

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Spécialité : Aéronautique

MEMOIRE DE MAGISTER

Thème

AMÉLIORATION DE LA SURVEILLANCE DÉPENDANTE AUTOMATIQUE -
DIFFUSION (ADS-B) PAR LA MULTILATÉRATION EN ALGÉRIE

Par

Bahia LAHRECH

Devant le jury composé de :

REZOUG Tahar	Professeur, U. de Blida 1	Président
BERGHEUL Said	Professeur, U. de Blida 1	Rapporteur
BELMADANI Bachir	Professeur, U. H.B. B. de Chlef	Examineur
LAGHA Mouhand	Maître de conférences, U. de Blida	Examineur

Blida, Juin 2015

DÉDICACE

Je souhaite dédier ce modeste travail :

À ma mère qui a toujours été là pour moi et me donne force et courage ;

À mon père, j'espère qu'il est fier de moi ;

« Merci mes très chères parents, grâce à vous ce jour est arrivé et à travers ce travail j'ai essayé de vous prouver tout mon amour et tous mes remerciements ».

À mon époux qui m'a tant donné et il a tant sacrifié ces dernières années ;

À mes chères enfants, Mohamed Iyed et Mouayed Abderahim, l'espoir et la lumière de ma vie ;

À mes sœurs Wissem et Hind ;

À mes frères Mouhamed El Amine et Younnes ;

À toute ma belle-famille ;

À mes chères amies qui me soutiennent et m'encouragent, merci mon ex-binôme Aicha et Khadjija.

Que DIEU vous garde et vous protège toujours.

REMERCIEMENTS

Ma profonde reconnaissance à Monsieur BERGHEUL Said et Monsieur ZAABOT Amar d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire, pour leurs conseils, leurs remarques constructives et pour leurs indications. L'attention et le temps qu'ils m'ont consacré ont contribué à l'enrichissement de ce travail.

Je remercie également Monsieur DJOUAMAA Abd ElHamid Samir de m'avoir accueilli au sein de la Direction de Développement de la Navigation Aérienne.

Je tiens particulièrement à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger ce mémoire.

Un grand merci pour Mon époux Boucham Maâmar, pour son aide pertinente concernant la rédaction de ce rapport, la réalisation du simulateur et surtout pour le soutien moral pendant la période de préparation de ce travail.

Enfin, je voudrai exprimer ma gratitude envers ma famille pour m'avoir encouragé et soutenu et j'espère que l'aboutissement de ce mémoire récompense une partie de leur inquiétude.

RÉSUMÉ

Le présent travail traite les besoins de la surveillance du trafic aérien en Algérie pour une meilleure intégration du concept CNS/ATM. L'idéal est d'arriver à une couverture totale de l'espace aérien Algérien.

Pour la réalisation de cette étude, une première phase de collecte de données sur l'environnement CNS/ATM en Algérie a été effectuée, celle là nous a permis d'avoir une image globale du contexte actuel. Ces données ont été traitées dans le but de déterminer les besoins opérationnels de surveillance. Dans la deuxième partie, nous avons tenté de répondre à ces besoins par l'adoption des récentes technologies « la multilatération et la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B) » après avoir appréhendé leurs concepts de base. La troisième partie aborde la faisabilité et l'implémentation de ces nouveaux moyens en Algérie. La dernière section s'inscrit dans le but de concrétiser cette étude par simulation.

SUMMARY

This paper addresses the needs of the air traffic control in Algeria for a better integration of the CNS / ATM concept. The ideal is to achieve full coverage of the Algerian airspace.

For this study, a first step of data collection on the CNS / ATM environment in Algeria was made, this one allowed us to have an overall picture of the current environment. These data were processed to determine the operational requirements of surveillance. In the second part, we have tried to address these needs by adopting the latest technologies «multilateration and Automatic Dependant Surveillance by diffusion (ADS-B) » after their grasp basic concepts. The third part addresses the feasibility and implementation of these new resources in Algeria. The last section is in order to achieve this simulation study.

الجزائر

يتناول هذا العمل احتياجات مراقبة الحركة الجوية في الجزائر لتحسين إدماج مفهوم CNS / ATM. والمثالي هو تحقيق التغطية الكاملة للمجال الجوي الجزائري.

الجزائر هي دولة عضو في منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO) والعضو المؤسس في منظمة الطيران المدني العربي (OACD). كما أنها عضو في منظمة الطيران المدني الإفريقي (OAF) والعضو المؤسس في منظمة الطيران المدني المتوسطي (OCEP).

تتمتع الجزائر بنظام مراقبة الحركة الجوية المتكامل الذي يغطي المجال الجوي الوطني والمجال الجوي الدولي. وتتكون من مركز مراقبة الحركة الجوية الوطني (CNATM) ومركز مراقبة الحركة الجوية الدولي (OACD).

تمتلك الجزائر 4 طائرات ADS-B (multilatération) : 4 طائرات من طراز Airbus A320XLR، 4 طائرات من طراز Airbus A320neo، 4 طائرات من طراز Airbus A320XLR، و4 طائرات من طراز Airbus A320neo.

تمتلك الجزائر 5 طائرات من طراز Airbus A320neo، 4 طائرات من طراز Airbus A320XLR، و3 طائرات من طراز Airbus A320neo.

تمتلك الجزائر 8 طائرات من طراز Airbus A320neo، 7 طائرات من طراز Airbus A320XLR، و6 طائرات من طراز Airbus A320neo.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	
REMERCIEMENTS	
RÉSUMÉ	
TABLES DES MATIÈRES	
LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION.....	14
1. SITUATION ACTUELLE DE L'ESPACE AÉRIEN ET LES BESOINS DE SURVEILLANCE EN ALGÉRIE	
1.1 Introduction.....	16
1.2 Organisation de l'espace aérien.....	16
1.2.1 Sectorisation de l'espace aérien.....	16
1.2.2 Les routes ATS.....	18
1.2.3 Les zones à statut particulier.....	19
1.2.4 Les Aérodrômes.....	21
1. Aérodrômes internationaux.....	21
2. Aérodrômes domestiques.....	21
1.2.5 Les services de la circulation aérienne.....	21
1.3 Le trafic aérien en Algérie.....	23
1.3.1 L'évolution du trafic aérien (2012 - 2013).....	24
1. Le trafic aérien en route.....	24
2. Le trafic aérien d'aérodrome.....	32
1.4 Situation actuelle Communication, Navigation, Surveillance.....	34
1.4.1 Communication.....	34
1.4.2 Navigation.....	36
1.4.3 Surveillance.....	37
1. Besoins opérationnels de surveillance en Algérie.....	40
2. Séquence de mise en œuvre proposée des installations de surveillance.....	43
1.5 Conclusion.....	44

2. CONCEPT DE LA SURVEILLANCE PAR MULTILATÉRATION	
2.1 Introduction.....	45
2.2 Généralités.....	45
2.2.1 Principe de fonctionnement.....	45
2.2.2 Application de la multilatération.....	47
1. Surveillance à la surface de l'aéroport.....	47
2. Multilatération en approche ou terminale.....	48
3. La multilatération étendue WAM (Wide Area Multilateration).....	49
4. Precision Runway Monitoring.....	49
2.3 La technique multilatération.....	49
2.3.1 Type de transpondeurs.....	50
2.3.2 Architecture du système.....	52
2.3.3 Moyen de liaison.....	53
1. Fibre Optique.....	54
2. Liaison hertzienne.....	58
3. Liaison satellitaire.....	59
2.3.4 La synchronisation.....	59
2.4 Le calcul de la TDOA.....	61
2.5 Les erreurs de la multilatération.....	64
2.5.1 Erreurs systématiques.....	64
2.5.2 Erreurs corrélées.....	64
2.5.3 Erreurs aléatoires.....	65
2.6 Les bénéfices de la multilatération.....	66
2.6.1 Le coût.....	66
2.6.2 Les performances.....	67
2.6.3 La disponibilité opérationnelle.....	68
2.7 Comparaison des principes de radar secondaire et multilatération.....	68
2.8 L'adoption mondiale de la multilatération.....	70
2.9 Conclusion.....	72
3. FAISABILITÉ DE LA MULTILATÉRATION EN ALGÉRIE ET L'ÉLABORATION D'UN SIMULATEUR DE LA MULTILATÉRATION	
3.1 Introduction.....	73
3.2 L'implémentation de la multilatération en Algérie.....	73

3.3 L'adaptation de la multilatération à l'aéroport Hassi Messaoud.....	75
3.3.1 Etude préliminaire pour la multilatération sol.....	75
1. Présentation de l'aérodrome de Hassi Messaoud.....	76
2. Les besoins de la surveillance sol.....	78
3. Architecture multilatération sol proposée.....	79
3.3.2 Etude préliminaire pour la multilatération terminale.....	80
1. Présentation de l'approche de Hassi Messaoud.....	80
2. Les besoins de la surveillance d'approche.....	82
3. Architecture multilatération proposée.....	83
3.3.3 Autres considérations du multilatération.....	84
3.4 Simulation du système de multilatération de Hassi Messaoud.....	85
3.4.1 Architecture de la simulation.....	85
3.4.2 Algorithme de la multilatération.....	85
3.4.3 Description de l'interface de la simulation.....	87
3.4.4 Application.....	94
1. Simulation de la multilatération sol sur l'aéroport de Hassi Messaoud.....	94
2. Discussion des résultats.....	99
3. Simulation de la multilatération de l'approche de Hassi Messaoud.....	101
4. Discussion des résultats.....	107
3.5 L'automatisation de la surveillance à l'aéroport de Hassi Messaoud.....	108
3.6 Les bénéfices de l'expérimentation de la multilatération.....	109
3.7 Conclusion.....	110
4. CONCEPT DE SURVEILLANCE DÉPENDANTE AUTOMATIQUE (ADS-B)	
4.1 Introduction.....	111
4.2 Généralités.....	111
4.2.1 Principe.....	111
4.2.2 Les applications de l'ADS-B.....	112
1. Le Concept ASAS.....	112
2. Le package one.....	113
4.3 La technique ADS-B.....	118

4.3.1	Fonctionnement.....	118
4.3.2	Contenu du message ADS-B.....	119
4.3.3	Architecture d'un système ADS-B.....	120
1.	Le Segment bord.....	120
2.	Les médias ADS-B.....	121
3.	Le segment sol.....	125
4.4	L'adoption de l'ADS-B dans le monde.....	126
4.5	Conclusion.....	128
5.	ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE L'ADS-B EN ALGÉRIE ET SIMULATION DE SA COUVERTURE ENVISAGÉE	
5.1	Introduction.....	129
5.2	L'implémentation de l'ADS-B en Algérie.....	129
5.2.1	Les applications ADS-B proposées.....	130
5.2.2	Architecture ADS-B proposée.....	130
5.3	Simulation de la couverture attendue.....	139
5.3.1	Objectifs de la simulation des couvertures.....	139
5.3.2	Hypothèse du travail.....	140
5.3.3	La réalisation de la simulation.....	140
5.4	Analyse des résultats obtenus.....	146
5.5	La mise en œuvre opérationnelle du projet.....	147
5.6	L'impact de l'implémentation sur la fourniture du service Radar.....	149
5.7	Conclusion.....	150
	CONCLUSION.....	151
	APPENDICE A : LES MOYENS DE SURVEILLANCE MIS À DISPOSITION DE L'ATC ALGÉRIEN	
	LISTE DES ABRÉVIATIONS	
	RÉFÉRENCES	

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 Limites et sectorisation de l'espace aérien algérien.....	18
Figure 1.2 Carte de croisière de l'Algérie.....	20
Figure 1.3 Graphique de trafic en route 2012-2013.....	25
Figure 1.4 Répartition des parts de trafic par secteur année 2013.....	27
Figure 1.5 Variation du trafic par secteur 2012-2013.....	27
Figure 1.6 Répartition des parts de trafic par nature de vol.....	28
Figure 1.7 Les principaux flux de survol sans escale Est-Ouest.....	28
Figure 1.8 Les principaux flux de survol sans escale Nort-Sud.....	29
Figure 1.9 Graphe d'évolution du trafic en route (1998-2013).....	31
Figure 1.10 Tendence d'évolution jusqu'à 2030.....	31
Figure 1.11 Le trafic aérien d'aérodrome 2012-2013.....	33
Figure 1.12 Représentation des mouvements commerciaux des aérodromes internationaux en 2013.....	33
Figure 1.13 Mouvements totaux commerciaux / non commerciaux de certains aérodromes.....	34
Figure 1.14 RSFTA national et international.....	35
Figure 1.15 Couverture radar actuelle.....	39
Figure 1.16 Sectorisation de l'espace aérien et champs pétroliers.....	42
Figure 2.1 Schéma de principe de la localisation multilatération.....	46
Figure 2.2 Exemple d'une visualisation sur écran de l'aéroport de Copenhague	48
Figure 2.3 Multilatération en phase terminale.....	49
Figure 2.4 La multilatération PRM.....	50
Figure 2.5 Architecture du système multilatération.....	53
Figure 2.6 Composition d'une fibre optique.....	54
Figure 2.7 Fibre Optique Multimode.....	55
Figure 2.8 Fibre Optique Monomode.....	56
Figure 2.9 Corrélation des signaux de deux récepteurs.....	62
Figure 2.10 Comparaison de coût total entre radar et multilatération.....	67
Figure 2.11 Précision de couverture radar et multilatération.....	67
Figure 2.12 La disponibilité en redondance.....	68
Figure 2.13 Mise en œuvre de la multilatération dans le monde entier.....	71

Figure 3.1 Aéroport d'Alger Houari Boumediene (Google Earth).....	74
Figure 3.2 Carte aérodrome de Hassi Messaoud/Oued Irara-Krim Belkacem.....	77
Figure 3.3 Hangar de maintenance STAR AVIATION à l'aéroport de Hassi Messaoud.....	78
Figure 3.4 Carte des arrivées normalisées aux instruments (OACI) de l'aéroport de Hassi Messaoud.....	81
Figure 3.5 Carte des départs normalisés aux instruments (OACI) de l'aéroport de Hassi Messaoud.....	82
Figure 3.6 Architecture générale de la simulation.....	85
Figure 3.7 Algorithme de la multilatération.....	86
Figure 3.8 Etapes de choix du système de multilatération sol.....	87
Figure 3.9 Etapes de choix du système de multilatération approche.....	88
Figure 3.10 La fenêtre de configuration du système.....	90
Figure 3.11 La fenêtre Visualisation de couverture pour multilatération sol.....	91
Figure 3.12 La fenêtre Visualisation de positionnement pour multilatération sol	92
Figure 3.13 La fenêtre visualisation de couverture et de positionnement pour multilatération approche (Visual_app).....	93
Figure 3.14 La fenêtre Analyse.....	94
Figure 3.15 Sélection des obstacles sur la carte de Hassi Messaoud.....	95
Figure 3.16 Simulation de la couverture des stations de MLT sol.....	96
Figure 3.17 Erreurs de positionnement pour $\sigma_{TDOA} = 10$ ns.....	97
Figure 3.18 Précision du système pour $\sigma_{TDOA} = 10$ ns.....	98
Figure 3.19 Erreurs et Précision de positionnement pour $\sigma_{TDOA} = 9$ ns.....	98
Figure 3.20 Erreurs et Précision de positionnement pour $\sigma_{TDOA} = 5$ ns.....	99
Figure 3.21 Couverture complète de la surface de Hassi Messaoud.....	100
Figure 3.22 Couverture FL105.....	102
Figure 3.23 Couverture pour FL30.....	102
Figure 3.24 Couverture par chaque station pour FL30.....	103
Figure 3.25 Couverture pour FL14.....	103
Figure 3.26 Couverture par chaque station pour FL14.....	104
Figure 3.27 La simulation de positionnement.....	104
Figure 3.28 Erreur de positionnement pour $\sigma_{TDOA} = 1$ ns.....	105

Figure 3.29 La précision pour $\sigma_{TDOA} = 1$ ns.....	105
Figure 3.30 Erreur de positionnement pour $\sigma_{TDOA} = 10$ ns.....	106
Figure 3.31 La précision pour $\sigma_{TDOA} = 10$ ns.....	106
Figure 3.32 La précision (ft) d'un système TMA pour $\sigma_{TDOA} = 1$ ns.....	108
Figure 4.1 Schéma de principe de fonctionnement de l'ADS-B.....	112
Figure 4.2 Application de surveillance ADS-B au sol.....	115
Figure 4.3 Application de surveillance Air-Air (ASA).....	118
Figure 4.4 Schéma du système ADS-B.....	119
Figure 4.5 Architecture ADS-B bord.....	120
Figure 4.6 Format de données Mode S 1090 Extended Squitter.....	122
Figure 4.7 Format de données VDL mode 4.....	123
Figure 4.8 Format de données de système UAT(Universal Access Transceiver)	123
Figure 4.9 Schéma de réception ADS-B.....	125
Figure 4.10 Schéma de transmission TIS-B.....	125
Figure 4.11 Architecture sol d'un système ADS-B.....	126
Figure 4.12 Couverture actuelle de l'ADS-B de l'USA et l'Australie.....	127
Figure 5.1 Architecture centre ATC.....	138
Figure 5.2 Situation aérienne autour de Toulouse.....	139
Figure 5.3 Exemple d'insertion de la station radar d'Annaba.....	141
Figure 5.4 Exemple de traçage de la couverture radar d'Annaba FL100.....	141
Figure 5.5 Simulation de la couverture radars actuels.....	142
Figure 5.6 La non-couverture de Boussaâda FL100.....	143
Figure 5.7 Couverture du secteur Sud/Centre par ADS-B.....	144
Figure 5.8 Simulation de la couverture proposée ADS-B des axes du flux de trafic Nord-Sud.....	145
Figure 5.9 Simulation de la couverture des sites nécessaire à doubler voir remplacer les radars existants.....	145
Figure 5.10 L'extension de la couverture dans le secteur Sud/Sud.....	146
Figure 5.11 Simulation de la couverture finale des cites existants et proposées	147
Tableau 1.1 Les variations du trafic aérien "en route" 2012-2013.....	24
Tableau 1.2 Trafic par secteur 2012-2013.....	26
Tableau 1.3 Évolution du trafic en route durant la période 1998-2013.....	30

Tableau 1.4 Variation du trafic aérien d'aérodrome.....	32
Tableau 1.5 Moyens de communication.....	36
Tableau 1.6 Moyens de radionavigation.....	36
Tableau 1.7 Les stations radars actuelles et leurs sites d'implantations.....	38
Tableau 2.1 Les signaux d'interrogations disponibles.....	51
Tableau 2.2 Les standard FOM.....	55
Tableau 2.3 Les standards OS.....	56
Tableau 2.4 Les valeurs d'atténuation pour les éléments des FO.....	57
Tableau 2.5 Comparaison enter SSR et multilatération.....	72
Tableau 3.1 Coordonnées des obstacles sélectionnés sur l'aéroport de Hassi Messaoud.....	95
Tableau 3.2 Description des stations du système MLAT sol de Hassi Messaoud.....	96
Tableau 3.3 Description des stations du système MLAT approche de Hassi Messaoud.....	101
Tableau 5.1 Emplacement de l'ADS-B.....	135

INTRODUCTION

L'espace aérien algérien est contigu principalement aux espaces aériens espagnol et français au nord, ce qui fait de lui une passerelle logique entre l'Europe et l'Afrique. Cette localisation de l'Algérie explique l'importance du trafic aérien et son taux d'accroissement de plus de 6,6 % par an en moyenne durant ces quinze (15) dernières années.

Ce fort trafic a amené l'Établissement National de la Navigation aérienne (ENNA), fournisseur des services de trafic aérien à conduire depuis plusieurs années une politique volontariste d'investissement et de modernisation des infrastructures de la navigation aérienne. Cette politique est axée principalement sur les moyens CNS (Communications, Navigation et Surveillance) pour offrir une meilleure gestion de l'espace aérien. Elle représente une activité complexe qui requiert une organisation ainsi qu'une cohérence entre plusieurs facteurs pour assurer la sécurité des vols conformément aux dispositions réglementaires de l'OACI.

L'un des facteurs déterminants de la réussite d'une telle démarche est certainement, une bonne organisation de l'espace aérien considéré, mais aussi, le choix judicieux des moyens à mettre en œuvre pour permettre une surveillance du trafic aérien avec un maximum de sécurité.

S'agissant des futurs systèmes de surveillance, l'ADS-B fournit une position plus précise et une identification (numéro de vol) directe, sans interrogation. Il est dépendant en localisation. La multilatération, indépendante en localisation, apparaît idéalement complémentaire.

Ces nouveaux systèmes travaillent sur les mêmes fréquences, les mêmes signaux et peuvent partager les mêmes sites d'implantation et les mêmes antennes... Ils peuvent être conçus et déployés avec un degré d'intégration poussé et permettre ainsi de bénéficier des fonctionnalités et performances des anciens et/ou nouveaux systèmes.

C'est une solution particulièrement adaptée à la phase de transition actuelle qui tend vers la généralisation des moyens ADS-B à bord. On s'attend à ce que la

multilatération et l'ADS-B remplacent définitivement le radar dans la plupart des applications aéronautiques.

Nous nous intéresserons en particulier dans le cadre de cette étude, à promouvoir des améliorations en matière de surveillance dans la FIR d'Alger qui représente un élément fondamental de l'ATM. Nous proposerons pour cela, l'installation de la multilatération et l'ADS-B pour renforcer la sécurité aéronautique et accroître les capacités de gestion du trafic aérien, afin de répondre à terme aux besoins de surveillances en Algérie, à savoir passer d'une couverture partielle du territoire à une couverture totale et de satisfaire les demandes futures du trafic.

Nous avons organisé ce présent mémoire en cinq chapitres :

Le premier présente le contexte CNS/ATM en Algérie. Il contient également une analyse du trafic aérien avec localisation des zones de trafic denses et sensibles. Des axes d'améliorations possibles en termes de sécurité et de capacité sont proposés.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la technique multilatération pour l'amélioration de la surveillance, leurs expérimentations à travers le monde, ainsi que les bénéfices escomptés.

Le troisième chapitre s'intéresse à la faisabilité de la multilatération en Algérie et présente une étude préliminaire pour un système de multilatération implémentée dans la région du Hassi Massaoud avec une description du simulateur réalisé pour la conception et l'évaluation de ce système à distance.

Le quatrième chapitre aborde une présentation du concept de l'ADS-B, ses expérimentations mondiales ainsi que ses avantages.

Le cinquième chapitre traite de la faisabilité et l'implémentation de la technique ADS-B en Algérie avec une approche sur les attentes de cette solution par rapport aux moyens conventionnels de surveillance existants avec une simulation de couverture montrant que les sites choisis sont les plus adéquats pour combler les manques de couverture du territoire national.

Enfin, une conclusion générale.

