'azimut qui est obtenue en faisant la différence entre \emptyset_{ref} et \emptyset_{var} .

Comme les deux signaux ne se différencient qu'à leurs phases, ainsi on a choisi de les transmettre avec une seule porteuse et deux modes d'émissions différents. Le signal de référence est transmis par modulation de fréquence à partir d'une sous porteuse de fréquence f_0 égale à 9960 Hz et cette dernière est ensuite modulée en amplitude par le signal variable avec un taux de modulation de 30%. Après la réception et la démodulation, la séparation des deux BF se fait par une série de filtrage. Après séparation on compare les deux signaux de l'avion. Le pilote utilise un appareil

appelé RMI dotée d'une aiguille qui va positionner la valeur de l'angle donné. Celle-ci permet de suivre sa route magnétique afin de rejoindre une station. Alors le récepteur effectue les tâches suivantes : recevoir le signal émis par la station VOR, séparer les deux signaux, variable et référence, comparer leur phase, afficher le résultat de la comparaison sur un indicateur.

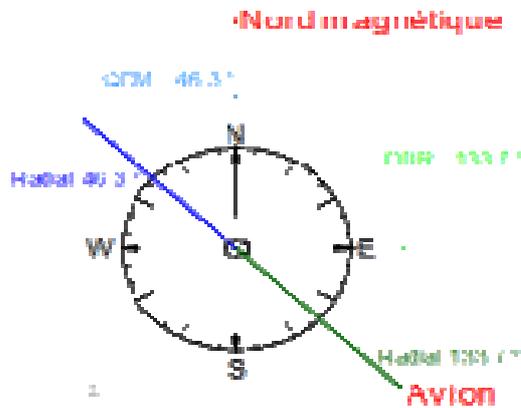


Figure a.01 : Les informations données par le VOR

La station au sol est caractérisée par : son emplacement, son indicatif, sa fréquence et sa rose orientée NORD Magnétique permettant la lecture directe d'un QDR. La station utilise une gamme de fréquence entre 108 à 117,95 MHz, sa portée est donnée par la formule suivante :

$$\frac{P}{d} = \frac{1}{d^2} \quad (a.03)$$

ou

Les balises VOR émettent avec une puissance de 200 W sur la bande 108,00 à 117,95 MHz avec un pas de 50 ou 100 kHz (50 kHz en zone dense et 100 kHz dans les autres cas).

On a le TVOR ou balises VOR d'approche :

- Approche des aérodromes
- Bande de fréquence : bande de 108 à 111,85 MHz avec décimale paire
- Puissance : 50 W
- Portée minimum : 25 NM

On a aussi le VOR de navigation en route

- repères des routes de l'espace aérien supérieur
- Bande de fréquence : 112 à 117,95 MHz
- Puissance : 200 W et une portée minimum : 200 NM

La station VOR émet son identification sous forme de code morse tous les 15 secondes que le pilote capte sur un récepteur à bord. Ce code est composé de trois lettres. Cela se fait par une modulation d'amplitude d'un signal de 1020 Hz Ce signal (porteuse modulée) est rayonné par une antenne omnidirectionnelle et permet au pilote de vérifier la balise sélectionnée et son bon fonctionnement. Par exemple le code provenant de la station VOR se situant dans les environs d'Antananarivo est TNV.

Système de mesure de distance ou DME

Le DME acronyme de Distance Measuring Equipement est le système de mesure de distance normalisé par l'OACI depuis 1960. C'est un appareil qui mesure la distance oblique entre l'appareil et une station au sol en analysant le signal émis par l'avion et retransmis par la station. Il est en général associé à un VOR, mais toutes les stations VOR ne disposent pas du retransmetteur. L'indication fournie correspond à la distance oblique entre l'avion et la station, et indique alors votre altitude lorsque vous êtes à la verticale de la station. En d'autres termes, c'est un radio-transpondeur qui permet de connaître la distance qui sépare un avion d'une station au sol en mesurant le temps que met une impulsion radioélectrique UHF (Ultra Haute Fréquence) pour faire un aller-retour. L'avion envoie des paires d'impulsions qui sont reçues par la station au sol, considérablement amplifiées, puis réémises avec un retard fixe (retard systématique de 50 microsecondes), sur une fréquence qui diffère par plus ou moins 63 MHz. Le récepteur de bord mesure le temps aller-retour et en déduit la distance à la station.