CHAPITRE 1

SITUATION ACTUELLE DE L'ESPACE AÉRIEN ET LES BESOINS DE SURVEILLANCE EN ALGÉRIE

1.1 Introduction

Ce chapitre englobe une description générale de l'espace aérien algérien dans toute sa diversité et au sein duquel évolue le trafic des avions. L'objectif ciblé dans cette section est de présenter une analyse de trafic et de l'infrastructure CNS actuelle en Algérie.

L'étude des données recueillies servira à mettre en évidence les écarts de performances. Les résultats et propositions de l'étude seront ensuite évalués par rapport à ces écarts afin de déterminer ceux et celles qui permettront d'apporter les améliorations opérationnelles nécessaires aptes à répondre aux besoins particuliers de surveillance aérienne dans notre pays.

1.2 Organisation de l'espace aérien algérien

1.2.1 Sectorisation de l'espace aérien

L'espace aérien algérien est défini par ces limites territoriales, qui s'étendent sur la partie sud de la Méditerranée contiguë aux FIR (s) (Région d'Information de Vol) Marseille, Barcelone, et Séville au Nord. Il est adjacent par l'ouest à la FIR Casablanca et par l'Est à la FIR Tunis et Tripoli. Il est contigu par ailleurs, du sud aux FIR (s) Dakar et Niamey [1]. Ces FIR adjacentes sont illustrées dans la figure 1.1.

La FIR Alger fait partie de la région OACI AFI qui est composée de 57 pays regroupés eux-mêmes dans plusieurs organisations comme la Commission Arabe de l'Aviation civile (ACAC) et dont l'Algérie est membre et l'agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) qui gère les espaces aériens, notamment ceux de la Mauritanie, du Mali, et du Niger [2].

L'espace aérien Algérien est composé d'une seule région d'information de vol (FIR), à l'intérieur de cette FIR trois classes d'espace sont utilisées actuellement selon la dénomination OACI : A, D et E. [3]

Voici la désignation et la classification des espaces aériens ATS en Algérie:

Classe A : Seuls les vols IFR sont admis; tous les vols sont assujettis au service de contrôle de la circulation aérienne et les séparations des aéronefs sont assurées.

Classe D : Les vols IFR et VFR sont admis ; tous les vols sont assujettis au service de contrôle de la circulation aérienne, les aéronefs en vol IFR sont séparés des autres aéronefs en vol IFR et ils reçoivent des informations de circulation aérienne essentielles concernant les autres en vol VFR ; les aéronefs en vol VFR reçoivent des informations de circulation aérienne concernant tous les autres vols.

Classe E : Les vols IFR et VFR sont admis; il est fourni un service de contrôle de la circulation aérienne aux vols IFR et la séparation est assurée entre vols IFR. Tous les vols reçoivent dans la mesure du possible des informations de circulation. La classe E ne sera pas utilisée pour les zones de contrôle. [4]

Cette FIR a été divisée en sept (7) volumes appelés secteurs :

- Le secteur centre constitué de :
 - TMA centre Alger espace inférieur, ayant pour limites verticales, le GND/MSL jusqu'au niveau de vol FL 245. Espace aérien de classe D ;
 - TMA centre Alger espace supérieur, ayant pour limites verticales le niveau de vol 245 jusqu'au niveau de vol FL 450. Espace aérien de classe A.
- Le secteur Nord/Est, ayant pour limites verticales le plus grand (GND/MSL, 450 m) jusqu'au niveau de vol FL 450. Espace aérien de classe D.
- Le secteur Nord/Ouest ayant pour limites verticales, le plus grand de (GND/MSL, 450 m) jusqu'au niveau de vol FL 450. Espace aérien de classe D.
- Le secteur Sud/Centre ayant pour limites verticales, le plus grand de (GND/MSL, 900 m) jusqu'au niveau de vol FL 450. Espace aérien de classe E.
- Le secteur Sud/Est ayant pour limites verticales, le plus grand de (GND/MSL, 900 m) jusqu'au niveau de vol FL 450. Espace aérien de classe E.

- Le secteur Sud/Ouest ayant pour limites verticales, le plus grand de (GND/MSL, 900 m) jusqu'au niveau de vol FL 450. Espace aérien de classe E.
- Le reste de l'espace aérien algérien (secteur Sud/Sud) est aussi de classe E. [3]

Remarque: Les secteurs centre, Nord/Est et Nord/Ouest sont communément appelés TMA centre, Est et Ouest.

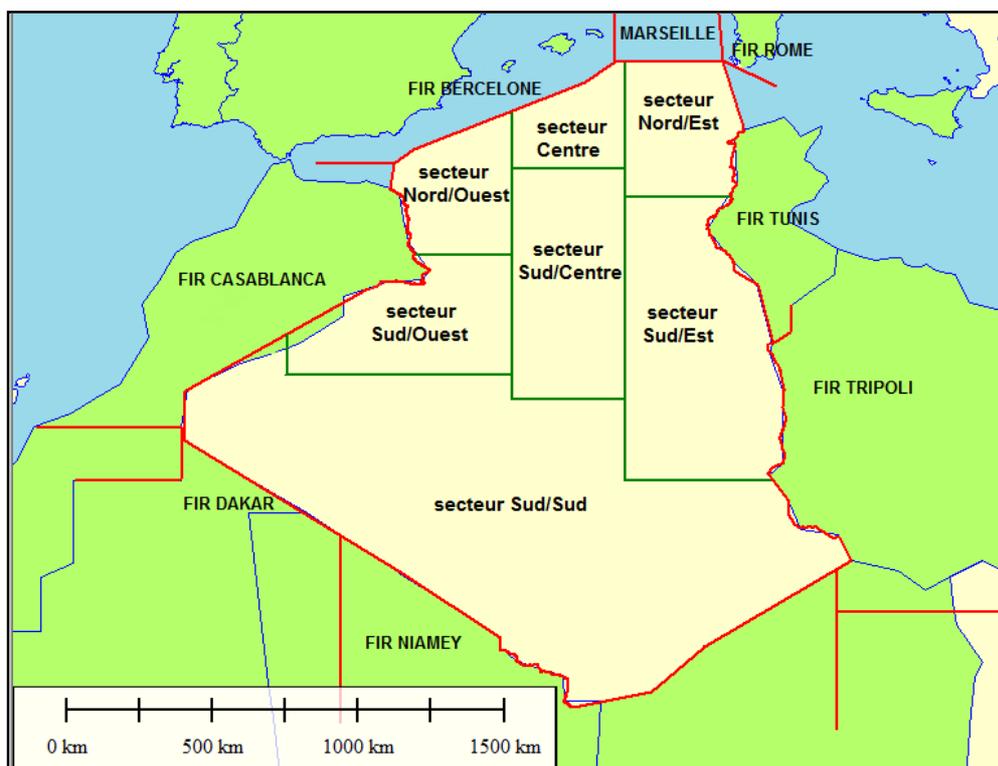


Figure 1.1 : Limites et sectorisation de l'espace aérien algérien.

1.2.2 Les routes ATS

Trois réseaux de routes ATS se partagent l'espace aérien Algérien (Voir Figure 1.2) :

- Réseau de routes régionales : Ce sont des cheminements utilisés par les aéronefs pour les dessertes en Algérie ou le transit dans l'espace aérien algérien. Les routes publiées dans l'AIP sont au nombre de 33 routes inférieures et 35 routes supérieures. À partir du niveau de vol FL 290, l'espace est utilisé par les aéronefs en "sur vol" ;
- Réseau de routes domestique : Une route domestique est une voie aérienne utilisée par les aéronefs entre deux ou plusieurs aéroports algériens, avec un

total de 24 routes. Les principales routes de ce réseau sont celles reliant la capitale Alger aux principales villes du Nord, tel que: Oran, Constantine, Annaba, Bejaia...et certaines villes du Sud, comme Hassi-Messaoud, Ghardaïa, Hassi Rmel, In Amenas...etc;

- Réseau de routes de navigation de surface RNAV¹ : 13 routes RNAV sont publiées dans l'AIP, ayant pour limite inférieure le niveau de vol 310. Ce réseau de routes est utilisé par les aéronefs en transit disposants d'une combinaison d'équipements et de capteurs assurant un guidage RNAV. [3]

1.2.3 Les zones à statut particulier

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

- Zones dangereuses: Certaines zones ont un caractère particulièrement dangereux pour la navigation aérienne au vu de l'activité qui s'y déroule. La traversée d'une zone dangereuse réclame une vigilance accrue du pilote et dans certains cas, il est souhaitable de l'éviter lorsqu'elle est active.
- Zones réglementaires : Ce sont des zones définies au-dessus du territoire ou des eaux territoriales d'un État, le vol des aéronefs y est subordonné à certaines conditions spécifiées qui peuvent aller jusqu'au l'interdiction de pénétration.
- Zone interdite : L'établissement d'une zone interdite est soumis à des conditions particulièrement strictes, car l'usage de cette portion d'espace aérien est comme son nom l'indique absolument interdite aux aéronefs. [4]

La carte de croisière (Figure 1.2) montre les espaces à usage restreint concentrés principalement au Nord et à l'ouest du pays.

¹ Méthode de navigation permettant le vol sur n'importe quelle trajectoire « OACI-DOC.9613-AN/937 ».

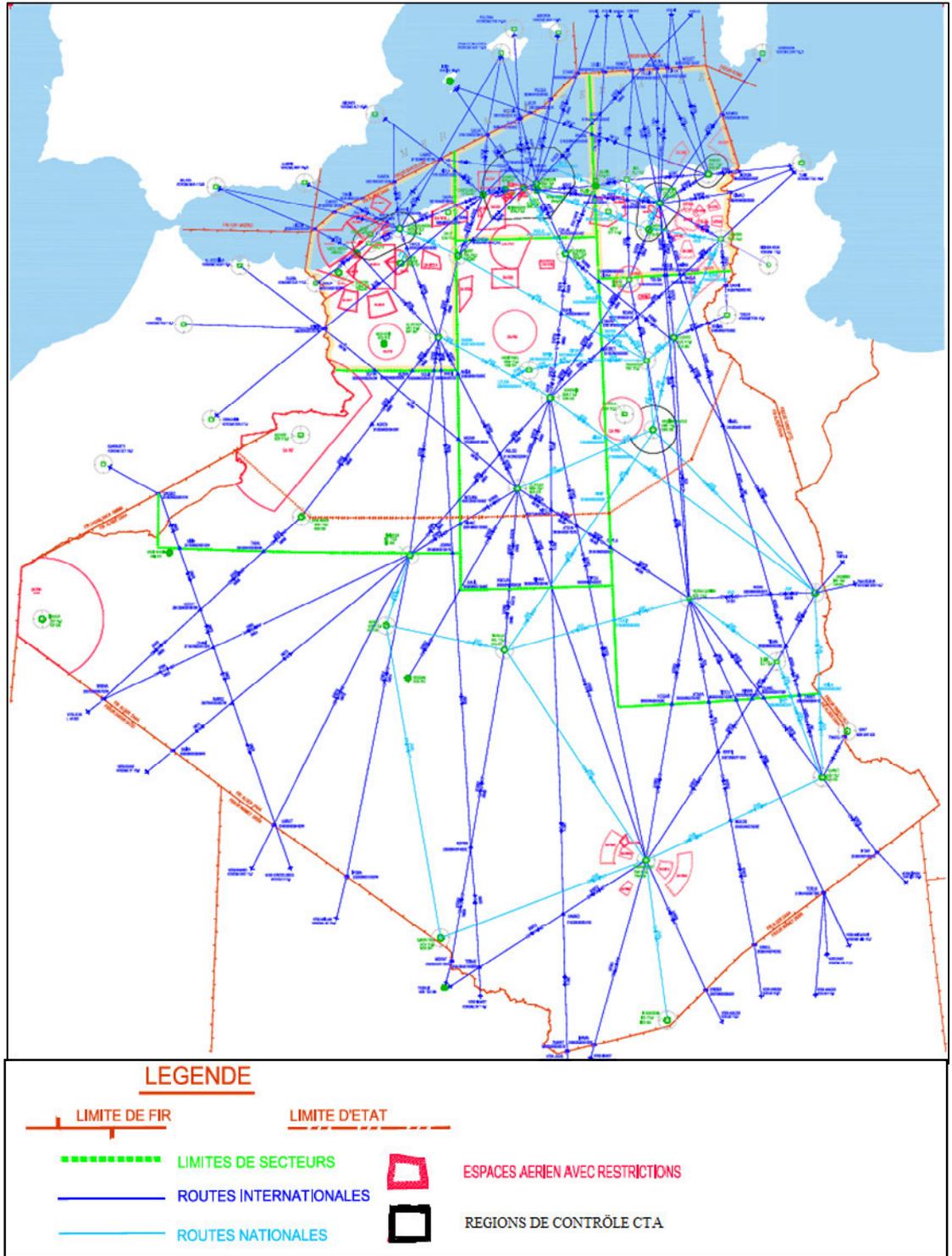


Figure 1.2 : Carte de croisière de l'Algérie [3].

1.2.4 Les Aérodrômes

L'Algérie dispose d'un patrimoine aéroportuaire de 36 aérodrômes ouverts à la circulation aérienne publique. Ils sont répartis comme suit :

1.2.4.1 Aérodrômes internationaux

Aéroport international est l'aéroport d'entrée et de sortie destinée aux trafics aériens internationaux où s'accomplissent les formalités de douanes, de contrôle des personnes, de santé publique et de contrôle vétérinaire et sanitaire [5].

- 05 aérodrômes reçoivent le trafic international régulier : Alger/Constantine/Annaba/Tlemcen/Oran ;
- 03 aérodrômes reçoivent le trafic international restreint (escale technique, etc.) : In-Amenas / Tamanrasset / Adrar ;
- 01 aérodrôme reçoit le trafic international en cargo et charter : Hassi Messaoud ;
- 02 aérodrômes reçoivent le trafic international non régulier : Ghardaïa/In Salah.

1.2.4.2 Aérodrômes domestiques

- 22 aérodrômes reçoivent le trafic national régulier ;
- 02 aérodrômes traitent le trafic international régulier (saisonnier): Biskra/Bejaia [3].

Globalement, les capacités intrinsèques des aérodrômes et leur répartition spatiale répondent aux besoins actuels et peuvent, moyennant quelques aménagements absorber la demande future du trafic aérien.

1.2.5 Les services de la circulation aérienne

Ils désignent l'ensemble des services assurés par des organismes de la circulation aérienne afin de participer à la sécurité des vols. Ils sont au nombre de trois : le service du contrôle de la circulation aérienne, le service d'information de vol et le service d'alerte [4].

Les services de la circulation aérienne sont assurés pour l'ensemble du territoire algérien sur un certain nombre d'aérodrômes et dans l'espace aérien

formant la FIR Algérie, par l'Établissement National de la Navigation Aérienne (ENNA).

En général, la réglementation et les procédures de la circulation aérienne en vigueur sont conformes aux normes, pratiques recommandées et procédures de l'OACI.

Dans l'espace aérien correspondant à sa zone de responsabilité, l'ENNA fournit les services suivants :

➤ Le service de contrôle de la circulation aérienne : Il consiste à assurer la séparation entre aéronefs et à les guider dans des espaces contrôlés. Selon la phase du vol à laquelle il s'applique, le service de contrôle se subdivise en :

- Contrôle d'aérodrome qui s'occupe de la circulation au sol sur la plateforme aéroportuaire, de la phase initiale de la montée et de la phase terminale de la descente des aéronefs [4]. Il s'effectue à partir des tours de contrôle, à l'intérieur d'un volume appelé zone de contrôle CTR.

En Algérie, ce service est assuré aux aéronefs par 33 tours de contrôle.

Le service de contrôle des mouvements à la surface est assuré uniquement au niveau de l'aérodrome d'Alger/Houari Boumediene [3].

- Contrôle d'approche qui est chargé de prévenir les abordages entre aéronefs, ordonner la circulation aérienne sur les phases d'arrivée et de départ [4].

Pour mieux gérer les manœuvres des aéronefs autour des aéroports ayant la plus grande densité de trafic, l'Algérie a développé dans ce cadre cinq zones d'approche TMA gérées par les bureaux de contrôle d'approche suivants :

- ✓ Approche Alger / Houari Boumediene ;
- ✓ Approche Annaba / El Mellah ;
- ✓ Approche Constantine / Mohamed Boudiaf ;
- ✓ Approche Hassi-Messaoud / Oued Irara Krim Belkacem;
- ✓ Approche Oran / Es-sénia.

- Contrôle en route qui veille sur les aéronefs depuis leur transfert de l'approche ou de la tour de contrôle en montée jusqu'à atteindre leur niveau de croisière et delà jusqu'aux abords de l'aérodrome de destination.

En Algérie, le contrôle en route est effectué par un centre spécialisé qui gère la FIR (région d'information de vol). Il est situé à Alger (Oued Smar). Un aéronef après sa montée est transféré au centre de contrôle régional, puis il sera transféré d'un secteur de contrôle à un autre, jusqu'au moment où il entamera sa descente.

Le contrôle radar² est assuré dans le secteur TMA Centre Alger et la région de contrôle (CTA) d'Alger [3]. Pour le reste de l'espace, c'est le contrôle procédural qui est utilisé.

- Le service d'information de vol : Il est assuré par le Flight Information Center au niveau de l'ACC Alger pour la totalité du territoire ainsi que l'espace aérien maritime placé sous sa juridiction aux fins de contrôle de la circulation aérienne en dehors de l'espace aérien contrôlé;
- Le service d'alerte au bénéfice des aéronefs ayant déposé un plan de vol.

1.3 Le trafic aérien en Algérie

L'analyse de l'état du trafic aérien en Algérie ainsi que son évolution durant la période 2012-2013, nous permettra de ressortir certaines particularités, telles que : les flux principaux et la densité des secteurs de contrôle. Nous tenterons aussi une approche prévisionnelle du trafic aérien à l'horizon 2030, en se basant sur l'évolution de ce dernier depuis 1998. Cette analyse nous permettra d'identifier et de cibler les zones de trafic denses et donc sensibles qui définiront des axes d'améliorations possibles en terme de sécurité et de capacité.

² **Contrôle Radar** : Terme utilisé pour indiquer que les informations radars sont employées directement dans la fourniture du service de contrôle de la circulation aérienne.

Surveillance Radar : Utilisation du radar dans le but de fournir aux aéronefs des informations et conseils relatifs à des déviations significatives de sa route nominale, incluant les déviations en termes d'autorisation du contrôle de la circulation aérienne.

1.3.1 L'évolution du trafic aérien (Statistiques du trafic aérien 2012 - 2013)

Nous aborderons dans ce qui suit deux types de trafic aérien en Algérie à savoir :

- Le trafic aérien en route : nous permet d'évaluer la densité de ce dernier par secteur et les directions des flux principaux ;
- Le trafic aérien par aéroports : nous permet d'identifier les aéroports principaux (en nombre de mouvements).

1.3.1.1 Le trafic aérien en route

Le trafic aérien en route est comptabilisé par le nombre d'aéronefs survolant l'espace aérien algérien et pris en charge par le CCR d'Alger.

1.3.1.1.1 Le trafic par catégorie du vol en (2012-2013) :

Les statistiques seront basées sur deux types de trafic :

- Survols avec Escale : vol comportant au moins une escale sur le territoire national. Il est divisé en deux trafics, nationaux et internationaux ;
- Survols sans Escale (transit) : ensemble des vols ayant pour aéroports de provenance et de destination un aéroport autre que ceux situés à l'intérieur de l'espace aérien concerné (Vols sans atterrissage).

Le nombre de vols ainsi que les variations du trafic aérien en route par nature de vol et durant la période 2012-2013 sont présentés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Les variations du trafic aérien "en route" 2012-2013 [6].

	2012	2013	VAR% 13/12
SURVOLS AVEC ESCALE	132 227	136 457	3,2
Nationaux	69 170	69 010	-0,2
Internationaux	63 057	67 447	7,0
SURVOLS SANS ESCALE	72 116	78 909	9,4
TOTAUX	204 343	215 366	5,4

Le tableau 1.1 précédent nous permet d'illustrer ces variations dans la figure 1.3 qui suit :

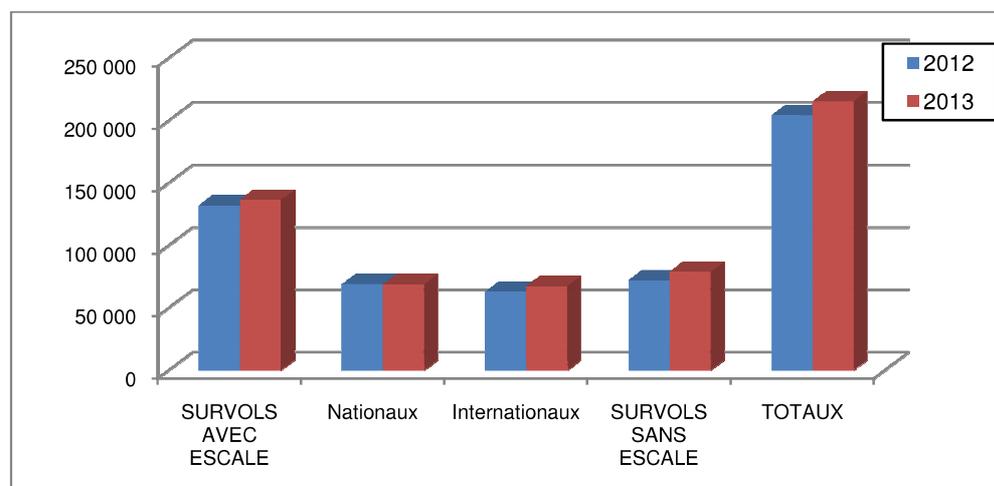


Figure 1.3 : Graphique de trafic en route 2012-2013.

En 2013, le trafic aérien en route a globalement enregistré une hausse de 5,4% par rapport à l'année 2012, comme il est constaté dans la figure 1.3 ci-dessus le "survol sans escale" étant le plus affecté par cette augmentation. Seul le "survol avec escale nationale" a enregistré une faible variation négative de -0,2%.

Durant la période 2012-2013, tous les survols ont connu une hausse expliquée principalement par :

- Les efforts des compagnies aériennes (Air Algérie, Aigle Azur, Air Littoral, Air France, etc.) pour répondre à la forte demande des passagers en provenance et à destination de l'étranger ayant été conséquents, le trafic international a augmenté ;
- Le renforcement des liaisons et augmentation du nombre de rotations avec les pays du Moyen Orient ;
- L'ouverture des nouvelles lignes (Alger-Montréal, Alger-Pékin) ;
- L'extension et rénovation de la flotte d'Air Algérie ;
- L'extension de la flotte Tassili Airlines par l'achat des nouveaux appareils et le recrutement des pilotes ;
- La mutation actuelle de l'économie algérienne (l'accroissement des investissements...) et la stabilité au point de vue sécuritaire.

1.3.1.1.2 Le trafic par secteur de contrôle en (2012-2013) :

Le trafic par secteur pour l'année 2013 a globalement augmenté. C'est le secteur "TMA Ouest" qui a connu la plus importante croissance estimée à 12,6%, suivi du secteur "TMA Centre" où il a été enregistré le plus grand nombre de vols, soit 116 880. Cependant le secteur "Sud-Est" a enregistré une variation négative.

Le trafic par secteur durant la période 2012-2013 ainsi que la variance et la parité pour chacun des secteurs, sont présentés dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Trafic par secteur 2012-2013 [6].

TRAFIC SECTEUR	2012	PAR (%)	2013	PAR (%)	VAR (13/12) %
TMA ALGER	107 165	24	116 880	24,8	9,1
TMA EST	96 122	21,6	97 347	20,7	1,3
TMA OUEST	56 682	12,7	63 798	13,5	12,6
SUD/SUD	58 659	13,2	62 470	13,3	6,5
SUD/EST	62 392	14	60 787	12,9	-2,6
SUD/CENTRE	45 233	10,2	49 705	10,6	9,9
SUD/OUEST	19 340	4,3	20 115	4,3	4
TOTAL	445 593	100,0	471 102	100,0	5,7

D'après la représentation des parts de trafic par secteur montrée dans la figure 1.4, il est à noter que les secteurs "centre" et "Est" sont les plus denses. Ceci est dû particulièrement à la localisation d'aérodromes internationaux dans les principales villes du Nord Algérien dont "Alger" la capitale et à la position géographique de ces secteurs qui constituent l'entrée et la sortie des flux de transit Nord-Sud et Est-Ouest.

Le secteur "Sud-Est" est classé troisième plus important secteur en 2012, compte tenu de la présence d'une zone pétrolière dans ce dernier (Voir Figure 1.16), mais en 2013, il est déclassé à la cinquième position.

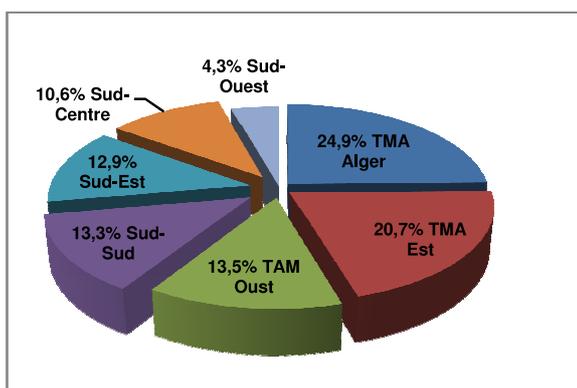


Figure 1.4 : Répartition des parts de trafic par secteur année 2013.

Le graphique ci-dessous (Figure 1.5) présente la densité de chaque secteur ainsi que les variations enregistrées durant la période 2012-2013.

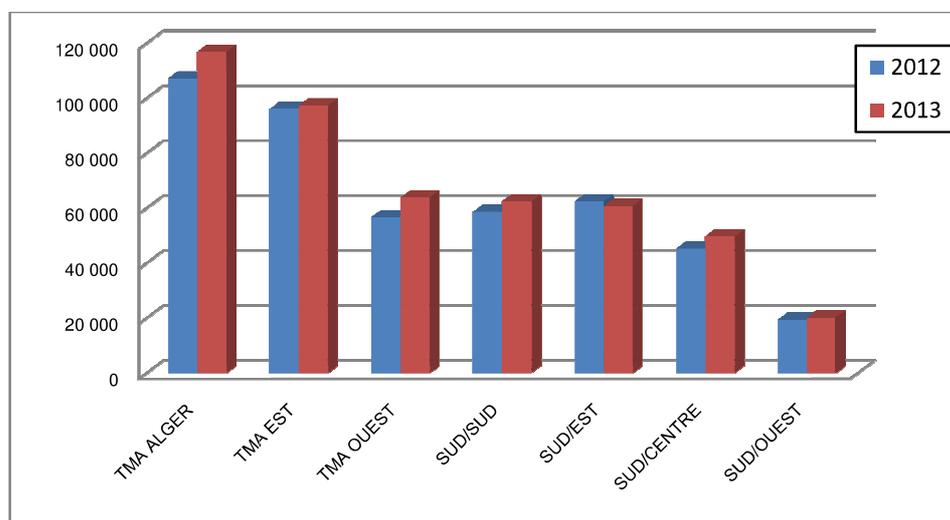


Figure 1.5 : Variation du trafic par secteur 2012-2013.

1.3.1.1.3 Les flux de trafic principaux :

La figure 1.6 représente les parts du trafic aérien par nature de vol pour l'année 2013. Comme nous l'avons déjà constaté, le trafic en survol sans escale est en constante évolution, il a connu une hausse remarquable. Ce dernier représente 37 % du trafic global.

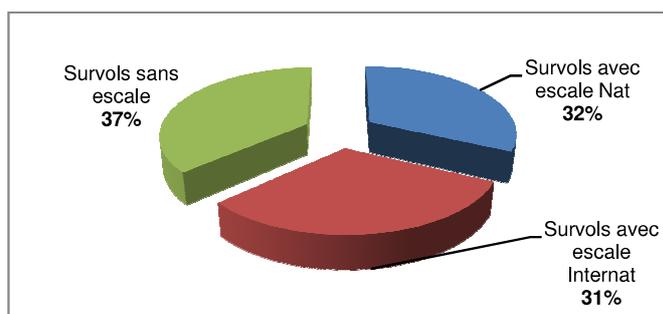


Figure 1.6 : Répartition des parts du trafic par nature de vol.

Outre les liaisons entre l'Algérie et le continent européen ainsi que les liaisons domestiques entre les principales villes du pays, il nous intéresse de connaître les directions des flux de transit sans escale et leurs concentrations. Ces informations sont indispensables pour cibler les zones critiques et les éventuels lieux d'implémentation des moyens de surveillance pour la prise en charge de ces flux de trafic.

En traitant les statistiques pour l'année 2013, nous constatons sur les figures 1.7 et 1.8 que les directions principales du "survol sans escale" sont orientées "Nord-Sud" et "Est-Ouest".

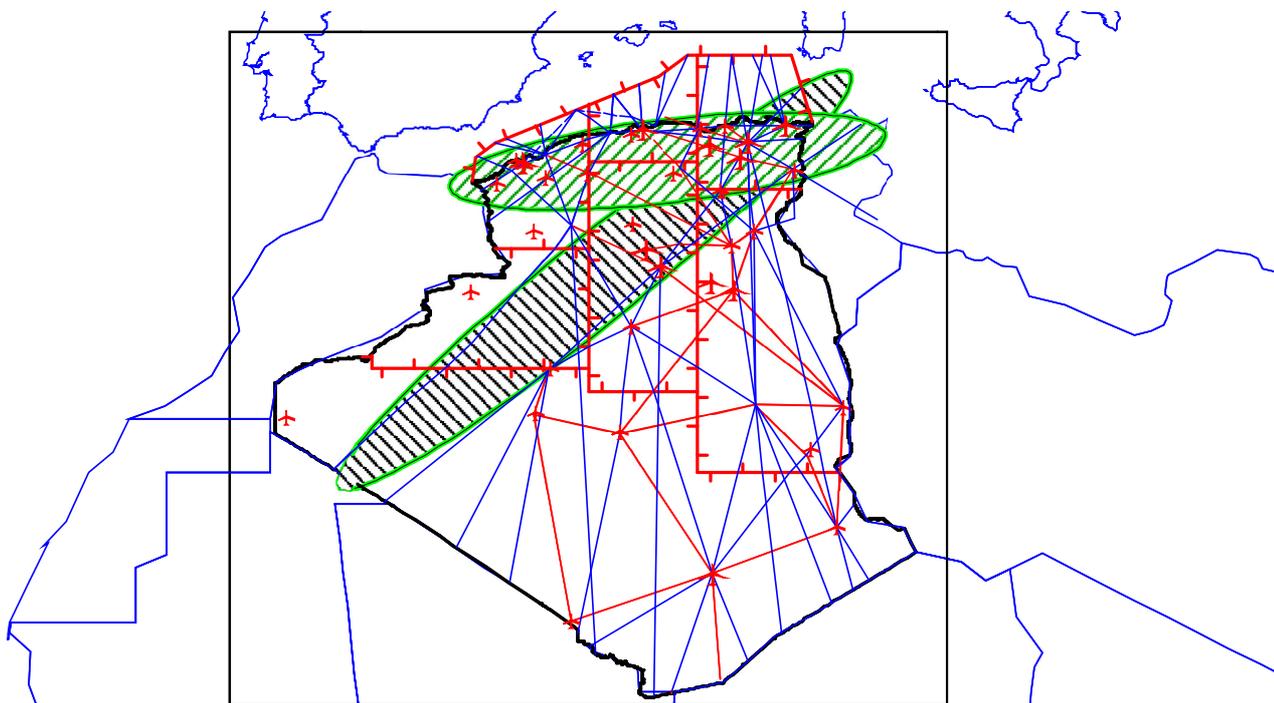


Figure 1.7: Les principaux flux de survol sans escale Est-Ouest.

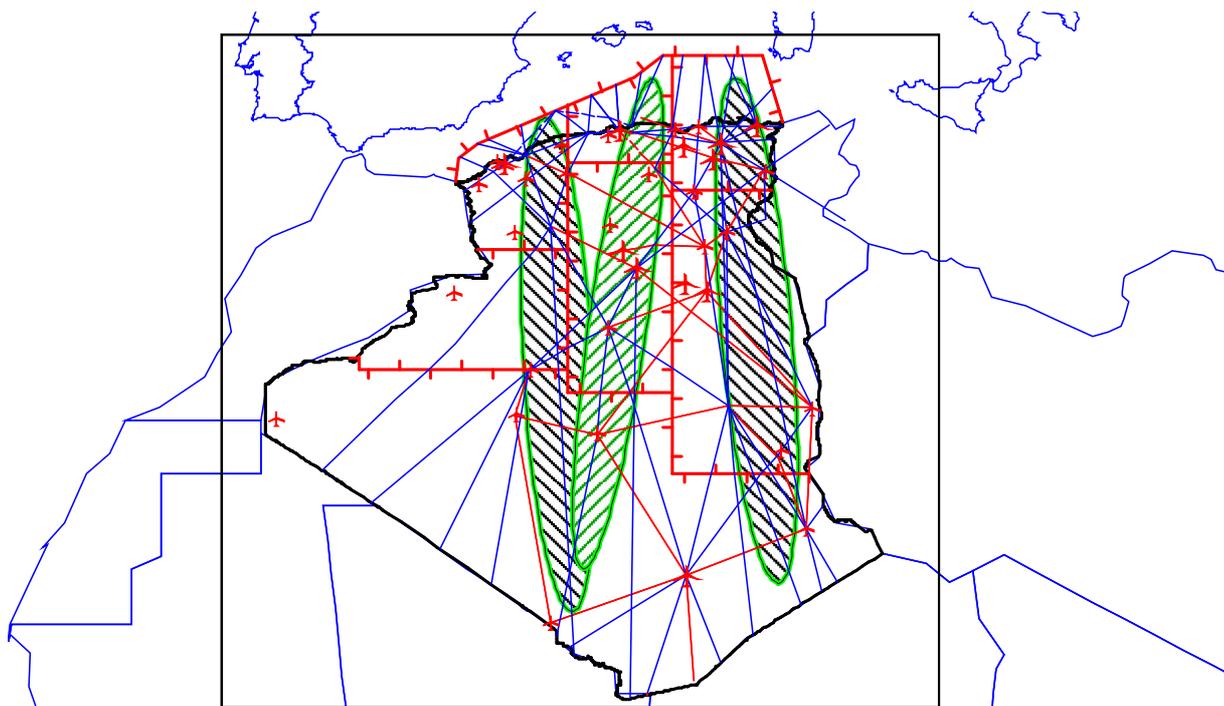


Figure 1.8: Les principaux flux de survol sans escale Nort-Sud.

Les flux de trafic présentés sur ces deux figures précédentes concernant le survol sans escale qui relient les zones géographiques suivantes :

- Axe 1 : Asie - moyen orient vers l'Afrique du Nord - Amérique du Nord ;
- Axe 2 : Europe vers Afrique du Nord - Amérique du Sud ;
- Axe 3 : Europe vers Afrique Sud.

1.3.1.1.4 Prévission de trafic "en route" à l'horizon 2030 :

Les prévisions de trafic remplissent une fonction importante, puisqu'elles servent à déterminer à l'avance les installations et services qui seront nécessaires pour répondre à la demande de déplacements par avion ainsi que les endroits et les moments où ils risquent d'y avoir des encombrements de l'espace aérien et des aéroports. Elles jouent aussi un rôle spécial dans la planification d'une mise en œuvre rationnelle des systèmes de : communications, navigation, surveillance et de gestion du trafic aérien (CNS/ATM) [4].

Le tableau 1.3 récapitule l'évolution du trafic aérien durant la période 1998-2013 et permet de déterminer la croissance moyenne de ce dernier estimée à 6,6%.

Tableau 1.3 : Évolution du trafic en route durant la période 1998-2013 [6].

	Survol avec escales		Survol sans escale	TOTAUX
	National	International		
1998	30 887	19 393	32 722	83 002
1999	43 691	28 629	34 173	106 493
2000	54 027	33 242	35 010	122 279
2001	61 657	39 925	33 444	135 026
2002	51 343	54 562	33 774	139 679
2003	47 506	38 440	36 581	122 527
2004	51 162	36 144	41 310	128 616
2005	47 470	38 827	45 101	131 398
2006	58 096	43 718	49 469	151 283
2007	58 836	45 404	54 268	158 508
2008	63 513	47 680	57 121	168 314
2009	66 560	52 207	58 100	176867
2010	63 406	57 010	64 620	185 036
2011	66 256	59 258	68 247	193 761
2012	69170	63057	72116	204343
2013	69010	67447	78909	215366
Croissance annuelle Moyenne (%)	5,5	8,7	6	6,6

La figure 1.9 ci-après montre que le trafic aérien en Algérie a connu une forte augmentation depuis 1998 jusqu'à la fin de l'année 2002 où certains événements comme le 11 septembre et en particulier la disparition de la compagnie Khalifa Airways ont fait chuter le trafic de manière significative.

Au-delà de l'année 2003, le trafic n'a pas cessé d'évoluer, toujours avec des variations fluctuantes, mais avec un nombre de vols plus élevé. En effet, le secteur aérien algérien maintient ses performances en raison de la qualité de ses aéroports et de leurs services, ainsi que l'évolution très rapide des technologies (ADS-C/CPDLC). En outre, l'ouverture de l'économie de marché en Algérie a permis l'accroissement du flux de passager et de marchandise hautement bénéfique pour notre pays.

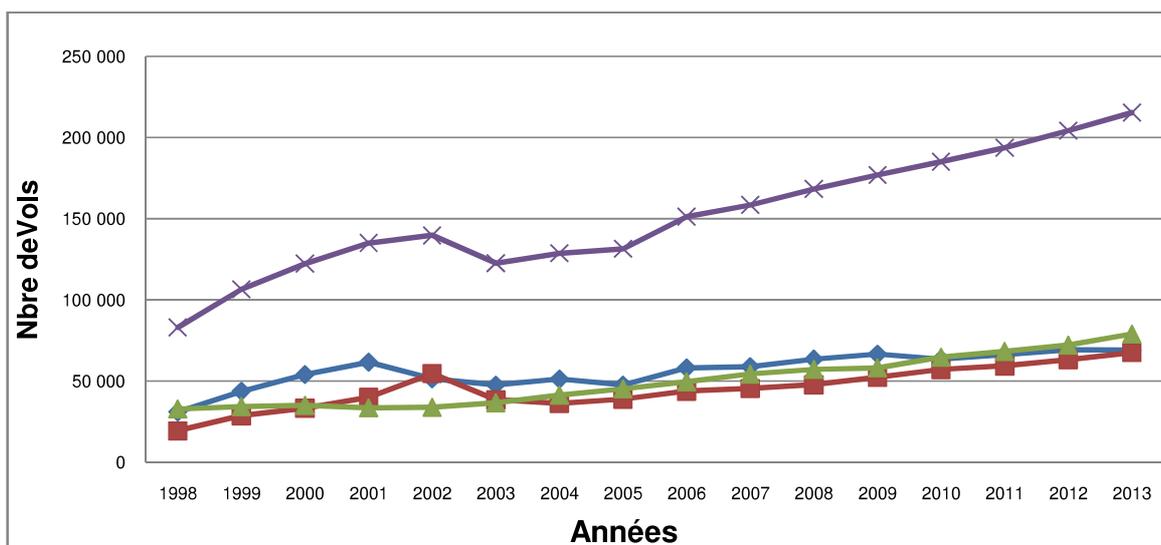


Figure 1.9 : Graphe d'évolution du trafic en route (1998-2013).

Le trafic prévisionnel pour les années à venir aura probablement tendance à reprendre son évolution croissante grâce à la sécurisation de l'espace aérien algérien par : l'exploitation des technologies ADS-C/CPDLC, l'application du contrôle radar dans la totalité de la partie nord de la FIR et l'utilisation des nouveaux systèmes CNS/ATM.

Cependant, nous nous tiendrons à l'hypothèse d'une augmentation moyenne de 6,6% par an du nombre de vols, pour l'extrapolation de l'évolution du trafic jusqu'à 2030 présentée dans le graphique 1.10. On remarque que le trafic passe de 215 366 à plus de 457 004 vols par an.

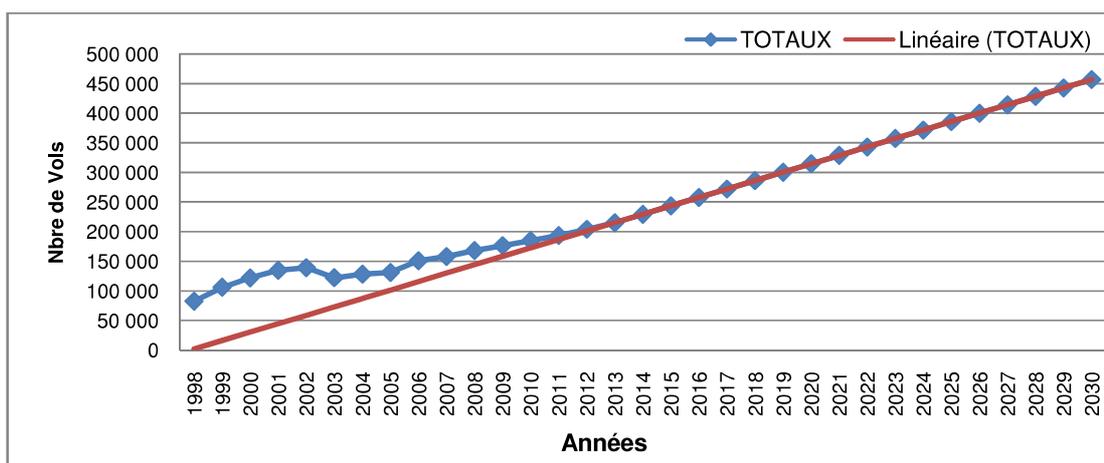


Figure 1.10 : Tendence d'évolution jusqu'à 2030.

1.3.1.2 Le trafic aérien d'aérodrome

Intéressons-nous particulièrement au "trafic aérodrome", qui va nous permettre d'identifier les principaux aérodromes en nombre de mouvements.

Les statistiques officielles de l'ENNA classent les mouvements d'aéronefs en deux types:

- **Mouvements commerciaux :** Mouvements d'aéronefs appartenant à des compagnies aériennes effectuant le transport des passagers et du fret (régulier, non régulier).
- **Mouvements non commerciaux :** Comprenant les mouvements d'aéronefs effectuant des vols d'aéro-clubs, vols privés, de travail et taxi aérien, de compagnies aériennes sans chargement (entraînement du personnel navigant, mise en place, essai, etc.), évacuation sanitaire des nationaux et étrangers.

Le nombre de mouvements (arrivées + départs) enregistrés durant l'exercice 2013 sur l'ensemble des 36 aérodromes ouverts à la CAP s'élève à 203 187, soit une augmentation de 9,5% par rapport à l'année 2012. Pour les mêmes raisons déjà citées dans le paragraphe 1.3.3.1.

Tableau 1.4 : Variation du trafic aérien d'aérodrome [6].

	2012	2013	Variation 12/13 (%)
Mouvements commerciaux	117 496	125 545	6,9
Nationaux	55 415	60 893	9,9
Internationaux	62 081	64 652	4,1
Mouvements non commerciaux	68 015	77 642	14,2
TOTAUX	185 511	203 187	9,5

Le tableau précédent nous permet d'illustrer ces variations dans le graphique de la figure 1.11 ci-dessous :

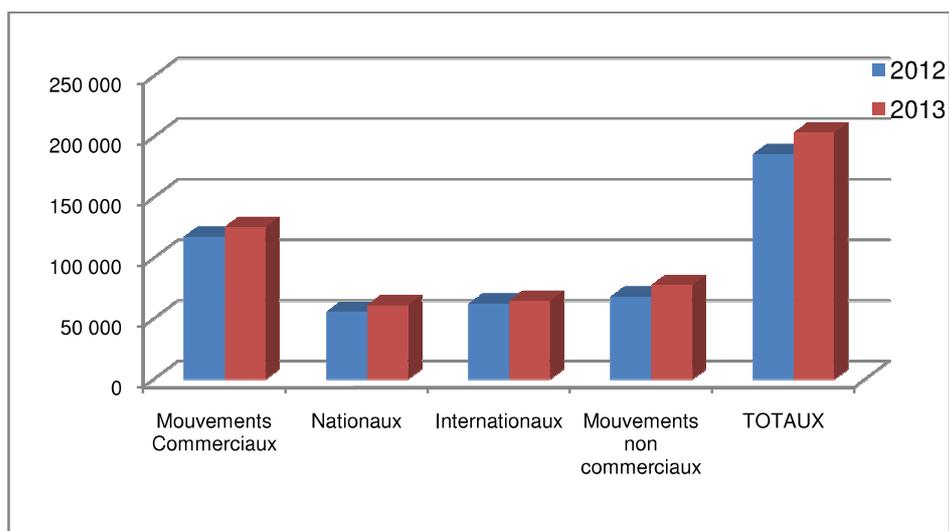


Figure 1.11 : Le trafic aérien d'aérodrome 2012-2013.

Le trafic commercial total en 2013 s'élève 125 545 mouvements, répartis comme suit :

- 64 652 mouvements internationaux, représentant 51,5 % du total commercial ;
- 60 893 mouvements nationaux, représentant les 48,5% restant.

Par ailleurs, on note que les aérodromes internationaux ont traité 83,5% du trafic commercial total. La figure 1.12 montre les onze aérodromes ayant traités le plus grand nombre de mouvements commerciaux durant l'année 2013.