$$D_{\text{mètres}} = 150(\Delta t - 50)\mu s \quad (\text{a.04})$$

$$D_{\text{m.n}} = 0.0809(\Delta t - 50)\mu s$$

Le système DME fonctionne sur base d'un transcepteur UHF appelé interrogateur dans l'avion et d'un transcepteur dans la station au sol appelé transpondeur. L'interrogateur transmet une paire d'impulsions au transpondeur qui transmet en réponse une séquence précisément du même écart temporel (retard). Une fois identifiés deux signaux retardés correctement, l'appareil DME peut mesurer le temps pris par le signal pour parcourir l'aller-retour (déduction faite du traitement des signaux dans les différents appareils). Les informations fournies au pilote sont la distance oblique en milles nautiques, la vitesse sol et le temps pour rejoindre la station. La distance mesurée doit être corrigée en fonction de l'altitude de l'avion pour connaître la distance horizontale. La station au sol s'identifie par un message morse sur une fréquence fixe. Une station au sol peut traiter une

centaine d'avions simultanément. Pour ce faire, chaque émetteur embarqué interroge la station à un rythme faible, avec des écarts aléatoires entre paires, afin de reconnaître le signal de retour parmi les autres. La sensibilité du récepteur (son gain) s'ajuste pour ne pas dépasser la limite du nombre d'avions que la station peut gérer c'est-à-dire que les avions les plus éloignés sont ainsi ignorés en cas de risque de saturation. Le pilote utilise l'information donnée par le DME couplée à l'information d'azimut donnée par le VOR pour connaître sa position et sa progression approximative. La plupart du temps les équipements sol VOR et DME sont implantés sur les mêmes sites et leurs fréquences de travail (VHF pour le VOR et UHF pour le DME) sont toujours appariées.

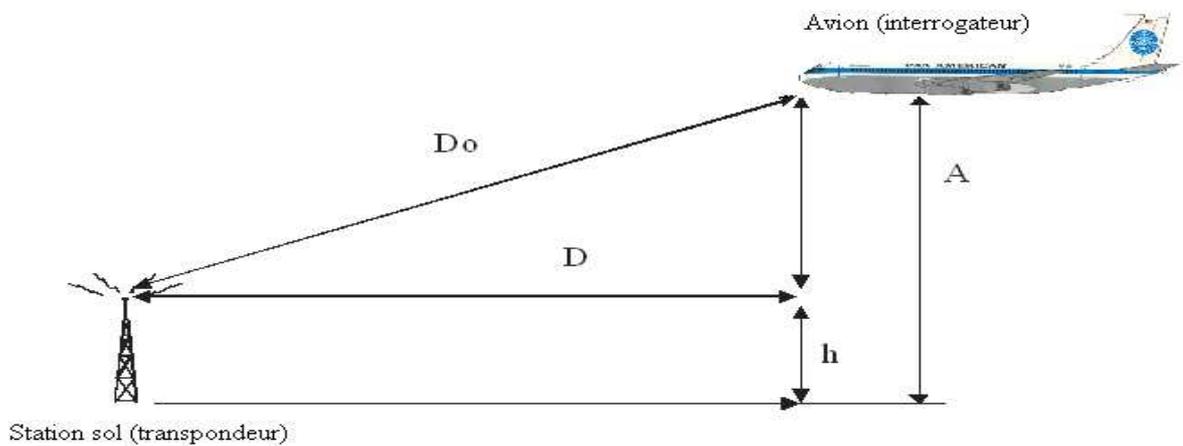


Figure a.02 : Lecture de la distance

ANNEXE 2 : CODE SOURCE DE LA PROGRAMMATION SOUS C++

Fichiers utiles au fonctionnement de l'application:

- gestionmainapp.exe : L'application principale de gestion des aéronefs
- madagascar-map.jpg : Image servant de fond pour la cartographie
- gestionmainapp.ini : Fichier (texte) de configuration contenant les paramètres globaux nécessaire pour le démarrage de l'application principale
- paramzone.ini : Fichier (texte) de configuration contenant la sauvegarde des données de la cartographie
- fichiers *.skf : Fichier de modèle (thème) de l'application
- fichiers *.dll : Fichier système contenant quelques fonctionnalité (déjà compilé) de l'application

La génération du programme a nécessité l'utilisation des codes sources séparés pour améliorer sa durée de compilation. Fichiers nécessaires pour compiler le programme :