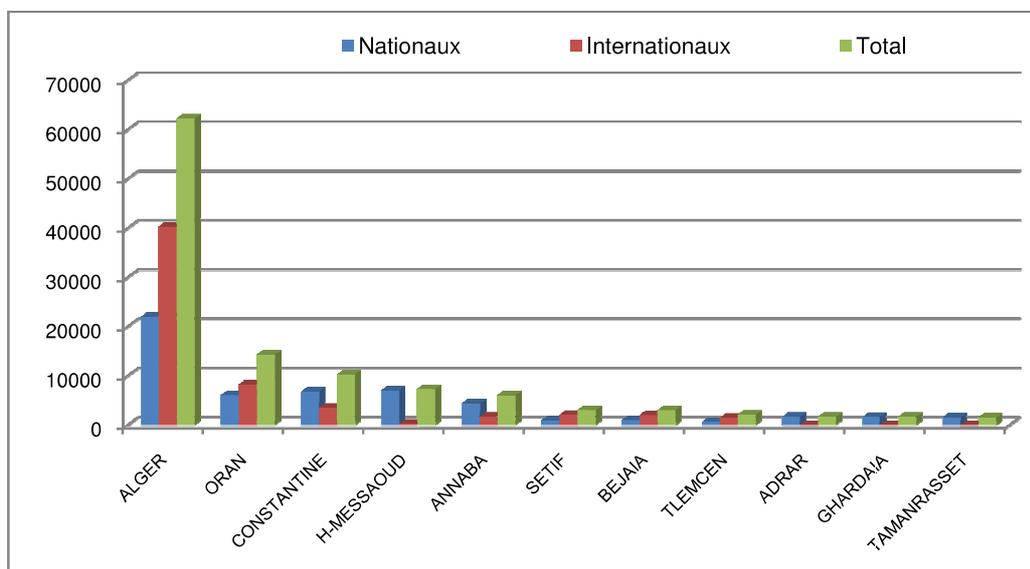


Figure 1.12 : Représentation des mouvements commerciaux des aérodromes internationaux en 2013.

Pratiquement, la grande majorité du trafic est entre Alger et plusieurs destinations sur le territoire national ce qui rend l'aérodrome Houari Boumediene très sollicité en mouvements aussi bien départs qu'arrivés.

En prenant en compte tous les types de vols confondus, on remarque sur la figure 1.13 que l'aérodrome de Hassi Messaoud passe de la quatrième à la deuxième position après Alger. Ceci est dû à la localisation d'une grande zone pétrolière dans cette région.

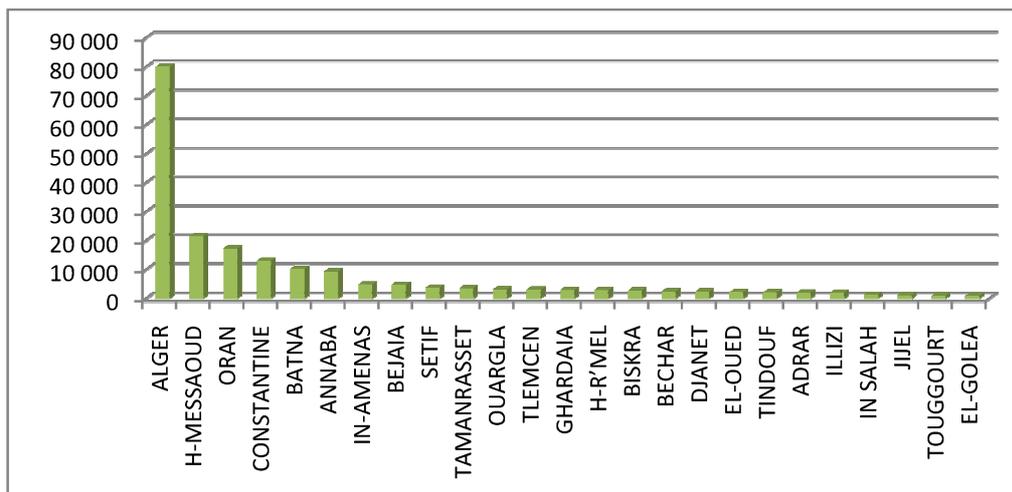


Figure 1.13 : Mouvements totaux « commerciaux / non commerciaux » de certains aérodromes.

1.4. Situation actuelle Communication, Navigation, Surveillance

1.4.1. Communication

- Les communications vocales air/sol se font par VHF, dans :
 - Les secteurs centre, Est et Ouest ou une double couverture est disponible à partir de FL 200 ;
 - Les secteurs Sud/Est, Sud/Centre et Sud/Ouest, dispose d'une simple couverture ;
 - Le secteur Sud/Sud n'est pas totalement couvert par la VHF. La HF est utilisée pour les zones non couvertes par les moyens de communication.
- Les communications du service fixe : La figure I.14 présente les liaisons télégraphiques (RSFTA) nationales et internationales. Il existe quatre liaisons télégraphiques internationales avec l'Algérie : Tunis, Niamey, Casablanca et

Tableau 1.5 : Moyens de communication.

Type d'Équipement	Nombre
Antenne avancée	20
Station VSAT ³	15
Station Émetteur-Récepteur haute Fréquence	08
Emetteur-Récepteur VHF Tour	34
Emetteur-Récepteur VHF CCR	03
Enregistreur	27
Station Inmarsat	05
Thuraya	13

1.4.2. Navigation

Le tableau 1.6 répertorie les équipements de navigation en cours d'exploitation.

Tableau I.6 : Moyens de Radionavigation.

Type d'Équipement	Nombre
ILS (Instrument Landing System)	13
VOR (VHF Omni Range)	39
DME (Distance Measuring Equipment) Route	35
DME Atterrissage	10
NDB (Non Directional Beacon)	33
VOR Mobile	06
Radiogoniomètre	09

Pour renforcer et améliorer la sécurité, la capacité et l'efficacité du système de la navigation aérienne de l'espace algérien, l'ENNA a lancé un projet d'acquisition de nouveaux moyens de radionavigation (29 ILS, 25 AIPI, 9 VOR et 5 DME).

³ Technologie VSAT permet d'établir des communications point à point par satellite avec des antennes de taille réduite.

1.4.3 Surveillance

La surveillance est un moyen d'acquérir la position des aéronefs de telle sorte qu'un contrôleur de la circulation aérienne peut établir des séparations minimales entre ces aéronefs.

La surveillance est multiforme, elle peut être indépendante : dans ce cas de figure, la position de l'avion est repérée à son insu. Aucun équipement particulier n'est nécessaire à bord. Les moyens de surveillance indépendante sont :

- Radar de surveillance primaire (PSR) ;
- Radar de mouvement à la surface.

Si elle est coopérative : cette forme de surveillance est ainsi appelée, car elle nécessite la collaboration de l'avion. Le calcul de la position est obtenu par un équipement au sol. C'est le principe de :

- Radar secondaire ;
- Mode S ;
- Multilatération.

Cas d'une surveillance dépendante : puisque l'avion connaît sa position grâce à ses systèmes de navigation, il peut la transmettre au sol comme tout autre paramètre de bord. Ce type de surveillance dépend donc totalement des moyens embarqués, il suffit d'exploiter un lien de communication avec le sol. On parle alors de :

- Report de position ;
- Surveillance automatique dépendante qui peut prendre deux formes: Contrat (ADS-C) ou Diffusion (ADS-B).

Jusqu'à l'année 2004, la seule méthode utilisée dans le contrôle de la circulation aérienne est la méthode de contrôle aux procédures. Elle est basée sur les comptes rendus de position des aéronefs effectués par les pilotes. Toutefois, un système de visualisation du radar de Palma (Espagne) a été mis en place depuis quelques années au niveau du centre de contrôle régional pour la surveillance des avions en entrée et sortie de la FIR Algérienne.

Par ailleurs, l'ENNA (Établissement National de la Navigation Aérienne) a réalisé un vaste programme de modernisation de ses moyens et systèmes de traitement automatique à l'usage des services du trafic aérien. Ce programme nommé TRAFCA pour Traitement automatique de Fonctions de la Circulation aérienne a entre autres pour objectif de mettre en œuvre un système de visualisation en temps réels des mouvements aériens dans l'espace national.

A cet effet, il a été réalisé pour la partie surveillance : un radar primaire (PSR) et cinq radars secondaires mono pulse (SSR) de portée théorique 256 NM / FL 600. Le tableau 1.7 ci-dessous donne les coordonnées de ces radars :

Tableau 1.7: Les stations radars actuelles et leurs sites d'implantations.

Type	Station radar	Site	Les coordonnées (Latitude et Longitude)
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	36°40' 37"N 003° 10' 50" E
SSR	Seraïdi	Annaba	36° 54' 43.40"N 007° 41' 07.10" E
SSR	Murdjadjo	Oran	35° 41' 46.88"N 000° 46' 16.20" W
SSR	Guemmar	El Oued	33° 31' 03.99" N 006° 45' 52.16" E
SSR	Bouderga	El Bayadh	33° 37' 37.36"N 001° 03' 51.20" E

Il faut noter que la couverture des radars existants, présentée sur la figure I.15 est indicative et valable au moins à partir de niveau FL100. En effet, la couverture se dégrade en fonction de la présence de relief, en particulier sur la région de Boussaâda.

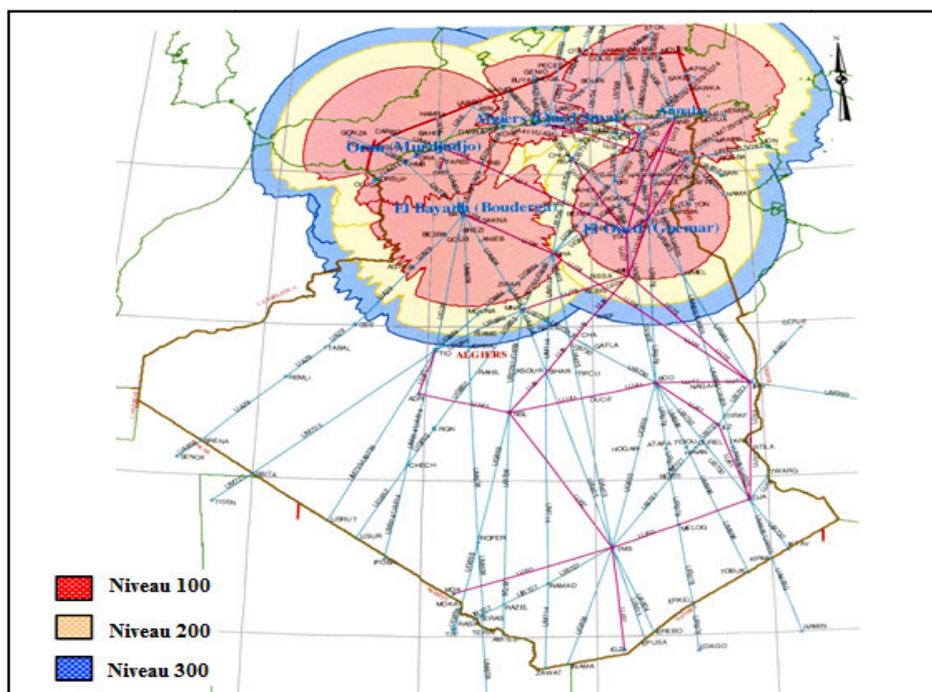


Figure 1.15 : Couverture radar actuelle [7].

En complément pour la partie surveillance, la Surveillance Dépendante Automatique en mode Contrat (ADS-C) est utilisée au CCR d'Alger pour les espaces aériens non couverts par les radars et pour la moitié sud de l'Algérie.

Un radar de surface est également installé à l'aérodrome Houari Boumediene pour la gestion des mouvements au sol qui cause certains problèmes après la finalisation du projet d'extension des parkings avions ainsi l'existence de plusieurs zones aveugles pour le contrôleur, notamment lors de l'évolution des avions dans la zone de fret.

Par ailleurs, la démonstration réalisée dans l'appendice A nous a permis de montrer qu'à long terme et dans un certain contexte opérationnel, ces technologies montreront probablement leurs limites, des améliorations pourront alors être apportées au contrôle aérien algérien en termes de sécurité et de capacité, notamment par l'implémentation des nouvelles technologies plus efficaces telles que la multilatération et l'ABS-B.

1.4.3.1 Besoins opérationnels de surveillance en Algérie

Il est clair que les besoins opérationnels doivent être exprimés par les exploitants aériens, à savoir : les autorités de l'aviation civile, les compagnies aériennes et les contrôleurs aériens. La sécurité est le facteur commun en terme de besoin pour ces exploitants.

Pour les autorités de l'aviation civile, les besoins consistent à :

- Faire face à l'augmentation globale du trafic aérien ;
- L'amélioration des performances des opérations SAR ;
- Diminution des coûts d'investissement et d'exploitation ;
- Respecter les standards internationaux.

Pour les compagnies aériennes, les besoins consistent à :

- Augmenter la sécurité de leurs vols ;
- Optimiser le temps de vol et donc son coût par la réduction de la consommation fuel et des retards ;
- Augmentation de la capacité de l'espace aérien et de celle des aéroports.

Pour les contrôleurs aériens, les besoins consistent à :

- Mettre en place des moyens de surveillance là où il n'y en a pas ;
- Augmenter la sécurité des moyens de surveillance radar déjà existants (back up) ;
- Diminuer la charge de travail dans les zones à forte densité de trafic ;
- Mettre en place des outils de protection et d'alerte de sécurité.

Pour cela, un audit doit être fait auprès de ces derniers pour identifier d'une manière précise les problèmes d'exploitation rencontrés lors de l'exécution de leur tâche quotidienne. [1]

Ci-après sont présentés les besoins non exhaustifs de surveillance air/sol que nous avons pu identifier à l'issue de l'analyse de la situation CNS/ATM en Algérie :

1.4.3.1.1 Besoins de surveillance d'approche et de surface :

- La surveillance visuelle exercée dans certains aéroports et zones terminales trouve vite ses limites dès que la visibilité se dégrade.
- Le volume et la complexité du trafic civil et militaire dans presque toutes les zones d'approche (sauf pour celle d'Annaba) à cause de leur proximité des zones à statut particulier ;
- Les vols VFR et IFR (évoluant principalement au-dessous du niveau 190) sont autorisés dans la majorité des aéroports ce qui rend le travail du contrôleur difficile, surtout avec l'absence de tout moyen de visualisation de la situation environnante.
- Les opérations de contrôle d'approche procédural au niveau de certains aérodromes devront être améliorées pour se préparer à la transition aux services radars.

Une chaîne d'améliorations opérationnelles à court terme est nécessaire par la mise en place des infrastructures pour soutenir les opérations au cours des deux prochaines décennies. Les améliorations commenceront par la mise en place de services de contrôle radar au niveau des aéroports et des zones terminales sélectionnés.

1.4.3.1.2 Besoins de surveillance en route :

- La zone pétrolière située dans le secteur "Sud/Est", non couverte par les radars est caractérisée par sa densité de trafic importante. Elle est constituée principalement de mouvement d'aviation générale (taxi et travailleurs aériens) entre les bases pétrolières, nombreuses dans cette région, comme illustré dans la figure 1.16.

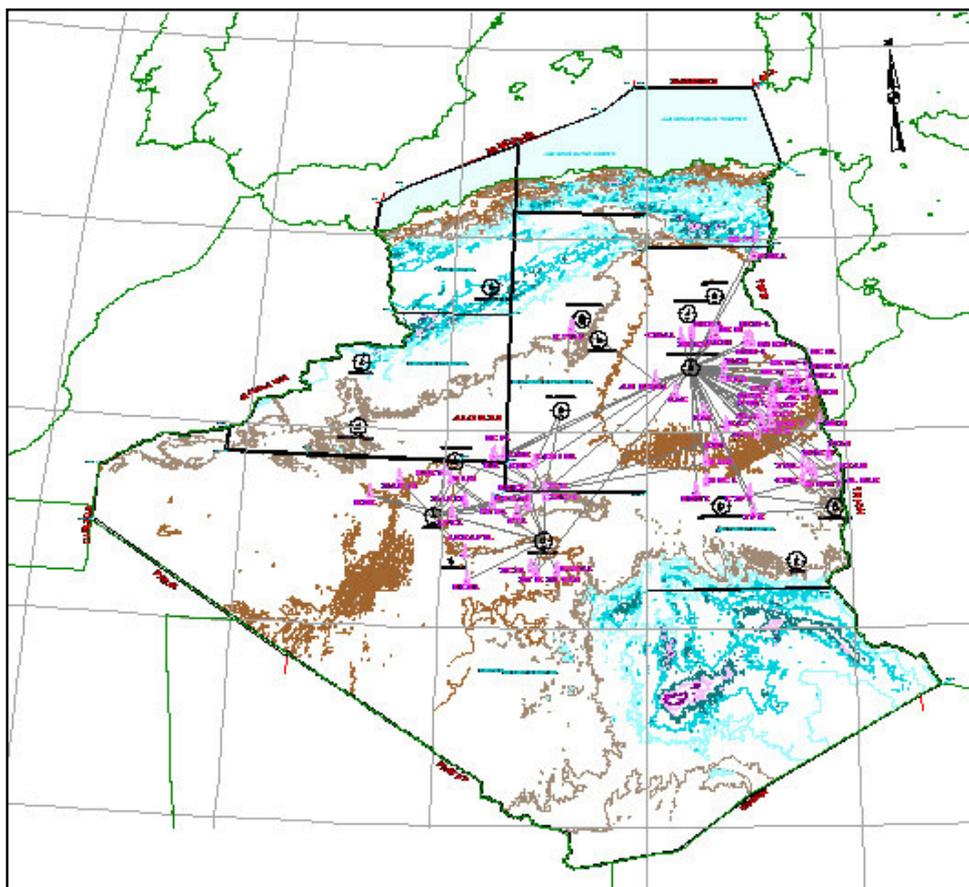


Figure 1.16 : Sectorisation de l'espace aérien et champs pétroliers [7].

- La couverture simple fournie par les cinq radars installés dans la partie nord de l'Algérie (secteurs : Centre, Est et Ouest), devraient être doublés vu l'importance et la complexité relatives de cette zone qui constitue l'entrée et la sortie des flux européens, où se concentre la majorité des zones militaires interdites au survol la plupart du temps. Le niveau de sécurité que fournissent les centres de contrôle d'approche des aéroports d'Alger, Oran, Constantine, Annaba et de Hassi Messaoud n'en sera que rehaussé ;
- Absence totale de couverture radar dans la moitié sud du secteur "Sud/Centre", sachant y a présence de deux nœuds liés par les villes d'El Goléa et Ghardaïa formant un axe important pour le transit Nord-Sud ;
- La limitation de la couverture radar, en dessous du niveau de vol 100, due à la présence de reliefs dans certaines parties du secteur Centre peut poser des problèmes de détection de vols domestiques qui évoluent à ces niveaux. Sachant qu'un des principaux axes de la FIR Algérie est l'axe Est-Ouest ;

- Couverture des principaux axes Nord-Sud est nécessaire sachant que le survol sans escale qui représente le principal trafic évoluant dans cette partie enregistre de forte augmentation ces dernières années, près de 9,4 % entre 2012-2013 (voir tableau 1.1).

1.4.3.2 Séquence de mise en œuvre proposée des installations de surveillance

Une des raisons principales que l'ADS-B ne sera pas entièrement mis en application pendant beaucoup d'années est le coût élevé d'équiper des aéronefs de toutes les avioniques essentielles à transmettre et recevoir l'information de l'ADS-B. Donc, il y aura une période de transition compliquée par le fait que l'ADS-B et le radar utilisent une technologie très différente.

Heureusement, la technologie de multilatération :

- Offre une performance équivalente à celle du radar ;
- Ne demande pas de modifications substantielles de l'avionique ni d'investissements de l'exploitant d'aéronefs ;
- Fournit une transition élégante à l'ADS-B en utilisant la même infrastructure au sol.

Ce choix évitera d'entreprendre aussi les modifications lourdes du SDPD (Surveillance Data Processing and Distribution) nécessaires pour le traitement des données ADS-B au niveau du centre de contrôle d'Alger, en attendant qu'un système indépendant capable de traiter les données ADS-B soit installé au niveau de chaque tour et/ou approche.

La stratégie de mise en œuvre recommandée implique une approche par étapes consistant à décomposer la réalisation des installations de surveillance en trois étapes. Étant donné qu'il ne sera pas possible de réaliser simultanément toutes les améliorations, une mise en œuvre échelonnée comblerait les lacunes dans la couverture des radars actuels et les services de contrôle fournis.

L'Étape 1: Une couverture de surveillance par multilatération des aéroports les plus fréquentés est fortement souhaitable.

L'Étape 2 : Implique la mise en place de la plus petite série des installations de CNS nécessaires pour fournir la couverture simple à travers toute la FIR. Dès que cela sera réalisé, les sites déjà proposés dans la première étape, seront mis à

niveau pour être adaptés à la surveillance ADS-B et pouvoir soutenir les contrôles d'approche à ces endroits ainsi que les opérations en route.

L'Etape 3 : Consiste à mettre en place les sites restants nécessaires pour doubler la couverture des radars dans la partie nord de la FIR et les remplacer au futur lorsque leur limite de vie sera atteinte.

1.5 Conclusion

L'Algérie jouit d'une position géographique privilégiée quant au passage de certains flux de trafic Europe-Afrique. L'analyse du système CNS/ATM et notamment de sa partie surveillance montre que des compléments ainsi que des améliorations peuvent être envisagés afin de rehausser le niveau de sécurité des vols et augmenter la capacité de l'espace aérien.

Ces mesures nécessitent l'installation d'autres moyens de surveillances modernes reposant sur une technologie performante, fiable et accessible comme l'ADS-B et la multilatération.

CHAPITRE 2

CONCEPT DE LA SURVEILLANCE PAR MULTILATÉRATION

2.1 Introduction

Ces dernières années, la multilatération aéronautique est devenue la technologie de surveillance la plus importante pour le contrôle de trafic aérien.

Actuellement, le système est utilisé dans plusieurs aéroports européens et dans le monde. Cette nouvelle technologie de surveillance assure une performance équivalente à celle du SSR traditionnel et au-delà pour un moindre coût d'acquisition et de maintenance. Mais le plus important, c'est que cette technologie offre des avantages économiques pour une transition définitive à un environnement intégralement ADS-B.

Dans ce chapitre, on décortique la technologie multilatération qui est caractérisée par deux aspects essentiels : utilisation d'une technique de positionnement précise (TDOA) et application sur plusieurs types de signaux émis par la majorité des avions modernes.

2.2 Généralités

2.2.1 Principe de fonctionnement

Un ensemble de plusieurs stations de réception dispersées traitent les signaux cibles. Chaque paire de stations mesure la différence de temps de réception d'un même signal. Un résultat seul permet de situer l'émission sur un hyperboloïde : lieu des points à différence de distance constante de deux points de référence désignés comme foyers. La répétition de ces mesures et l'accumulation des résultats sur le même signal reçu sur plusieurs paires de stations désignent la position cible par l'intersection de plusieurs hyperboloïdes.