- AddSupprAvionUnit.cpp, AddSupprAvionUnit.h, AddSupprAvionUnit.dfm: Fichier source, d'entête et de paramètre pour le formulaire de gestion des avions.
- UnitGestionErreur.cpp, UnitGestionErreur.h, UnitGestionErreur.dfm : Fichier source, d'entête et de paramètre pour le formulaire de choix de correction de la trajectoire.
- aeroobj.cpp, aeroobj.h : Fichier source, d'entête contenant la classe principale (parent) de la manipulation des avions
- avionmanagerUnit.cpp, avionmanagerUnit.h : Fichier source, d'entête contenant la classe fille de la manipulation des avions
- extraunit.cpp, extraunit.h : Fichier source, d'entête contenant des fonctions dont on a besoin dans notre application
- gestionmainapp.bpr, gestionmainapp.cpp, gestionmainapp.res : Fichier source principale, projet, ressource de notre application.
- mainformapp.cpp, mainformapp.h, mainformapp.dfm : Fichier source, d'entête et de paramètre pour le formulaire (fenêtre) principal de l'application.
- simulpaintform.cpp, simulpaintform.h, simulpaintform.dfm : Fichier source, d'entête et de paramètre pour la fenêtre d'affichage de la simulation.
- znclassunit.cpp, znclassunit.h : Fichier source, d'entête contenant la classe de gestion des villes.

Classe principale de base pour la gestion des avions (fichier aeroobj.cpp/ aeroobj.h) :

```
class avion
{
protected:
    TPoint pos;
    TPoint depart;
    TPoint arrivee;
    TPoint direction;
    AnsiString nom;
    AnsiString type;
    int speed;

private:
    double a;
    double dx,dy;
    double t;
    double distance;
    double max;
    bool dirhoriz;
    bool collision;
    bool modealerte;
    bool resolvecollision;
    bool performecollision;
    int rayont;
    DWORD lastTime;
    BOOL AnimateNextFrame(DWORD );

public:
    avion();
    TPoint GetPos();
    void SetDepart( TPoint );
    void SetArrivee( TPoint );
    TPoint GetDepart() { return depart; }
```

```

TPoint GetArrivee( ) { return arrivee; }
void Voler();
void calculerDirection();
void Dessiner( TCanvas *);
AnsiString GetNom();
void SetNom( AnsiString n);
void SetSpeed( int );
int GetSpeed() { return speed; }
AnsiString GetType();
void SetType( AnsiString n);
float CalculLongueurTrajet();
float CalculDistanceParcourue();
int CalculPourcentTrajet();
void AlerteCollision() { modealerte = true; }
void FinAlerteCollision() { modealerte = false; }
void ModeCollision() { collision = true; }
bool IsCollision() { return collision;}
void ResolveCollision() { resolvecollision = true;}
bool HasResolveCollision() { return resolvecollision;}
void PerformCollisionQuestion() { performecollision = true;}
bool HasPerformCollisionQuestion() { return performecollision;}

int MemeTrajectoire( avion& );
int DistanceEcart( avion& );

};

```

Classe parent et fille pour la gestion des villes (znunit.cpp/znunit.h) :

```

class Zone
{
public:
    Zone();

```

```

Zone(int a, int b, AnsiString s);
AnsiString desc;
bool selected;
virtual int GetX() { return x; };
virtual int GetY() { return y; };
virtual void SetPos( int a, int b) { x = a; y = b;};
protected:
    int x, y;
public:
    int dx, dy; //pour le déplacement, translation
};

```

Ici la classe Report herite de la classe mere Zone

```

class Report : public Zone
{
public :
    Report();
    Report(int a, int b, AnsiString s) : Zone( a, b, s){};
    vector<Zone> report;
    void AddRPoint(int, int , AnsiString);
};

```

Classe pour le formulaire de gestion des avions (fichier

AddSupprAvionUnit.cpp/AddSupprAvionUnit.h)

```

class TAddDelAvForm : public TForm
{
published: // IDE-managed Components
TListBox *LBAvion;
TLabel *LName;
TEdit *EName;
TComboBox *CBDepart;

```

```

TComboBox *CBArrivee;
TLabel *LDepart;
TLabel *LArrivee;
TButton *AddAvBtn;
TButton *DelAvBtn;
TButton *ModifAvBtn;
TButton *BtnFermer;
TGroupBox *GBAvions;
TLabel *LHoraire;
TLabel *LVille;
TLabel *LAlt;
TLabel *LSpeed;
TEdit *EDAlt;
TEdit *EDSpeed;
TComboBox *CBName;
TLabel *LType;
TLabel *LVitesse;
TMaskEdit *MEDh;
TMaskEdit *MEDmn;
TMaskEdit *MEAmn;
TMaskEdit *MEAh;
TLabel *LBHd;
TLabel *LBHa;
void __fastcall AddAvBtnClick(TObject *Sender);
void __fastcall DelAvBtnClick(TObject *Sender);
void __fastcall ModifAvBtnClick(TObject *Sender);
void __fastcall LBAvionClick(TObject *Sender);
void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
void __fastcall BtnFermerClick(TObject *Sender);
void __fastcall LBAvionDbClick(TObject *Sender);
void __fastcall CBNameChange(TObject *Sender);
private:

```

```

    void ClearVisualComponent();
public:   vector<AvionManager> listeavion;
    void UpdateListB();
    void LoadParameters();

    __fastcall TAddDelAvForm(TComponent* Owner);
};

```

La partie la plus importante de cette classe est donnée dans le membre liste avion qui est une liste chaînée, afin de faciliter la gestion de la liste des avions.