Trois mesures au moins sur trois paires indépendantes de récepteurs sont nécessaires à la localisation complète. La garantie que les traitements correspondent au même signal se fait par reconnaissance d'une cohérence

spatiale des résultats, l'intersection de trois hyperboloïdes correspondants à des signaux différents n'étant certainement pas ponctuelle.

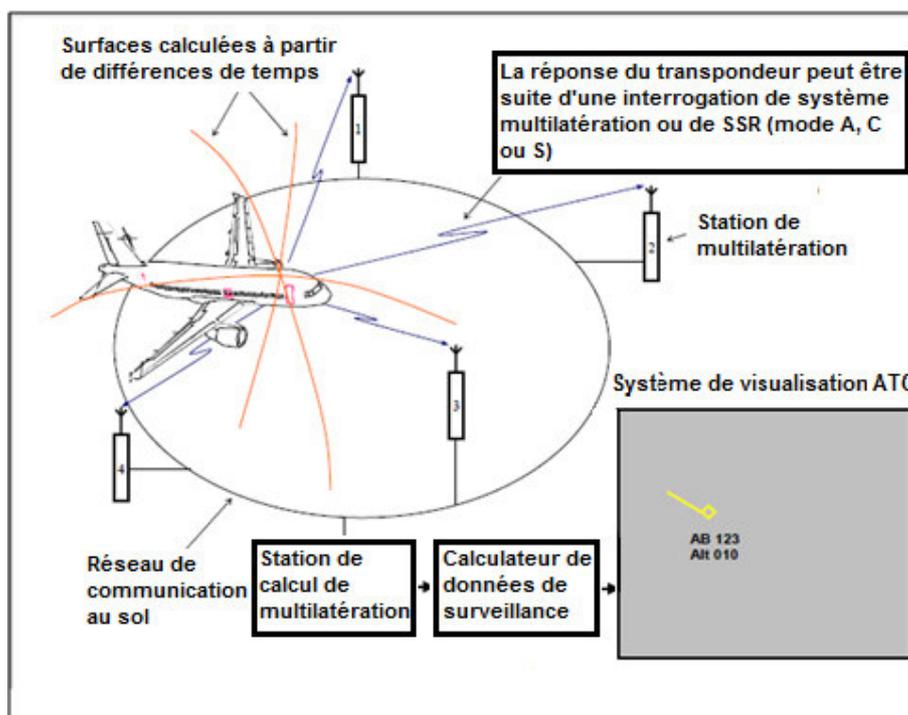


Figure 2.1 : Schéma de principe de la localisation multilatération [8].

Le temps d'émission cible n'est pas une référence nécessaire. Les signaux cibles peuvent donc être quelconques, asynchrones de toute chronométrie du système. Il n'existe ainsi pas de signal particulièrement dédié à la mesure ni sollicité pour elle. Les éventuels signaux préexistants sont même à privilégier pour alléger la charge radioélectrique globale.

Dans cette logique, les signaux SSR émis par les transpondeurs sont suffisamment universels à tous types d'exploitation pour avoir été choisis dans le domaine de multilatération ATC. En outre, leur capacité largement développée à l'identification de cibles et au report de l'altitude barométrique est bien sûr décisive pour compléter les fonctions de localisation seules [9].

La multilatération calcule indépendamment la position géographique en 2D, la position verticale est obtenue par interrogation en code C de mesure barométrique (niveau de vol) ou en 3D, où la position verticale géométrique est calculée si plus de capteurs sont installés.

La précision d'un système de multilatération dépend de la position de la cible par rapport aux stations de réception.

La multilatération est utilisée principalement pour la surveillance à la surface d'aéroport et en approche. Cependant, elle peut être utilisée avec plus de performance dans l'espace aérien en route.

2.2.2 Application de la multilatération

La multilatération a introduit aux services de la navigation aérienne de nouvelles méthodes de mise à niveau élargie ou/et crée des nouveaux espaces aériens contrôlés.

Dans un passé récent, la couverture d'un espace aérien par un système de contrôle SSR traditionnel n'est pas totale, des limitations existes ce qui oblige les services de la navigation à trouver des solutions en termes de sécurité du vol. Dans le cas de la multilatération, ces limitations sont moins importantes. Ces performances sont meilleures que celles du SSR pour des espaces équivalents.

La multilatération se caractérise par une simplicité de déploiement avec des infrastructures et une exploitation moins coûteuses.

Elle permet les applications suivantes [10]:

2.2.2.1 Surveillance à la surface de l'aéroport

La multilatération est devenue un élément essentiel des systèmes avancés de guidage et de contrôle des mouvements à la surface (A-SMGCS), qui sont appliqués dans la majorité des aéroports du monde.

L'addition des stations de multilateration stratégiquement placées fournit au contrôleur une vue claire sur la situation au sol, même pour les zones les plus cachées à la surface ; avec une bonne précision de localisation et une identification de la cible indépendamment de la situation météorologique.



Figure 2.2 : Exemple d'une visualisation sur écran de l'aéroport de Copenhague [10].

2.2.2.2 Multilatération en approche ou terminale

Dans de nombreux aéroports à travers le monde, les opérations à basse altitude en secteur final sont très rétrécies par la présence des obstacles topographique qui freine les interrogations d'un radar secondaire, ce qui empêche le contrôle au-dessous d'une certaine altitude.

Parmi les solutions proposées, c'est d'installer un ou plusieurs radars secondaires aux alentours de ces aéroports ; mais, économiquement cette opération n'est pas bénéficiaire. Techniquement, l'installation d'un système de surveillance de multilatération est plus avantageuse en terme opérationnel. Non seulement la multilatération est moins coûteuse, mais aussi, elle peut fournir une couverture parfaite avec un suivi précis et rapide de la phase terminale.

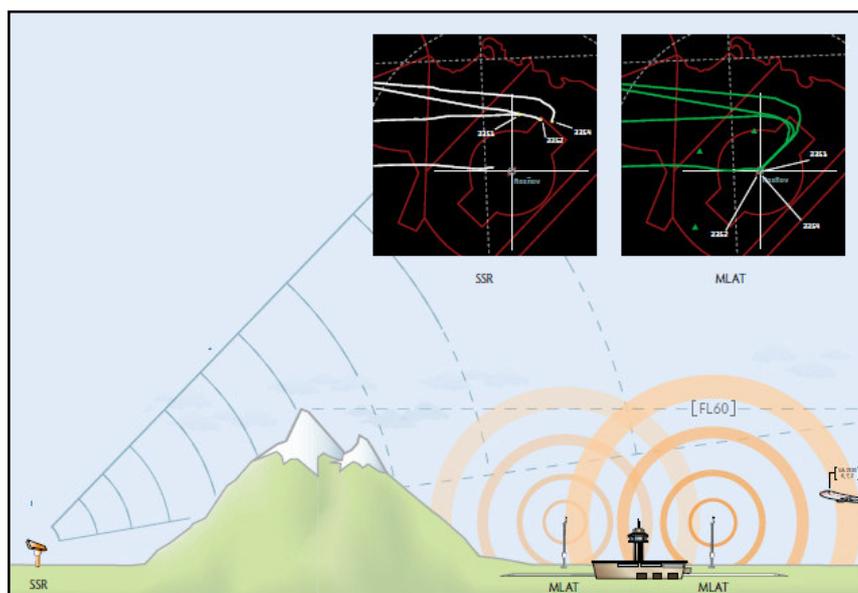


Figure 2.3 : Multilatération en phase terminale [10].

2.2.2.3 La multilatération étendue WAM (Wide Area Multilateration)

Le besoin de la surveillance de la circulation aérienne au-dessus des zones non couvertes par le radar secondaire a obligé les services de contrôle de profiter des avantages de la multilatération, par rapport à l'installation d'un nouveau radar.

Dans la WAM, les stations sont de plus en plus lointaines les unes des autres avec une distance minimale de 100 km. Plusieurs installations à travers le monde, montre que la WAM assure une couverture plus étendue, plus précise, moins coûteuse et rapidement opérationnelle qu'un radar secondaire.

2.2.2.4 Precision Runway Monitoring

Une importante application de la multilatération consiste à réduire le temps entre atterrissages, tout en préservant la sécurité de vol.

Pour les aéroports à pistes d'atterrissage parallèles, les opérations de décollage des avions se font séparément, car la distance entre les pistes ne permet pas deux décollages adjacents sous IFR, pour le cas de l'approche ; c'est presque impossible dans des mauvaises conditions météorologiques.

La solution proposée pour ces cas est l'introduction d'un radar très précis à balayage électronique nommé Precision Runway Monitor (PRM). Ce dernier permet de diminuer la distance vers 3 300 ft en approche des pistes adjacentes,

mais son coût est très élevé. Finalement, son installation est restée très restreinte.

La multilatération peut assurer des performances plus élevées que celle du radar avec un moindre coût ; la MLAT PRM (Multilateration Precision Runway Monitor) a augmenté le gain de plus de 30%, en différentes conditions météorologiques.

La multilatération PRM est devenue la solution la plus économique pour les aéroports à forte densité, plus particulièrement dans les régions où il est difficile de construire de nouveau aéroport.

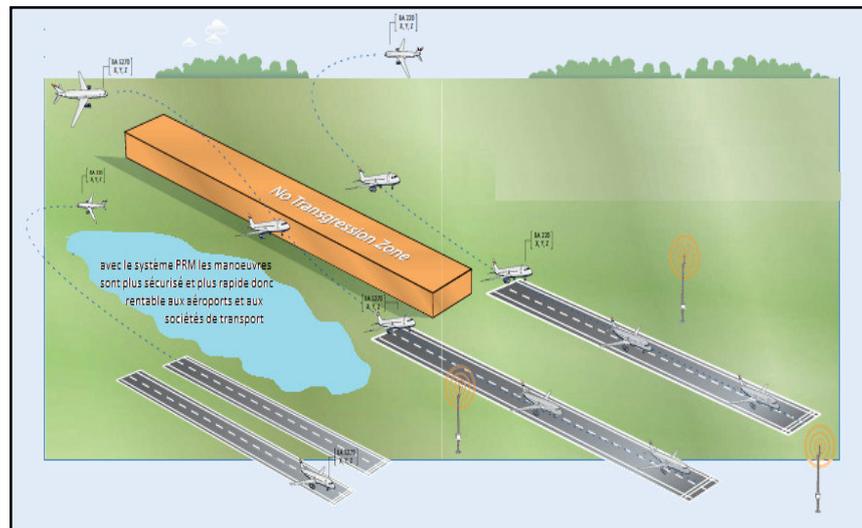


Figure 2.4 : La multilatération PRM [10].

2.3 La technique multilatération

2.3.1 Type de transpondeurs

La coopération de la cible permet la fonction d'identification dont la richesse dépendra des équipements à bord : transpondeur Mode A-C ou Mode S.

- **Mode S (Sélectif)** : les informations d'identification (Code A, flight ID) peuvent être directement sollicitées par échanges sélectifs. Les squitters transmettent l'adresse technique Mode S. Certaines balises multilatération ont des fonctions d'émission d'interrogations en mode S qui peuvent être mises en œuvre une fois cette adresse technique acquise.

- **Mode A-C** : Le simple décodage des signaux cibles (Codes A-C) permet la fonction d'identification et le report de la position verticale barométrique. La difficulté réside dans l'interprétation entre l'identification du vol ou son niveau. La particularité des réponses Codes A ou C (impulsion D1 non présente en code C) permet par certains traitements de poursuite et une référence à l'altitude géométrique de lever fréquemment l'incertitude. Cependant, la levée de toute ambiguïté d'identification passe par l'émission d'interrogations Modes A-C par le système de multilatération lui-même. [11]

Tableau 2.1 : Les signaux d'interrogations disponibles [9].

Format	Informations	Disponibilités	Qualité
Mode A	Identification (A)	Sur toute interrogation SSR A-C (plus de 100/s par XPDR en espace central Europe)	12 bits
Mode C	FL (C)		Pas : 100 ft
Mode S squitter	Adresse Mode S	Spontané (taux #1 S)	24 bits
Mode S extended squitter	Adresse Mode S ; Position lat-long; FL ; FI (Flight Ident)	Spontané	24 bits WGS 84 Pas 25 ft
ACAS court	Adresse Mode S ; FL	Sur interrogation ACAS	24 bits 25 ft
ACAS long	Adresse Mode S ; FL ; coordination air/air		
Surveillance élémentaire Mode S	Adresse Mode S ; (A ou C) ; FL	Sur interrogation Mode S	25 ft
Surveillance enrichie Mode S	Adresse Mode S ; (A ou C) ; FL ; Data link		

2.3.2 Architecture du système

Théoriquement pour une localisation 3D, il est nécessaire de disposer de quatre balises à portée radioélectrique de la cible.

En effet, trois balises (0, 1, 2) fournissent deux mesures indépendantes seulement: t_0-t_1 ; t_0-t_2 . La différence t_2-t_1 est déduite des deux précédentes et n'apporte aucune information supplémentaire.

Pour la couverture d'espaces vastes (approches ou en route), en particulier aux altitudes basses, cette condition théorique appliquée aux contraintes de l'horizon radioélectrique mène à multiplier le nombre de balises.

Pour la couverture d'un aéroport, une localisation 2D peut suffire avec la condition théorique de disposer de trois balises en visibilité. Cependant, une contrainte forte s'exprime en termes d'environnement: réflexions et trajets multiples. Il y a là encore souvent nécessité de multiplier les balises pour adapter la surface couverte à la présence d'obstacles proches.

Enfin, la redondance (permet des choix) et la proximité de balises sont des facteurs de qualité de la détection et de la mesure en particulier de sa précision.

En général, comme illustré dans la figure 2.9, un système de multilatération se compose des éléments suivants :

- Station (unité à distance ou secondaire) : on doit avoir plus de trois stations, composées d'une antenne et d'une unité de traitement ; leurs rôles sont de traiter et de décoder tous les signaux reçus. Elles doivent rester toujours en écoutes des autres signaux et émettent les signaux vers l'unité de traitement. Dans certains cas, elles peuvent émettre des signaux d'interrogation.
- Unité de référence : son rôle est de produire un signal d'interrogation aux stations et d'assurer leurs synchronisations.
- Unité centrale de traitement : dans un système on a besoin d'une seule unité de traitement, son rôle est de combiner tous les messages des stations, détecter les défauts (par exemple : les multi-trajets), calculer la position de la cible et assurer sa poursuite et envoyer ces informations vers l'unité d'affichage.

- Unité de contrôle et d'entretien : elle permet la commande et le contrôle du système, ainsi que la maintenance. [12]

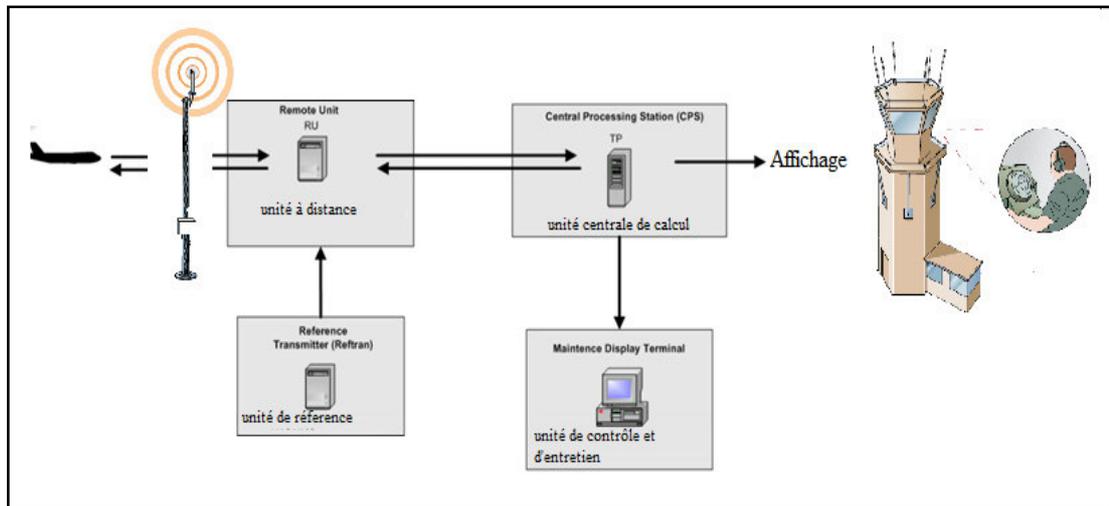


Figure 2.5 : Architecture du système multilatération.

L'un des composants les plus importants dans un système multilatération est le moyen de communication entre les stations.

2.3.3 Moyen de liaison

Le système de télécommunication utilisé dépend des besoins du système. Dans le cas de la multilatération, l'utilisation d'un moyen de liaison peut être justifiée par les caractéristiques suivantes :

- **La capacité** : c'est la caractéristique la plus importante pour la majorité des systèmes, par contre dans le cas de la multilatération, elle est parmi les moins importantes, car les messages échangés sont très petits et ne nécessitent pas une capacité grande. Donc, on doit calculer le maximum débit des messages pour connaître la capacité minimale du moyen de liaison.
- **Retard systématique** : c'est le temps total dû à la transmission du message de l'avion vers la station centrale. Ce paramètre contient le retard dû au composant du système, le retard dû à la liaison et le retard dans l'espace radio.

- **Fading** : c'est un problème qui se présente souvent pour les liaisons radio, par contre il n'existe pas dans les liaisons en fibres optiques. Si une liaison hertzienne est utilisée, on doit tenir en considération ce paramètre.
- **La distance** : il est important de connaître la distance maximale pour chaque moyen de liaison, parce que dans le cas de la WAM les distances sont très importantes.

Le but de l'étude des moyens de liaison est de connaître les limitations ou les avantages de ces moyens pour un système donné ; les principaux types des moyens de liaison sont :

- Fibre Optique ;
- Liaison Hertzienne ;
- Liaison Satellitaire.

2.3.3.1 Fibre Optique :

C'est le système de télécommunication le plus utilisé actuellement, car il est caractérisé par son débit élevé et moins d'erreurs. Le débit de donnée dépend du type de fibre et de laser utilisé, mais le débit est plus grand que la valeur exigée par le système MLAT. Le canal de communication dépend du mode de fibre utilisé ; on peut distinguer deux types principaux : fibre monomode (Single Mode Fibre SMF) et fibre multimode (Multi Mode Fibre MMF).

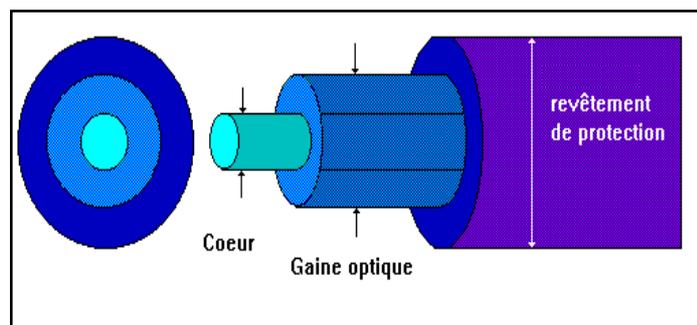


Figure 2.6 : Composition d'une fibre optique.

2.3.3.1.1 La fibre multimode : Il existe, comme illustré sur la figure 2.7, une fibre multimode à faible d'indice (débit <50Mb/s) et autre à gradient d'indice (débit <1Gb/s), les fibres multimodes ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85 microns). Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre se propage

longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le verre de cœur et celui de la gaine.

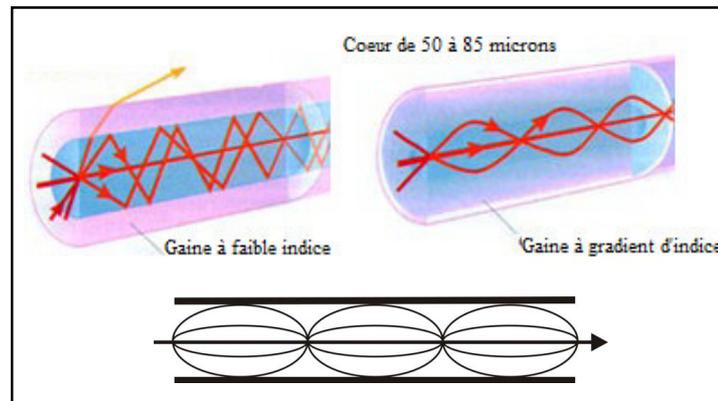


Figure 2.7 : Fibre Optique Multimode.

Les standards pour FOM de ISO/IEC 11802 définissent les types OM1 à OM4 et les valeurs d'atténuations maximales et la bande passante minimale qui sont spécifiés sur le tableau 2.2 [13].

Tableau 2.2 : Les standard FOM.

Catégorie	Maximum atténuation db/Km		La bande passante minimale modale (MHz × Km)			Distance Maximal à 100Mb/s (Km)			Atténuation pour la distance maximale (db)		
			LED		Laser	LED		Laser	LED		Laser
	850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm	850 nm
OM1	3.5	1.5	200	500	N/A	2	5	N/A	7	7.5	N/A
OM2	3.5	1.5	500	500	N/A	5	5	N/A	17.5	7.5	N/A
OM3	3.5	1.5	1500	500	2000	15	5	20	52.5	7.5	70
OM4	3.5	1	3500	500	4700	35	5	47	105	5	141

La distance maximale est calculée par la relation suivante:

$$L_{\max (km)} = \frac{B_{\text{modal}}(\text{MHz} \times \text{km})}{R_b(\text{Mbps})} \quad (2.1)$$

Avec : L_{\max} : longueur maximal de la fibre optique ;

B_{modal} : bande passante modale ;

R_b : Débit de transmission.

2.3.3.1.2 La fibre monomode : Généralement utilisée pour les grandes distances. Comme montre la figure 2.8, elle a un diamètre de cœur (10 microns), qui est faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée. L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion nodale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes-laser.

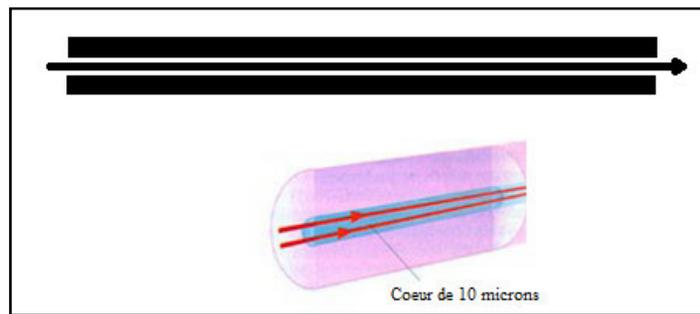


Figure 2.8 : Fibre Optique Monomode.

Les standards ISO/IEC 11801 définissent OS1 et ISO/IEC 24702 définissent OS2, les valeurs d'atténuations maximales sont spécifiées sur le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Les standards OS [13].