Classe de gestion de la liste des avions (avionmanagerUnit.h/ avionmanagerUnit.cpp), pour faciliter la manipulation des données de la liste des avions

```

class AvionManager
{
private:
    AnsiString nom;
    int iDepart;
    int iArrivee;
    AnsiString type;
    int speed;
    TTime tdepart;
    TTime tarrivee;
    int altitude;
public:
    AvionManager();
    void SetNom( AnsiString );
    AnsiString GetNom();
    void SetDepart( int );
    int GetDepart();
    void SetArrivee( int );
    int GetArrivee();

```

```

    AnsiString GetType();
    void SetType( AnsiString );
    void SetSpeed( int );
    int GetSpeed() { return speed; }
    int GetAltitude() { return altitude; }
    void SetAltitude(int h) { altitude = h; }
    TTime GetHrDepart() { return tdepart; }
    void SetHrDepart( TTime t) { tdepart = t; }
    TTime GetHrArrivee() { return tarrivee; }
    void SetHrArrivee( TTime t) { tarrivee = t; }

};

```

Classe de la fenêtre principale (mainform.h/mainform.cpp)

```

class TMGForm : public TForm
{
    published: // IDE-managed Components
    TButton *SimBtn;
    TButton *AVGestBtn;
    TButton *MapBtn;
    TImage *ImageBack;
    TButton *BtnAvClr;
    TColorDialog *ColorDialogAvion;
    TButton *BtnTownClr;
    void __fastcall AVGestBtnClick(TObject *Sender);
    void __fastcall SimBtnClick(TObject *Sender);
    void __fastcall MapBtnClick(TObject *Sender);
    void __fastcall BtnAvClrClick(TObject *Sender);
    void __fastcall BtnTownClrClick(TObject *Sender);
private:
    vector<AvionManager> listeavion;
    TColor clrAvion;

```

```

    TColor clrVille;
public:
    void updateliste(vector<AvionManager> &);
    __fastcall TMGForm(TComponent* Owner);
};

```

Classes nécessaires à l'affichage et à la gestion de l'affichage (simulpaintform.h/
simulpaintform.cpp)

```

typedef struct _SpecialTrajet
{
    TPoint depart;
    TPoint arrivee;
} TTrajetSpecial;

```

```

class TCGSForm : public TForm
{
__published: // IDE-managed Components
    TTimer *Timer1;
    void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
    void __fastcall FormDestroy(TObject *Sender);
    void __fastcall FormPaint(TObject *Sender);
    void __fastcall Timer1Timer(TObject *Sender);
    void __fastcall FormShow(TObject *Sender);
    void __fastcall FormMouseDown(TObject *Sender, TMouseButton Button,
        TShiftState Shift, int X, int Y);
private: // User declarations
    Graphics::TBitmap *pMadaMap;
    vector<Report> ville;

    AnsiString dscNom;
    AnsiString dscType;

```

```

AnsiString dscVitesse;
AnsiString dscTrajet;
AnsiString dscRmq;

vector<AvionManager> listeavion;
vector<avion> av;
int bx,by;

public:
    void updateavion(vector<AvionManager> &);
    void LoadParametres();
    void __fastcall Dessiner(TCanvas *c);
    __fastcall TCGSForm(TComponent* Owner);
    void AvionInfo( avion *);
    TColor clrAvion;
    TColor clrVille;
};

class TGFErreur : public TForm
{
__published:
    TListBox *ListBox1;
    TButton *BtnActionResolve;
    void __fastcall BtnActionResolveClick(TObject *Sender);
private:
    int res;
public:
    int DoSomething() { return res; }
    __fastcall TGFErreur(TComponent* Owner);
};