Longueur d'onde (nm)	Atténuation Maximale (db/km)	
	OS1	OS2
1310	1.0	0.4
1385	N/A	0.4
1550	1.0	0.4

En plus de ces valeurs d'atténuations, d'autres valeurs sont à considérer comme celles dues au connecteur et des splices qui sont utilisés pour la connexion des petites parties des fibres optiques afin de lier des longues distances. Les valeurs d'atténuation maximales recommandées par UIT (l'Union International de Télécommunication) sont définies sur le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Les valeurs d'atténuation pour les éléments des FO.

Coefficient d'atténuation	Valeur typique Max. (db)
Splice	0.5
Connecteur pour SMF	0.5
Connecteur pour MMF	1.0

La valeur totale d'atténuation est donnée par l'équation (2.2):

$$L_{p(ab)} = L_{d(ab/km)} \times d_{(km)} + N_c \times L_{c(ab)} + N_s \times L_{s(ab)} \quad (2.2)$$

Avec : L_p : Atténuation sur toute la longueur (d) de FO ;

L_d : Coefficient d'atténuation par rapport à la distance ;

L_c : Atténuation du connecteur ;

N_c : Nombre de connecteurs ;

L_s : Atténuation du splice ;

N_s : Nombre de splice.

Le temps de retard total dans une FO est donné par l'équation (2.3) :

$$t_{l(s)} = t_{t(s)} + \tau_{l(s)} + t_{\theta(s)} + t_{fix(s)} \quad (2.3)$$

Avec : t_l : Retard total de la liaison ;

t_t : Temps de transmission ;

τ_l : Retard de propagation ;

t_{θ} : Retard aléatoire ;

t_{fixe} : Retard fixe.

Le temps de transmission dépend du débit de transmission (R_b) et du volume de message (V_{msg}), il est donné par l'équation (2.4) :

$$t_{t(s)} = \frac{V_{msg(b)}}{R_b(bps)} \quad (2.4)$$

2.3.3.2 Liaison hertzienne

Ce moyen de liaison est utilisé largement sur de très longues distances. Par rapport aux fibres optiques, le coût est moins important, mais il peut augmenter en fonction du système choisi.

La première étape dans la construction d'une telle liaison est d'assurer l'existence de LoS entre les deux antennes, qui dépend de la hauteur de l'antenne et du profile d'élévation entre eux. En considérant le rayon effectif de la terre, la distance du radio horizon est donnée par l'équation suivante :

$$d_{(km)} = 3.569\sqrt{h_{t(m)}} + 3.569\sqrt{h_{e(m)}} \quad (2.5)$$

Avec : h_e : hauteur du transmetteur ;

h_r : hauteur du récepteur.

Dans notre étude, il y a deux différents cas : des distances courtes de l'ordre de 2 à 4 km et des longues distances de l'ordre de dizaine de km. Ceci est dû à la différence entre système de multilatération sol et approche.

La puissance à la réception est donnée par l'équation ci-dessous:

$$P_{r[dBm]} = P_{e[dBm]} + G_{e[dBi]} - G_{r[dBi]} - 20 \log \left(\frac{4\pi d_{[m]} f_{[Hz]}}{c_{[m/s]}} \right) \quad (2.6)$$

Avec : P_r : Puissance de réception ;

P_e : Puissance d'émission ;

G_e : Le gain d'émission ;

G_r : Le gain de récepteur ;

f : Fréquence d'émission ;

d : Distance entre émetteur et récepteur.

Dans un système LAM (multilatération local), on néglige la courbure de la terre, car $d \gg h_r, h_e$ [14] :

$$P_{r[dBm]} = P_{e[dBm]} + G_{e[dBi]} - G_{r[dBi]} + 20\log(h_{e[m]}) + 20\log(h_{r[m]}) + \\ -20\log(d_{[km]}) \quad (2.7)$$

Le temps de retard total dans ce type de liaison est le même que celui dans les fibres optiques, mais la vitesse de propagation est considérée égale à celle de la lumière.

Actuellement, il n'y a aucun problème dans l'utilisation d'une liaison hertzienne pour un système de multilatération. Concernant la distance entre stations dans un système WAM, dans ce cas on utilise des répéteurs pour régénérer le signal.

2.3.3.3 Liaison satellitaire

Il y a trois (03) types d'orbites pour les satellites : Orbite géostationnaire (GEO), Orbite moyenne (MEO) et Orbite basse (LEO).

Le problème majeur dans une telle liaison est le retard de transmission qu'on doit prendre en considération, spécialement dans un système de multilatération qui demande des valeurs précises de retard. Le retard dans ce type de liaison est donné par l'équation suivante :

$$t_{link[s]} = t_t[s] + \tau_{UL[s]} + \tau_{DL[s]} + t_{isl[s]} + t_{\theta[s]} + t_{fixe[s]} \quad (2.8)$$

Avec : τ_{UL} et τ_{DL} : Uplink/Downlink retard de propagation qui dépend de l'altitude de l'orbite du satellite ;

t_{isl} : retard de liaison inter-satellite.

Par exemple si on considère une liaison par un satellite GEO, le temps de la liaison montante et descendante est approximatif à 238 ms, valeur plus importante que pour d'autres types de liaison terrestre.

Dans un système de multilatération, le temps de retard maximal doit être calculé et comparé avec le retard maximal permis par le système, autrement, il est facile d'utiliser une liaison satellitaire pour des stations temporaires en cas d'une défaillance dans un système en opération.

2.3.4 La synchronisation

Les systèmes diffèrent par la manière de synchroniser les traitements des différents récepteurs. Si l'instant d'émission est indifférent, il y a nécessité de

synchroniser les stations. Cette synchronisation permet de fixer la durée des traitements avant datation des données, durée intervenant directement dans le calcul de la position. Elle permet aussi de dater sur la même base de temps, donc d'obtenir des données (dates) comparables. Elle est donc un point très essentiel, car elle assure une amélioration dans la précision de localisation et plus d'habileté de détecter les faux signaux résultants par le phénomène des multi-trajets. [12]

Les systèmes de synchronisation couramment employés sont :

- À base de temps commun : avec transmission, sans traitement des signaux depuis les stations vers une station centrale. Il y a alors nécessité de connaître précisément les temps de traitement et de transmission entre récepteurs. L'avantage de la solution est dans la concentration de la complexité du système qui se retrouve intégralement dans la station centrale. Par contre, L'inconvénient est dans la qualité de la mesure qui est alors fonction de la dispersion des stations « périphériques » et des liens télécommunication (FH ou fibre optique).
- À base de temps distribué : dans ce cas, les traitements datation et décodage sont faits dès réception par les stations sur une base de temps locale. La qualité et les performances des liens télécommunication n'interviennent pas, mais les bases locales doivent être synchronisées. Là encore plusieurs solutions sont possibles [9] :
 - Synchronisation par transpondeur : Un signal commun, émis par un transpondeur de référence permet de fixer les bases de temps. Les effets de propagation si les trajets sont longs peuvent influencer la qualité de la synchronisation. La contrainte est que le transpondeur de référence soit visible de toutes les balises.
 - Synchronisation par GNSS: Solution d'une synchronisation de chaque récepteur par signaux GNSS.

2.4 Le calcul de la TDOA

On considère un émetteur E dans une position inconnue :

$$E = (x, y, z)$$

Avec : (x, y, z) les coordonnées géographiques de l'émetteur.

La source est visible par N+1 récepteurs qui sont dans des positions connues :

$$P_0, P_1, \dots, P_m, \dots, P_N$$

L'indice (m) réfère à chacun des récepteurs où :

$$P_m = (x_m, y_m, z_m) \quad 0 \leq m \leq N$$

La distance (R), en termes de coordonnée, entre l'émetteur et l'un des récepteurs est :

$$R_m = |\vec{P}_m - \vec{E}| = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2} \quad (2.9)$$

Afin de simplifier les calculs, on considère que (P_0) est à l'origine, donc, sa distance avec l'émetteur est :

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.10)$$

Autrement la distance (R_m) est :

$$R_m = v \times T_m \quad (2.11)$$

Avec : (v) : vitesse du signal (vitesse de la lumière dans le vide) ;

(T_m) : temps de transition du signal vers (P_m) .

La TDOA mesure la différence de temps (τ_m) entre deux touchés du même signal aux deux récepteurs ; l'équation TDOA des récepteurs m et 0 est :

$$v\tau_m = vT_m - vT_0 \quad (2.12)$$

$$v\tau_m = R_m - R_0 \quad (2.13)$$

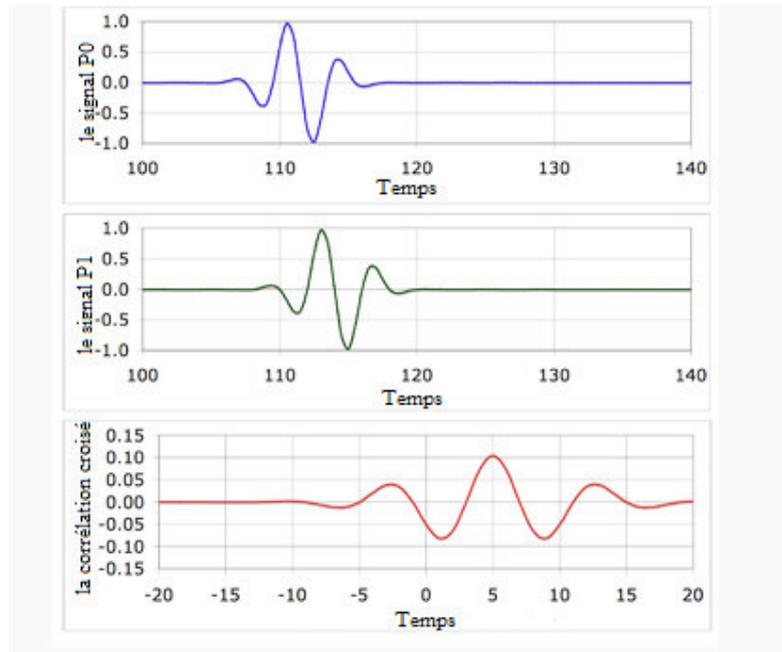


Figure 2.9 : Corrélation des signaux de deux récepteurs.

La figure (2.10) est une simulation d'un signal sous forme d'impulsion enregistrée par les récepteurs (P_0) et (P_1). L'espacement entre E , P_1 et P_0 signifie que l'impulsion arrive au P_1 en retard de 5 unités de temps par rapport à P_0 ; la courbe en couleur rouge est la fonction de corrélation croisée ($P_1 * P_0$) ; la valeur du temps correspond au pique représente la différence de temps d'arriver, qui est la valeur (τ) dans les équations.

Pour la solution en trois dimensions (3D), on a besoin de 4 récepteurs ($0 \leq m \leq 4$), ce qui conduit à résoudre un système de trois (03) équations à trois inconnues (x , y , z). Le système doit être résolu en temps réel pour trouver la position de l'émetteur (E).

Pour plus de précision, il est préférable d'avoir plusieurs récepteurs, mais en réalité cela demande un système très performant et rapide pour le calcul d'un système d'équations non linéaire (équations (2.9), (2.10) et (2.13)). On peut simplifier le calcul, si on rend les équations linéaires, mais il faut au moins 5 récepteurs, ce qui diminue le temps de calcul. L'équation (2.13) devient :

$$R_m^2 = (v\tau_m + R_0)^2 \quad (2.14)$$

$$R_m^2 = (v\tau_m)^2 + 2v\tau_m R_0 + R_0^2 \quad (2.15)$$

$$0 = (v\tau_m)^2 + 2v\tau_m R_0 + R_0^2 - R_m^2 \quad (2.16)$$

On divise par $v\tau_m$:

$$0 = (v\tau_m) + 2R_0 + \frac{R_0^2 - R_m^2}{v\tau_m} \quad (2.17)$$

Pour $m=1$ on trouve :

$$0 = (v\tau_1) + 2R_0 + \frac{R_0^2 - R_1^2}{v\tau_1} \quad (2.18)$$

Par une soustraction des deux équations (2.17) et (2.18) on obtient :

$$0 = v\tau_m - v\tau_1 + \frac{R_0^2 - R_m^2}{v\tau_m} - \frac{R_0^2 - R_1^2}{v\tau_1} \quad (2.19)$$

L'équation (2.9) devient :

$$R_m^2 = x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 - x_2x_m - y_2y_m - z_2z_m + x^2 + y^2 + z^2 \quad (2.20)$$

$$R_m^2 = x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 - x_2x_m - y_2y_m - z_2z_m + R_0^2 \quad (2.21)$$

$$R_0^2 - R_m^2 = -x_m^2 - y_m^2 - z_m^2 + x_2x_m + y_2y_m + z_2z_m \quad (2.22)$$

En combinant les équations (2.19) et (2.22) on obtient :

$$0 = xA_m + yB_m + zC_m + D_m \quad (2.23)$$

Qui est une équation linéaire où :

$$A_m = \frac{2x_m}{v\tau_m} - \frac{2x_1}{v\tau_1}$$

$$B_m = \frac{2y_m}{v\tau_m} - \frac{2y_2}{v\tau_2}$$

$$C_m = \frac{2z_m}{v\tau_m} - \frac{2z_2}{v\tau_2}$$

$$D_m = v\tau_m - v\tau_2 - \frac{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}{v\tau_m} + \frac{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}{v\tau_2}$$

Le système d'équation final obtenu est :

$$\begin{bmatrix} D_3 \\ \vdots \\ D_m \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 & C_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_m & B_m & C_m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_N & B_m & C_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.5 Les erreurs de la multilatération

Les erreurs d'un système de multilatération peuvent être classifiées dans deux catégories principales : erreurs **naturelles** dues aux conditions externes comme le profil du terrain et l'état de la troposphère et les erreurs dues au **système**, software (algorithme de traitement des données) ou hardware (position d'antenne, erreur de transmission,...).

Du point de vue des mesures de la TDOA et du traitement des données de la MLAT, il est approprié de catégoriser les erreurs de façon statique. On peut distinguer trois grandes catégories des erreurs [15]:

- Erreurs systématiques σ_1 ;
- Erreurs corrélés σ_2 ;
- Erreurs aléatoires σ_3 .

Le mécanisme important est la vitesse des variations de temps des composants d'erreur correspondant.

2.5.1 Erreurs systématiques

La variation de ces erreurs est lente dans le temps, et elles se présentent dans toutes les mesures de la TDOA. Typiquement, ces erreurs sont de l'origine de la variation du retard additionnel, les changements de la troposphère locale et régionale et le positionnement des stations, qui sont projetées par différents mécanismes dans chaque mesure TDOA.

Le retard additionnel est déterminé par la dépendance à la température et le vieillissement des composants électroniques ; la détermination des erreurs dues aux positionnements des stations est très importante, car les mesures de la TDOA dépendent de ces positions. Dans des systèmes de MLAT ce genre d'erreurs peut être réduit par des processus de calibrage.

2.5.2 Erreurs corrélées

La variation de ce type d'erreur dans le temps est aussi lente, mais elle est reliée seulement à la position où se trouve le mobile dans la région couverte par la MLAT.

Cette erreur provient des conditions de la troposphère le long de LoS de la Station-Mobile. Dans les systèmes MLAT la configuration de la géométrie du système est la seule solution pour éliminer cette erreur. Un autre type de ces erreurs est causé par le phénomène de multi trajet.

2.5.3 Erreurs aléatoires

Ce type d'erreur a un caractère de bruit blanc et il est produit par le bruit additif interne et externe au signal reçu (SNR) et par l'effet de quantification due à la numérisation des mesures de la TDOA.

L'erreur aléatoire est composée de trois éléments principaux :

- La gigue de l'impulsion (ou jitter) causée par le bruit est le phénomène de fluctuation d'un signal. Cette fluctuation peut être un glissement de phase ou une dispersion temporelle. Dans le cas optimal l'écart type est donné par :

$$\sigma_{SNR} = tr / \sqrt{(2 * SNR)} \quad (2.25)$$

Avec : tr : longueur de l'impulsion ;

SNR : rapport signal sur bruit.

Pour l'impulsion SSR typiquement tr=70 ns et SNR=18 dB donc :

$$\sigma_{SNR} = 70 / \sqrt{2 \times 10^{1.8}} = 6.2 \text{ ns}$$

- L'erreur de quantification de l'Unité de Mesure, où UM est utilisée pour quantifier la période de temps dans l'unité centrale.

$$\sigma_{UM} = \Delta t / \sqrt{12} \quad (2.26)$$

Avec : Δt : temps de discrétisation de la UM, $\Delta t = 3.1 \text{ ns}$ à 12.5 ns .

Donc : $\sigma_{UM} = 0.9 \text{ ns}$ à 3.6 ns .

- Les erreurs aléatoires dépendent de la méthode de synchronisation de temps utilisée soit une source de temps commune, où l'erreur est donnée par $\sigma_r = 1 \text{ ns}$ à 2 ns ; soit une source de temps distribuée (par GNSS ou transpondeur de référence), où la valeur de l'erreur est estimée de $\sigma_s = 1 \text{ ns}$ à 6 ns .

L'écart type total de la mesure TDOA est donné comme suit :

- En utilisant une source de temps commune :

$$\sigma_{TDOA} = \sqrt{2 \times \sigma_{2SNR} + 2 \times \sigma_{2UM} + \sigma_{2r}} \quad (2.27)$$

- En utilisant une source de temps distribuée:

$$\sigma_{TDOA} = \sqrt{2 \times \sigma_{2SNR} + 2 \times \sigma_{2UM} + \sigma_{2s}} \quad (2.28)$$

Les composants σ_{SNR} et σ_{UM} sont calculés deux fois, car on a besoin de deux racines pour créer une hyperbole.

Quand, on utilise une source commune de temps l'erreur aléatoire totale typique pour une seule impulsion de réponse SSR, est :

$$\sigma_{TDOA} = 10.4 \text{ ns et } 9.1 \text{ ns pour } \Delta t = 12.5 \text{ ns et } 3.1 \text{ ns.}$$

Pour l'autre technique de synchronisation ces valeurs sont presque les même.

2.6 Les bénéfices de la multilatération

2.6.1 Le coût

Dans son rôle de surveillance, la multilatération permet de se passer des coûteuses antennes radar rotatives, en remplaçant le SSR par de petites stations peu coûteuses situées en position stratégique pour couvrir un volume d'espace aérien identique ou plus grand.

La multilatération est une solution nettement moins coûteuse en surveillance que le radar traditionnel. L'analyse ci-dessous (Figure 2.6) montre une différence en coût total de presque 5 millions d'euros pour un cycle de vie de 15 ans [10].

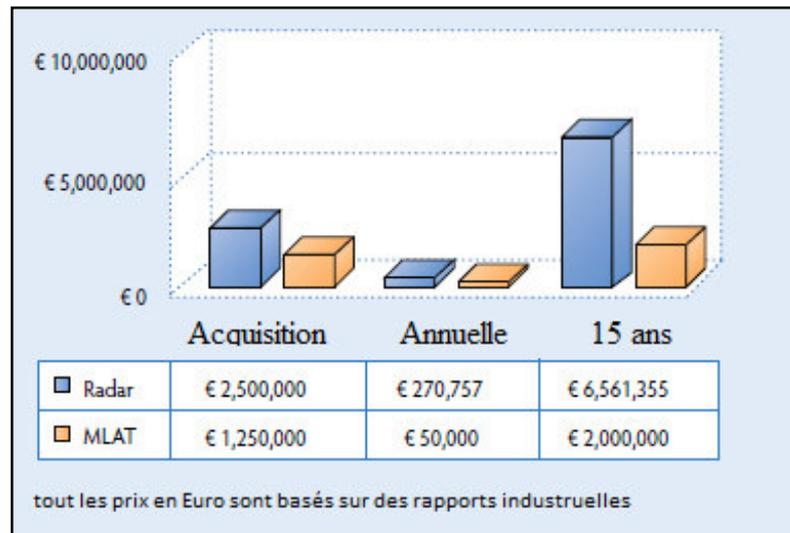


Figure 2.10 : Comparaison de coût total entre radar et multilatération [10].

2.6.2 Les performances

En accord avec la philosophie qui a été développée par le groupe de travail de l'OACI et en complément des activités de l'Eurocontrol et Eurocae. Les performances du système de multilatération sont considérées par les agences de certification comme équivalentes à celles du radar secondaire standardisé par l'OACI. Autrement, en termes de précision la multilatération montre que ses performances opérationnelles sont plus élevées que celles du radar.

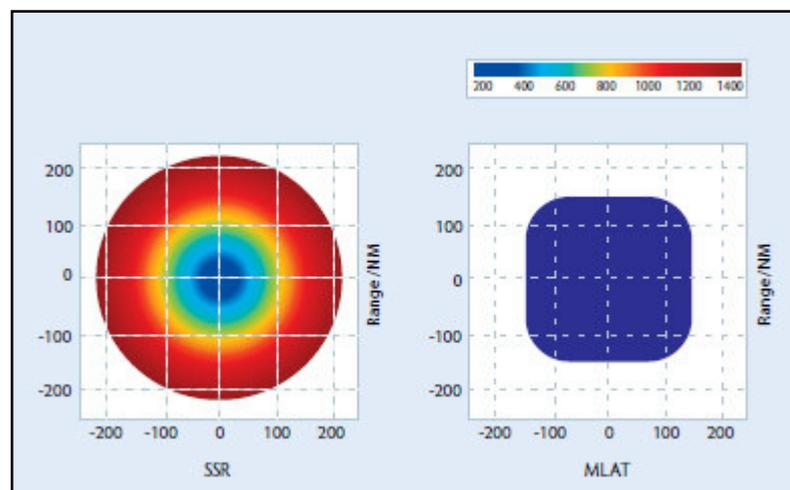


Figure 2.11 : Précision de couverture radar et multilatération [10].

2.6.3 La disponibilité opérationnelle

Par rapport au radar, il est remarquable que la maintenance du système de multilatération soit facile et moins coûteuse :

- La multilatération n'a pas de parties mobiles ;
- Chaque station est petite et facile à remplacer.

Son fonctionnement en réseau la rend disponible même si une station est en panne. En effet la multilatération travaille en redondance à cause de l'architecture de son réseau ; donc si une des stations est hors service, la couverture ne se dégrade pas et les autres stations vont produire la même couverture.

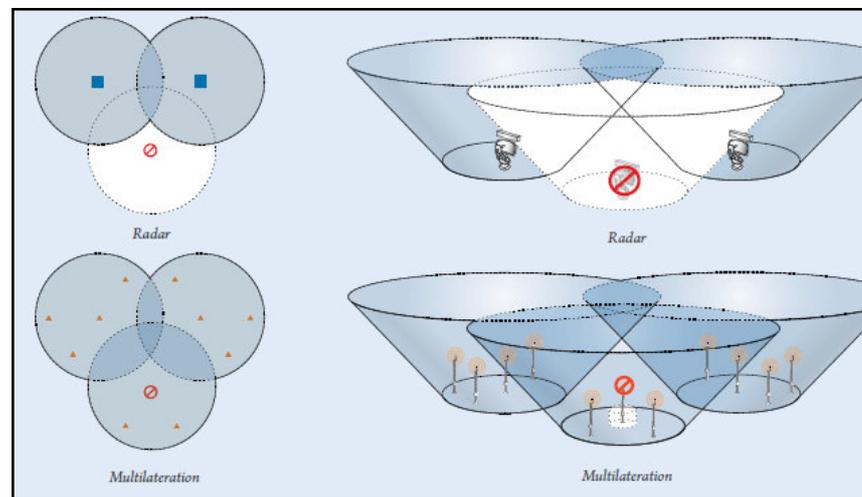


Figure 2.12 : La disponibilité en redondance [10].

2.7 Comparaison des principes du radar secondaire et multilatération

Les systèmes de multilatération ont une couverture « structurellement » isotrope obtenue par la simple dispersion des capteurs. Mais, si la couverture est isotrope, les traitements à la réception devront faire face à une charge importante de signaux (en tout cas beaucoup plus importante qu'en SSR azimut-distance avec utilisation d'antenne directive).

L'efficacité de ces systèmes de multilatération s'explique par les deux caractéristiques [9] :

- Localisation par mesures de différences de distances donc par mesures de différences de temps. Il n'est donc pas nécessaire de disposer d'antennes

directives, tournantes comme en radar. On passe d'un principe matériel mécanique (antenne directive, entraînement) à un principe de traitement de signal. De plus, s'agissant d'une différence, il n'est pas nécessaire d'imposer une référence d'émission cible.

- Mesures sur tout signal.

Il n'existe ainsi pas de fonction nouvelle de transpondeur à prévoir : pas d'équipement de bord spécifique avec obligation d'emport, pas de coordination de déploiements sol-bord. Pas non plus d'intervention lourde sur le canal, du type appel général. Système opportuniste, peu intrusif, adapté aux situations actuelles de congestion 1030-1090 MHz.

Tableau 2.5 : Comparaison entre SSR et multilatération [9].

	Avantages	Inconvénients
Radar secondaire	<p>Système autonome</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Équipements lourds en particulier l'antenne et son entraînement - Charge du canal 1030-1090 par taux d'interrogation élevé - Renouvellement des mesures lié à l'exploration de l'espace donc à la rotation de l'antenne
Multilatération	<ul style="list-style-type: none"> - Indépendant 3D - Léger ; peu intrusif (voire passif) - Pas de nouveau matériel à bord - Peut être prévu facilement redondant pour une meilleure disponibilité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersé (liaisons entre balises à prévoir, visibilité radioélectrique de l'ensemble) - Exploitation A/C dans une couverture d'interrogation SSR existante ou à créer.

2.8 L'adoption mondiale de la multilatération

La multilatération assure des performances appréciables, ce qui a permis à cette technologie d'être certifiée par plusieurs organisations, par exemple [10]:

L'OACI : La multilatération est certifiée par cette organisation après son adaptation par l'ASP (Aeronautical Surveillance Panel) et le SASP (Separation and Airspace Safety Panel) afin de répondre aux standards SARPS (Standards And Recommended Practices).

Eurocontrol : Cette organisation a établi un groupe de travail pour mettre à niveau la multilatération dans l'espace aérien européen, tout en assurant les normes de l'OACI. Ce groupe de travail rassemble tous les spécialistes qui sont intéressés à cette technique. Ce dernier est devenu une plate-forme pour l'échange de l'information.

Eurocae : Cette organisation a créé le groupe de travail WG70 (Working Group 70) spécialement pour les applications de la multilatération en route (WAM). Ce groupe est chargé de développer des spécifications techniques pour les systèmes WAM. Le WG70 se compose de spécialistes de tous les importants constructeurs de la multilatération WAM et les fournisseurs de service de navigation aérienne.

De nombreux systèmes de multilatération ont été développés et plusieurs autres sont prévus. La figure 2.13 contient les pays qui ont commencé à déployer des systèmes de multilatération jusqu'à 2011.

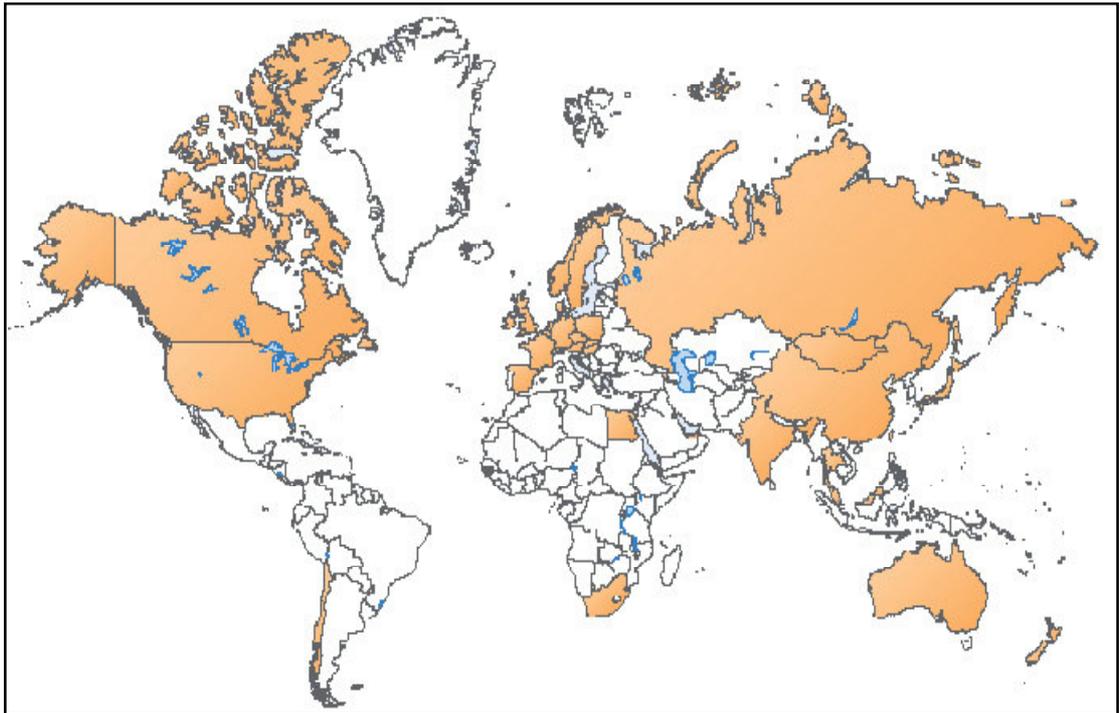


Figure 2.13 : Mise en œuvre de la multilatération dans le monde entier [10].

Chaque pays a déployé un système de multilatération pour des raisons bien déterminées, par exemple :

USA : La FAA (Federal Aviation Administration) est parmi les premiers qui ont adopté la multilatération, dont elle a lancé son programme ASDE-X en 2000. L'application établie est la surveillance à la surface de l'aéroport. Ce système est installé dans les 35 aéroports les plus importants dans le pays [10].

Europe : Un déploiement emblématique des applications de MLAT est la couverture de l'approche d'Innsbruck (Autriche). Le doublement de la couverture de surveillance actuelle par un radar est vite apparu plus coûteux et moins performant qu'un système MLAT. Pour une répartition de 9 balises, les performances de précision observées sont de 70 m en surveillance air et 7 m au sol. Ces caractéristiques ont permis un doublement de la capacité maximale en approche [16].

Canada : Un grand nombre de vol des avions privés et des hélicoptères évolue au-dessous de l'approche de l'aéroport International de Vancouver. La surveillance radar n'été pas praticable à cause de la topographie de la zone et les

bâtiments de la ville. Nav Canada a décidé d'implémenter un système de multilatération avec une précision de 25 ft dans les zones à forte densité de trafic.

Australie : L'aéroport d'Innsbruck, entouré des montagnes d'une hauteur supérieur à 8000 ft, pose un problème majeur au trafic aérien en approche. L'installation de plusieurs radar sur les sommets et les cotés des montagnes n'est pas une solution économique. La solution d'Austro Control est un système de multilatération, dont ses stations peuvent être localisées dans des endroits aveugles et elles assurent une couverture totale avec la possibilité de redondance [10].

Afrique : Un équipement de multilatération couvrant l'aéroport et la TMA de Cap-Town (Afrique du sud) est en phase de validation. Sept balises assurent une couverture sol (SMGCS) et trois balises supplémentaires déportées permettent une couverture de l'approche jusqu'à environ 110 NM [16].

2.9 Conclusion

Aujourd'hui, la multilatération est principalement utilisée pour la surveillance des mouvements au sol et des approches.

La problématique de l'adaptation de la multilatération est tout d'abord liée :

- Au choix de l'emplacement des stations, car les signaux doivent être correctement reçus par au moins quatre de celles-ci.
- Au niveau de la performance désirée, c'est-à-dire quelle précision veut-on obtenir sur l'aire de manœuvre (pistes et taxiways), sur l'aire de trafic et dans les zones d'approche ? Sachant que la précision d'un système de multilatération dépend de la géométrie du système, et au nombre de balises ainsi que de la précision de la mesure du temps d'arrivée des signaux.

Dans le chapitre suivant nous développons un outil (un simulateur) pour répondre à ces problèmes.

CHAPITRE 3

FAISABILITÉ DE LA MULTILATÉRATION EN ALGÉRIE ET L'ÉLABORATION D'UN SIMULATEUR DE LA MULTILATÉRATION

3.1 Introduction

Les raisons pour les quelles nous avons choisi la multilatération en Algérie sont diverses. En effet, la multilatération est basée sur des techniques de mesure de position précises (TDOA), aussi que son originalité réside dans l'accès aux fonctionnalités des radars secondaires déjà existants pour la surveillance des espaces jusqu'ici exclus (surveillance sol) ou de couverture difficile.

Son efficacité repose sur l'intégration immédiate à l'environnement de la surveillance actuel : pas de nouvel équipement de bord, interventions (adaptations) sur l'infrastructure actuelle, les signaux et les fréquences existants sont exploités. Elle fournit donc une sécurité accrue aux coûts d'exploitation réduits.

Basant sur le fait que dans le futur proche, c'est sans doute que la multilatération acquerra plus d'impulsion et de support dans la communauté aéronautique, la multilatération apparait comme la technologie de surveillance la plus adaptée à reprendre aux besoins les plus urgents en Algérie.

3.2 L'implémentation de la multilatération en Algérie

Nous avons analysé les infrastructures CNS/ATM qui soutiennent actuellement la FIR d'Alger, les exigences futures des usagers et les changements prévus d'apporter au système CNS/ATM dans le monde. Nous avons conclu que les infrastructures actuelles sont satisfaisantes, mais ont besoin d'améliorations pour répondre aux besoins de demain. En particulier pour :

- La surveillance de surface au niveau de l'aéroport de Hassi Messaoud, où il n'existe aucun système de surveillance sol ni de visualisation pour la tour (les besoins de surveillance sol sont traités en détail dans la section 3.3) ;

- La gestion des mouvements au sol sur l'aéroport d'Alger cause certains problèmes, sachant qu'un projet d'extension des parkings avions est réalisé et qu'il existe plusieurs zones aveugles pour le contrôleur, notamment lors d'évolution des avions dans la zone de fret, cette zone est présentée dans la figure qui suit (Figure 3.1) ;



Figure 3.1: Aéroport d'Alger Houari Boumediene [Google Earth 2014].

- La maîtrise de la fonction du contrôle. Étant donné le volume et la complexité du trafic civil et militaire dans les zones d'Oran et de Hassi Messaoud, Il est proposé que les opérations de contrôle d'approche de Hassi Messaoud soient élargies au contrôle radar par la multilatération en raison du trafic militaire significatif à Ouargla et aux alentours et que celles de contrôle d'approche d'Oran soient renforcées pour compléter le radar secondaire existant ;
- La complexité et la particularité de la région de contrôle de Constantine à cause de relief dangereux ; sa proximité de la zone interdite (Oum El Bouaghi) et l'existence d'une zone réglementée à l'intérieur de l'aire terminale (CAT) de Constantine.

L'amélioration de l'exploitation de ces aérodromes s'avère nécessaire, pour ce faire, un nouveau système de surveillance de la surface et/ou d'approche est recommandé, car il renforce la sécurité ainsi que la capacité de l'espace aérien.

Elle est également envisagée à ces endroits où la couverture radar est inexistante ou déficiente en raison de la topographie.

3.3 L'adaptation de la multilatération à l'aéroport Hassi Messaoud

Une première étape d'implémentation et surtout d'essais dans la zone pétrolière de Hassi Messaoud nous semble être la plus appropriée compte tenu du besoin opérationnel et du contexte : zone délimitée, type de trafic et type d'aéronefs identifiés.

La présence de transpondeur à bord de chaque avion de la flotte des compagnies du travail aérien facilite la tâche de l'installation de la multilatération à Hassi Messaoud.

3.3.1 Étude préliminaire pour la multilatération sol

Pour un aéroport qui n'a aucun système de surveillance comme c'est le cas de Hassi Messaoud. Le contrôleur fournit les informations de guidage au pilote grâce à une surveillance visuelle et le pilote est chargé d'assurer l'anticollision. Ce principe atteint ses limites dès que la visibilité se dégrade.

La surveillance sol est une autre problématique que celle « en route » ou « en approche ». En effet savoir où se trouve l'appareil, le guider, déterminer où il va, éviter les collisions au sol du moins être informé de la position de tous les autres véhicules susceptibles d'évoluer sur les différentes voies de circulation sont, pour le contrôleur sol, des exigences essentielles de sécurité.

L'introduction d'un premier moyen comme la multilatération sol va permettre de lever les restrictions de la réglementation et ensuite assure plus d'efficacité comme : la réduction du temps de roulage, la limitation du temps d'attente, l'amélioration de la fluidité du trafic. Il est conseillé de mettre en place un système très évolué avec toutes les fonctions de l'ASMGCS (surveillance, contrôle et guidage) basé sur la multilatération mode S.

3.3.1.1 Présentation de l'aérodrome de Hassi Messaoud

L'aérodrome de Hassi Messaoud se situe à 5 Nm au Sud Est de la ville, c'est un aérodrome ouvert à la circulation aérienne publique à proximité on trouve la zone industrielle d'AIN EL HAMRA.

L'aérodrome est aménagé et équipé de manière à satisfaire aux activités correspondant à sa catégorie. Lié à son site géographique et à sa nature d'exploitation, il connaît un trafic dense et comprend plusieurs infrastructures (voir figure 3.2) :

- Une piste d'atterrissage (RWY 18/36) ;
- Six voies de circulation (TWY : AE A, B, C, D, E) ;
- Une aire de trafic qui comprend les postes de stationnement ;
- Aire d'atterrissage d'hélicoptères.

L'aéroport est doté d'un système simple de guidage et de contrôle des mouvements à la surface (SMGCS) constitué des lignes de guidage des voies de circulation, de balisage et de marquage de piste et des voies de circulation.

La tour assure les services de circulation aérienne dans les limites de la zone de contrôle d'aérodrome CTR Hassi Messaoud dans un cercle de 10 NM jusqu'à une limite verticale de 450 m [3].

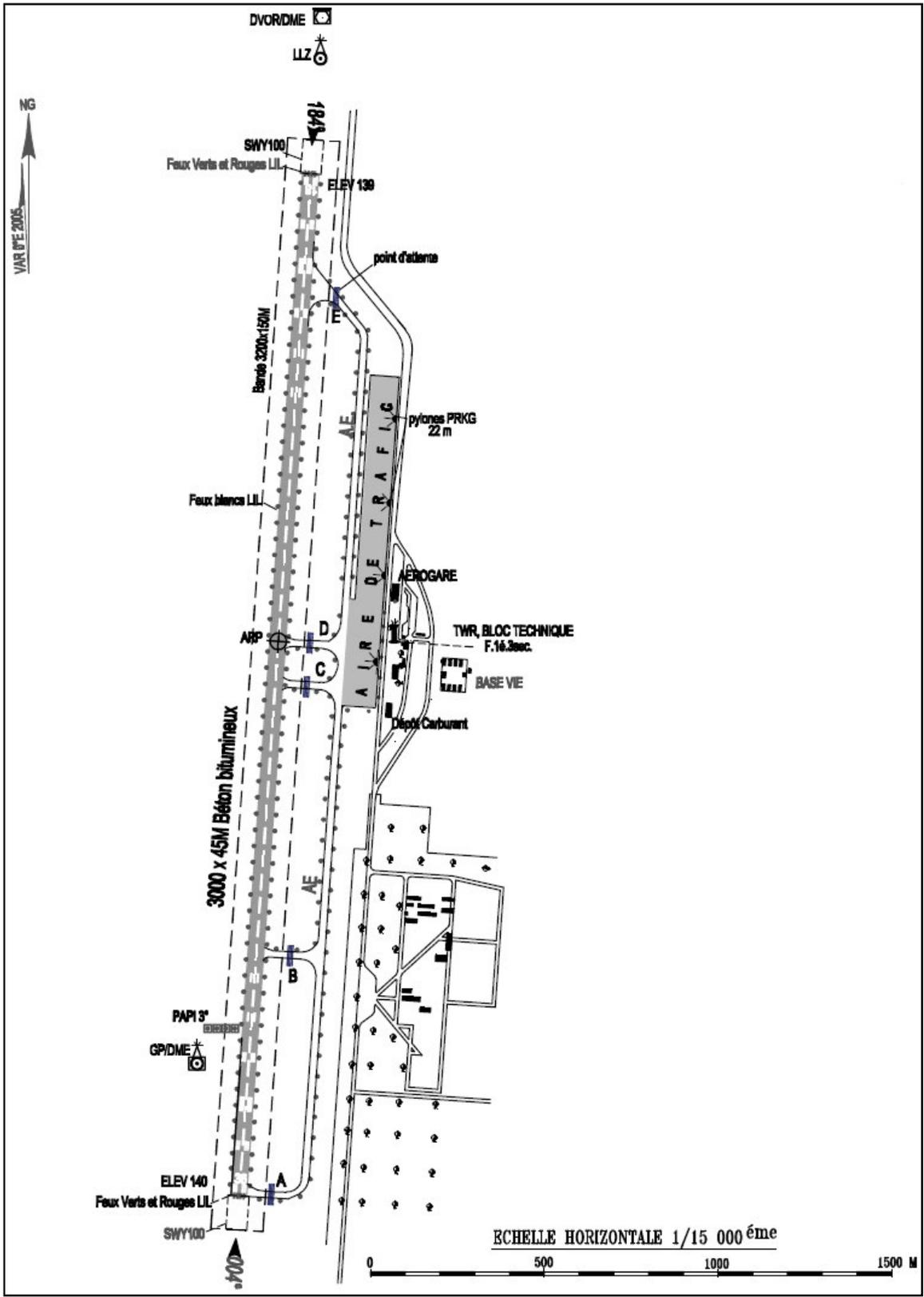


Figure 3.2 : Carte aéroport de Hassi Messaoud/Oued Irara-Krim Belkacem [3].

3.3.1.2 Les besoins de la surveillance sol

Un intérêt particulier est réservé aux zones d'exploitation pétrolière. C'est le cas de l'aéroport Hassi Messaoud où les contrôleurs nous ont exprimés leurs besoins en matière de surveillance sol. Voir ci-joint :

- La position de cet aéroport au sud de notre pays (Sahara) implique des phénomènes météorologiques dominants (chasse sable, brume seiche...), réduisant la visibilité et par conséquent, augmentent la charge de travail du contrôleur tour qui doit gérer la piste, la circulation des avions et les véhicules au sol ;
- La non homologation du parking aviation légère ainsi que la présence des hangars de maintenance de la compagnie de STAR AVIATION au niveau du parking (voir la figure 3.3) rend le contrôle de ses avions au sol un peu difficile suite aux déplacements des véhicules de tractage, d'avitaillement ainsi que des véhicules transportant les personnels navigants et les passagers ;



Figure 3.3 : Hangar de maintenance STAR AVIATION à l'aéroport de Hassi Messaoud.

- La position de l'hangar de maintenance de STAR AVIATION empêche le contrôleur tour de surveiller des avions circulant sur la partie nord du parking surtout dans les conditions de visibilité dégradées précitées.

Dans ce qui suit, nous associerons à ces besoins la solution susceptible d'y répondre :

- Dans le cadre de cette application, une multilatération sol active peut permettre à l'aéroport de Hassi Messaoud de surveiller à partir du sol à l'altitude où la multilatération terminale, proposée par la suite, prend relève (plafond CTR) ;
- Pour la gestion des mouvements au sol, il sera nécessaire de mettre en place un système de gestion type A-SMGCS enrichie des informations fournies par l'application multilatération de surface.

Le besoin clairement identifié est l'amélioration de la sécurité et principalement la protection absolue de la zone de piste :

- Ce système repose sur une bonne connaissance de la position et de l'identification de tous les mobiles avec présentation d'étiquettes renseignées sur l'écran du contrôleur ;
- Dès la mise en place des premiers éléments de surveillance, on envisagera une amélioration de la sécurité. Le contrôleur aura une meilleure maîtrise de la situation et peut aider le pilote dans les circonstances difficiles;
- La fonction contrôle, avec la mise en place d'alertes anti-intrusions représente aussi un progrès important en matière de sécurité. Déjà, à l'heure actuelle il est reconnu que des accidents ont été évités grâce à cette fonction.

3.3.1.3 Architecture multilatération sol proposée

La Multilatération utilise un certain nombre de stations au sol, qui sont placées dans des endroits stratégiques autour de l'aéroport, pour cela on propose (Voir Figure 3.16):

- Une station centrale active (N°1) située à proximité du bloc technique de la tour de contrôle ;
- Trois stations secondaires passives (N° 2 ; 3 et 4) réparties autour de l'aire de mouvement, selon la densité de trafic et les performances demandées citées au paravent.

Ces unités détectent les réponses typiquement aux signaux d'interrogation transmis par la station centrale locale proposée.

Les stations secondaires sont reliées à la centrale par un réseau de communication proposé d'être en fibre optique, suite à la comparaison entre les moyens de liaison effectuée dans le chapitre précédant (section 2.3.3).

Un processus complet de choix des sites sera nécessaire pour situer le lieu d'implantation de ces stations. Une étude du site sera primordiale pour évaluer sa convenance.

Puisque les différents aéronefs seront aux distances différentes de chacune des stations au sol, leurs réponses seront reçues par chaque station aux heures infiniment différentes. Utilisant des techniques de traitement par ordinateur avancées, ces distinctes différences de temps permettent à la position d'un aéronef d'être calculée avec précision.