```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Avion>
- [2] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Navigation Aérienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Navigation_Aérienne)
- [3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Vol_a_vue
- [4] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Vol aux instruments](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vol_aux_instruments)
- [5] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Unité en aviation](http://fr.wikipedia.org/wiki/Unité_en_aviation)
- [6] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Controle du trafic aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Controle_du_trafic_aérien)
- [7] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, Onzième conférence de navigation aérienne, *Communications air-sol et air-air aéronautiques, scénarios relatifs aux communications mobiles aéronautiques*, Montréal, Octobre 2003
- [8] http://fr.wikipedia.org/wiki/Bande_aéronautique_VHF
- [9] N. Archambault, G. Granger, *Heuristiques d'ordonnancement pour une résolution embarquée de conflits aériens par une méthode séquentielle*, Juillet 2002
- [10] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Classe de l'espace aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Classe_de_l'espace_aérien)
- [11] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace Aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace_Aérien)
- [12] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Alphabet radio](http://fr.wikipedia.org/wiki/Alphabet_radio)
- [13] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Contrôle d'aérodrome](http://fr.wikipedia.org/wiki/Contrôle_d'aérodrome)
- [14] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Phraséologie>

- [15] F. Jambon, J. Coutaz, Laboratoire de Génie Informatique, Institut IMAG, *contrôle aérien et liaisons de données : vers un plus grand partage de l'information*, Décembre 1998
- [16] http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_primaires
- [17] http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_secondaire
- [18] http://fr.wikipedia.org/wiki/Système_de_contrôle_automatisé_du_trafic_aérien
- [19] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, *Mise en œuvre de l'ADS/CPDLC dans la FIR Antananarivo*, Juin 2001
- [20] P. Souchu, *Mise en œuvre de l'ADS*, DSNA/DTI/SO/3, Juillet 2006, Octobre 2002
- [21] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, *Réunion régionale spéciale de navigation aérienne (RAN) Afrique-Océan Indien (AFI), stratégie de mise en œuvre des systèmes cns dans la région AFI*, Novembre 2008
- [22] http://fr.wikipedia.org/wiki/Message_de_detresse
- [23] http://www.sasflightops.com/fans_cpdlc.html
- [24] <http://www.tls.cena.fr/divisions/CEP/DL/cpdlc>
- [25] <http://www.w3.org/TR/html4/loose.dtd/ads.htm>
- [26] <http://www.w3.org/TR/html4/loose.dtd/ads-b.htm>
- [27] P. Caisso, *Mise en œuvre de l'ADS-B*, Revue technique DSNA/DTI, Mai 2001
- [28] P. Lépinard, *Importation d'un plan de vol dans EURONAV III*, Juillet 2007
- [29] AIS ASECNA, Service de l'information aéronautique, *Acheminement des messages de plan de vol*, ENR /1-5-01/16, Octobre 2002

[30] http://fr.wikipedia.org/wiki/Plan_de_vol

[31] http://fr.wikipedia.org/wiki/Traffic_Collision_Avoidance_System

[32] AIS ASECNA, *Procédures d'arrivée, de départ et de prévention des abordages au voisinage des aérodromes civils utilisés en vmc par la circulation aérienne générale, service de l'information aéronautique*, ASECNA, ENR /1-5-01/16, Octobre 2002

[33] G. Granger, *Détection et résolution de conflits aériens : modélisations et analyse*, Octobre 2002

[34] J.F. Bosc, *Technique d'évitement réactif et simulation du trafic aérien*, Novembre 1997

[35] http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_dependent_surveillance-broadcast

[36] http://www.ann.jussieu.fr/coursepp/Introduction_à_la_programmation_en_C++

FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Nom : HARIMANANA

Prénoms : Nantenaina Livaso

Adresses : Logement 27/cité 36 logements, 67ha centre-ouest, ANTANANARIVO 101

Tél : +261 033 14 171 38

E-mail : nantenaina82@yahoo.fr

Titre de mémoire :

« GESTION DES AERONEFS DANS UNE ZONE DEFINIE »

Nombre de pages : 96

Nombre de tableau : 1

Nombre de figures : 32

Mots clés : aéronef, conflit, contrôle, données, espace, sécurité, surveillance, trafic

Co-Directeurs de mémoire :

- Monsieur RASAMOELINA Jacques Nirina
- Monsieur RAZAFY Petera

RESUME

Ce travail est le fruit de la coopération entre le département Télécommunication de l'ESPA et le bureau réseau et système informatique (RSI) du service technique de l'ASECNA.

Il a pour but d'étudier le système de surveillance et le contrôle automatique du trafic aérien à Madagascar, et surtout de l'améliorer dans les jours à venir pour obtenir un système plus performant et efficace dans la gestion de l'écoulement du trafic et la sécurité des usagers et des appareils.

ABSTRACT

This work is the fruit of the cooperation between the Telecommunication Department and the RSI office of ASECNA Madagascar.

Its main purpose is to study the automatic depending surveillance and the air traffic control in Madagascar, and make it the standard of air-ground navigation in the future, to get a strong system in the air traffic management.