3.3.2 Étude préliminaire pour la multilatération terminale

3.3.2.1 Présentation de l'approche de Hassi Messaoud

L'approche assure les services de circulation aérienne dans les limites de la zone de contrôle d'approche CTA de Hassi Messaoud. Elle est chargée de prévenir les abordages entre aéronefs, ordonner la circulation aérienne sur les STAR (arrivées standards) et les SID (départs standards), à partir de niveau de vol FL 105 (10500 ft) jusqu'à une limite verticale de 450 m [3].

Cette approche gère les manœuvres des aéronefs autour de l'aéroport de Hassi Messaoud dans un cercle de 30 NM à l'exception d'une portion faisant partie de la zone interdite de Ouargla.

Les figures ci-dessous représentent la délimitation de la zone d'approche de Hassi Messaoud ainsi que les trajectoires normalisées d'arrivée (Figures 3.4) et de départ (Figures 3.5).

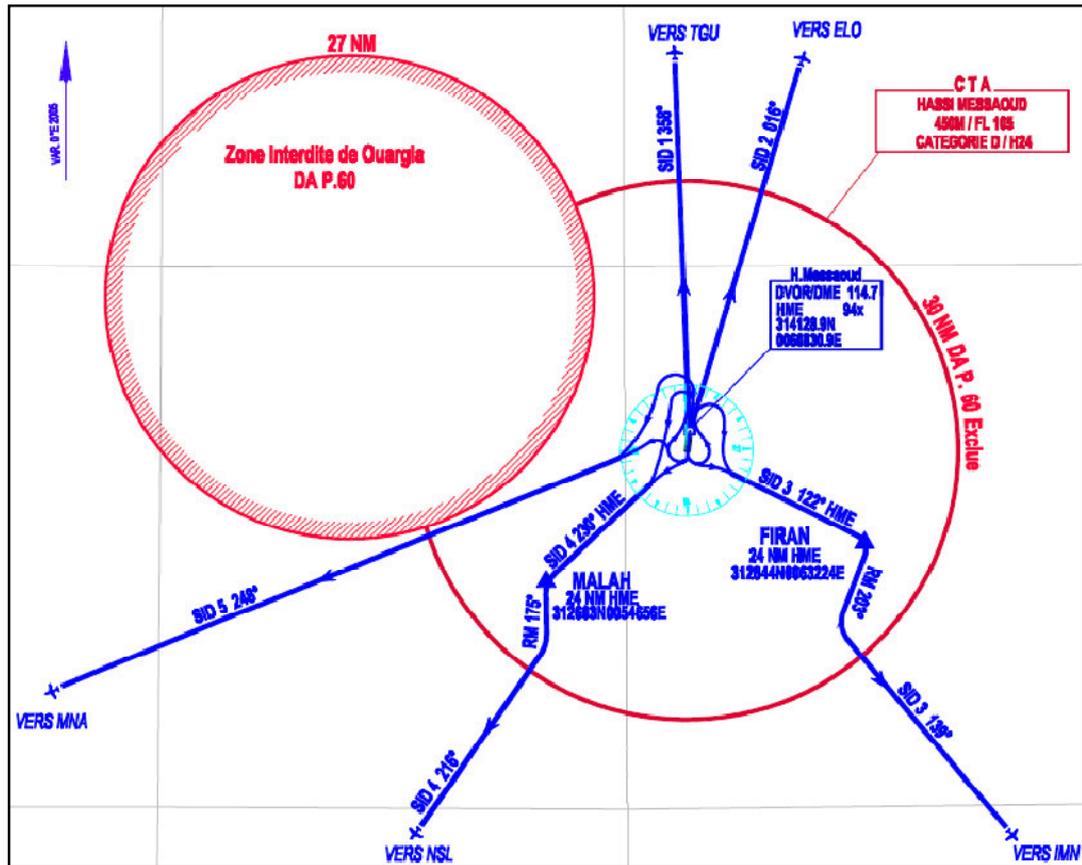


Figure 3.5 : Carte des départs normalisés aux instruments (OACI) de l'aéroport de Hassi Messaoud [3].

3.3.2.2 Les besoins de la surveillance d'approche

Les besoins en matière de surveillance terminale sont présentés ci-après :

- Le trafic dense dans la zone pétrolière située dans le secteur "Sud/Est", évolue en majorité de et vers l'aérodrome de Hassi Messaoud qui, comme nous l'avons vu, est classé deuxième aérodrome Algérien en nombre de mouvements (voir graphique 1.10) ;
- Les différences de performances des avions de la flotte des compagnies de travail aérien basée sur l'aérodrome (TASSILY.A.L, AIR EXPRESS, STAR AVIATION...) rendent le contrôle des aéronefs en approche très difficile ;
- La complexité de cette zone est d'autant plus grande du fait que deux types de vol s'y côtoient, les VFR et IFR évoluant principalement en dessous du niveau 190. Nous noterons aussi l'existence de liaisons internationales

directes "charters" entre l'aéroport de Hassi Messaoud, l'Europe et les Etats-Unis ;

- Le chevauchement de la zone d'approche de l'aérodrome avec la zone interdite de Ouargla rend la coordination entre le trafic civil et militaire difficile ;
- La position géographique de certaines plates formes qui se situent au-dessous du circuit d'attente ce qui pénalise les avions en attente sachant que ces avions décollant de ces plates formes prennent du niveau bas.

Dans ce qui suit, nous associerons à ces besoins la solution susceptible d'y répondre :

- La multilatération est considérée comme un outil de surveillance sur des aéroports dont les niveaux d'activité sont accrus, où la surveillance augmentera la capacité de l'espace aérien et réduira les retards ;
- L'ATC continue d'exiger une surveillance indépendante dans le cas de certaines combinaisons d'espace aérien et de circulation aérienne (comme la zone interdite de Ourgla où opère la CAM). Pour ce type de surveillance, il faut donc se servir des fonctions de la multilatération pour le contrôle d'approche ;
- L'Autorité de l'aviation civile donne son agrément formel pour une séparation des aéronefs en région terminale ramenée à 03 NM, en utilisant la multilatération, contre 05 NM précédemment.
- La couverture du système de multilatération à basse altitude permet son utilisation pour une altitude minimale de 1000 ft et une portée de 30 NM dans la région terminale, bien au-dessous de la couverture de surveillance des radars régionaux.

3.3.2.3 Architecture multilatération proposée

Un certain nombre de petits récepteurs sont disposés de façon stratégique autour de l'aéroport pour produire des affichages clairs et non obstrués de tous les aéronefs dans leur ligne de vision, du début de leur approche finale à leur atterrissage ; à savoir (Voir Figure 3.22) :

- Une station centrale située sur la tour de contrôle ;

- Quatre stations secondaires, à l'intérieur de la zone d'approche, espacées de 20 NM de la centrale, sauf la station N°2.

3.3.3 Autres considérations du multilatération

Afin d'assurer une configuration complète du système de multilatération proposé, Il faut tenir compte des éléments suivants :

- Moyens de transmission : L'implantation de ce système impose des moyens de communication reliant toutes les balises installées à la station centrale. Toutes les solutions sont possibles à ce niveau soit d'utiliser un réseau existant, soit de poser des câbles ou des fibres optiques.
- Moyens d'identification : Le système de multilatération mode S peut déclencher des interrogations sélectives comme il peut aussi utiliser des messages existants comme ceux du type ADS-B ainsi que les réponses aux radars de surveillance mode S. Cela permet d'obtenir l'identifiant de l'avion sans interrogation spécifique, mais le résultat obtenu requiert les mêmes précautions que celles associées à une interrogation sélective.
- Recommandations à bord : L'avantage de la multilatération à Hassi Messaoud est qu'elle n'exige aucun équipement additionnel en avionique des compagnies desservant la plate forme (surtout les compagnies Algérienne Air Algérie et Tassili Airlines). Elle utilise des réponses des émetteurs-récepteurs du mode A/C/S et d'ADS-B aussi bien que les émetteurs-récepteurs militaires d'IFF (avions survolant la zone militaire de Ouargla).
- Equipements additionnels : Outre l'installation à bord des aéronefs, les unités de poursuite peuvent être montées sur tous les véhicules qui utilisent les zones opérationnelles. Petites, abordables et rapidement installées, elles sont bien visibles sur l'affichage du contrôleur, avec leur étiquette unique d'identification du véhicule permettant de les différencier rapidement des aéronefs qui circulent à la surface, ce qui permet l'envoi des messages de communication appropriés.

3.4 Simulation du système de multilatération de Hassi Messaoud

Dans cette partie, nous décrivons la démarche suivie pour la réalisation de notre simulateur de multilatération, en utilisant le logiciel Matlab 2009b. Les buts de ce simulateur sont :

- La configuration du système proposé et la simulation de la couverture fournie par ces stations ;
- Le test de l'emplacement des antennes du système proposé pour une couverture continue de la zone désirée. Selon le cas : soit la surface d'aérodrome pour la surveillance sol, soit la zone terminale pour la surveillance d'approche ;
- Le calcul de position des avions (véhicules) circulants à l'intérieur de cette zone ;
- Le calcul des erreurs afin d'analyser les résultats obtenus.

3.4.1 Architecture de la simulation

La simulation s'exécute à l'aide d'une interface graphique principale d'utilisateur (GUI) pour une saisie facile des données d'entrée. Le déroulement des programmes permet la visualisation des résultats calculés et l'analyse du fonctionnement du système entier. Le schéma général de la simulation est décrit dans la figure 3.6 ci-dessous.

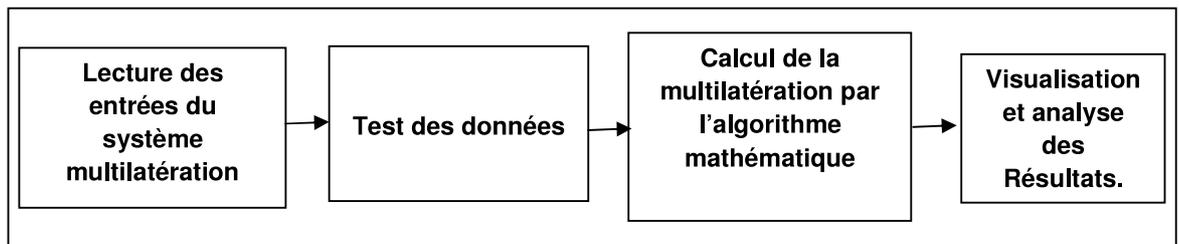


Figure 3.6 : Architecture générale de la simulation.

3.4.2 Algorithme de la multilatération

La figure 3.7 illustre l'algorithme suivi afin d'assurer enchaînement des étapes décrit auparavant.

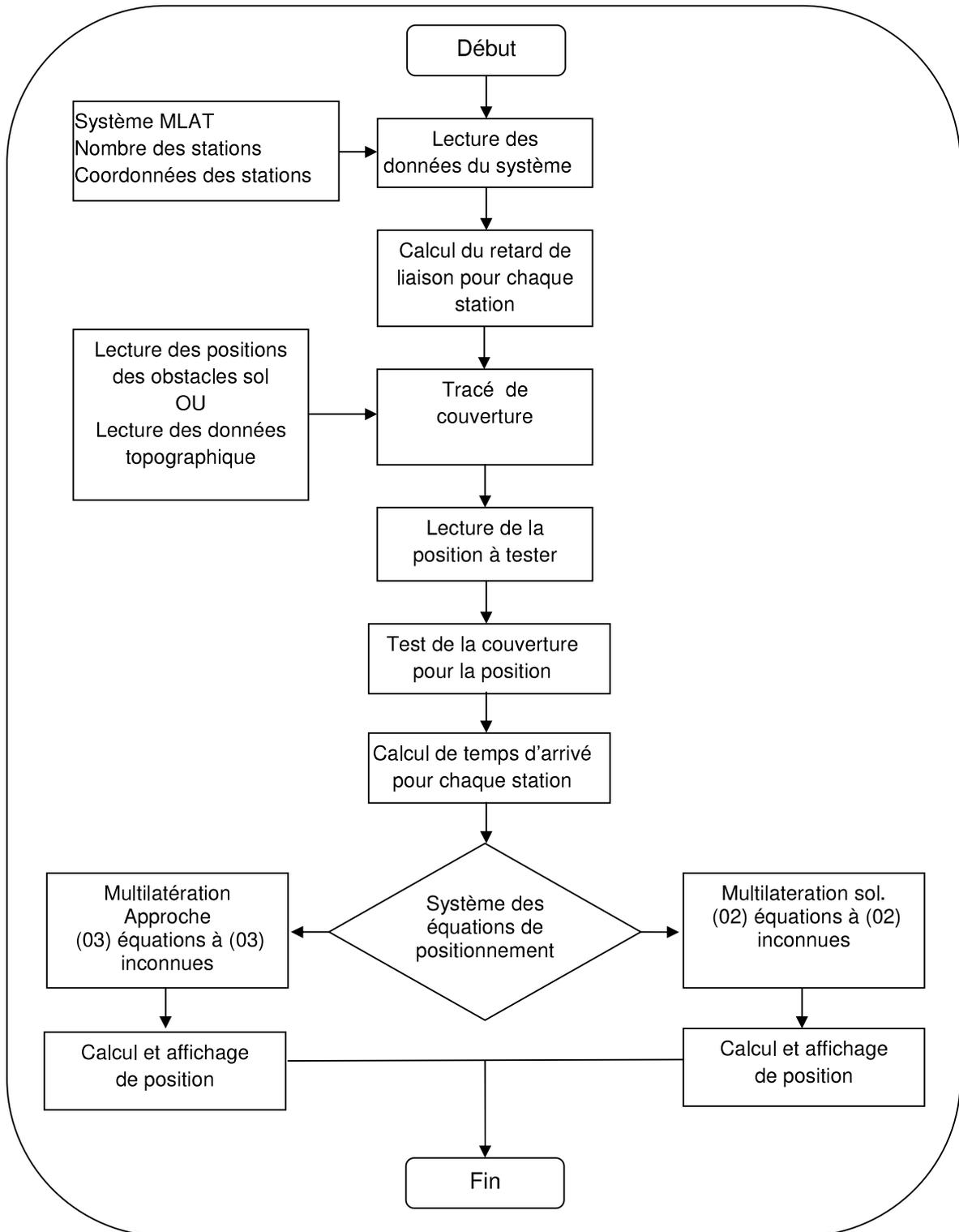


Figure 3.7 : Algorithme de la multilatération.

3.4.3 Description de l'interface de la simulation

Cette interface graphique offre les modules suivants :

3.4.3.1 Multilatération :

Dans cette interface nous avons le choix entre la multilatération sol ou approche. Après il faut nommer le système à simuler.

Concernant la multilatération sol qui est illustré dans la figure 3.8, le bouton « Ouvrir la carte » permet la sélection de la carte d'aérodrome en question et le bouton « Définir les obstacles » ouvre la fenêtre de délimitation des obstacles sol ;

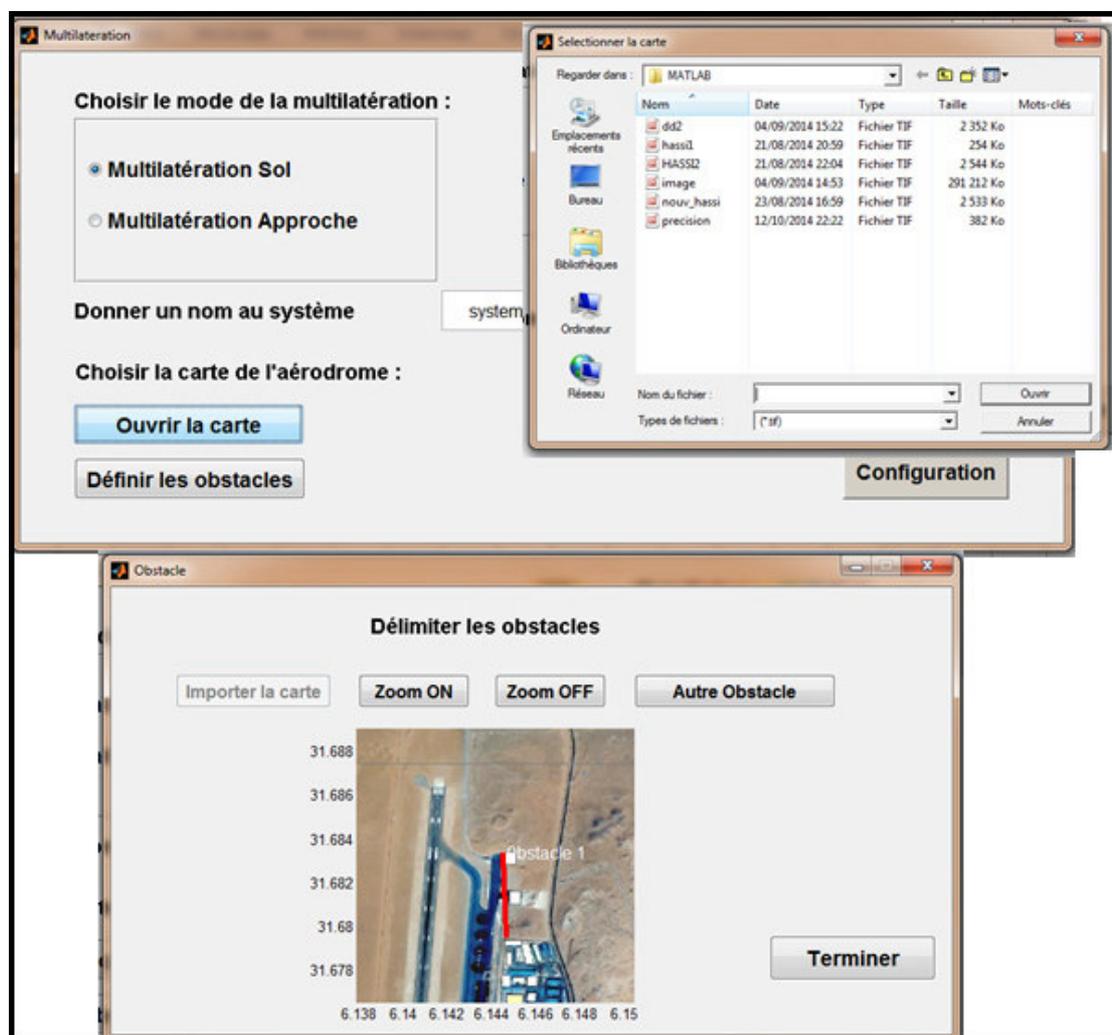


Figure 3.8 : Etapes de choix du système de multilatération sol.

Pour la multilatération approche, le bouton « Ouvrir la carte » permet de choisir le fichier des données topographiques de la zone concernée et celui « Définir l'approche » permet d'accéder à la fenêtre de saisie des paramètres de la zone terminale d'approche (centre de l'aérodrome, un maximum de trois tronçons rectilignes des arrivées ou des départs, l'altitude de transition...). Ce choix est présenté dans la figure 3.9.

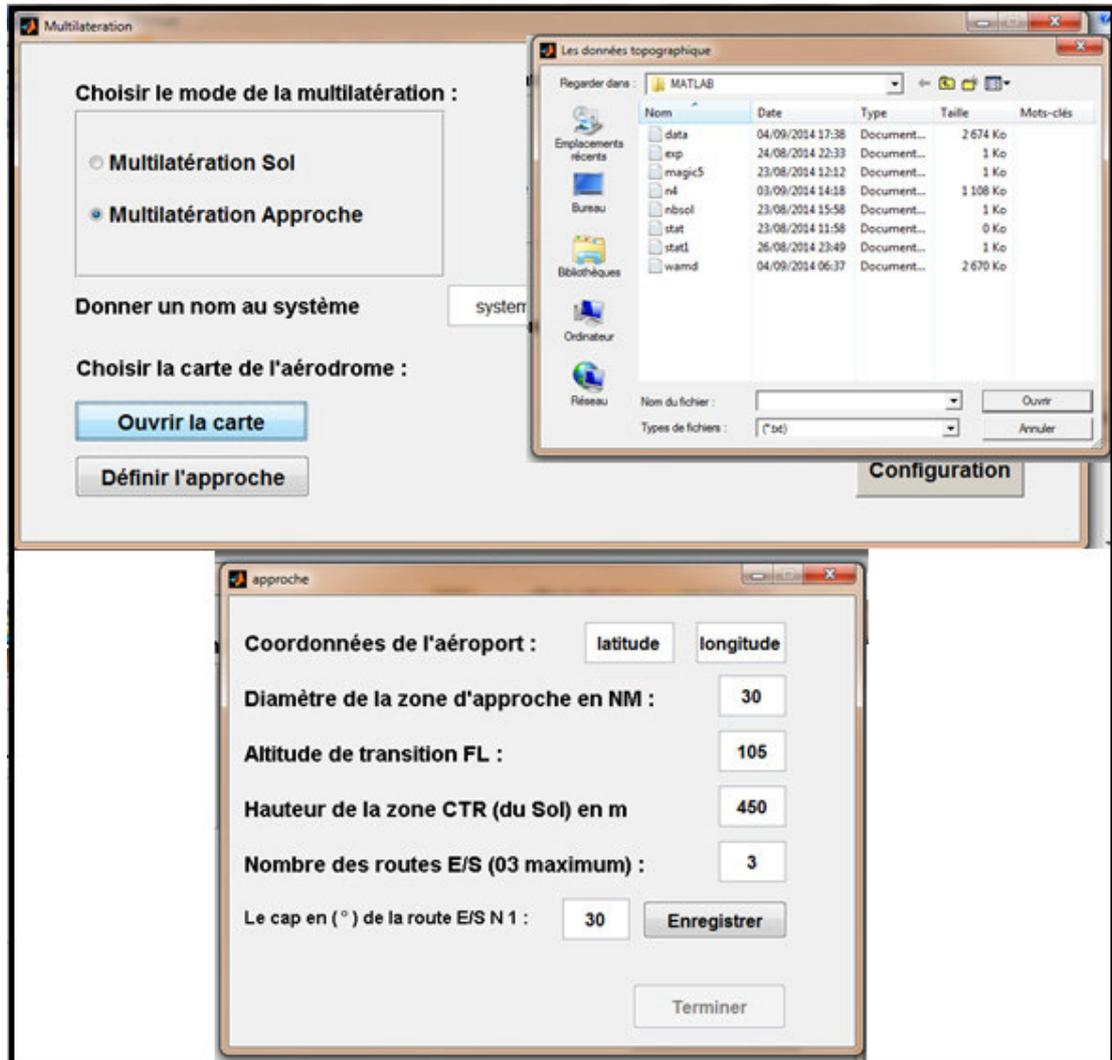


Figure 3.9 : Etapes de choix du système de multilatération approche.

Le type des fichiers pour l'interface est : Image_géoreférentielle.tif pour la simulation au sol et file.xyz convertis en fichier text.txt pour les données topographiques de la zone d'approche.

3.4.3.2 Configuration :

En cliquant sur le bouton configuration de l'interface, la fenêtre représentée sur la figure 3.10 ci-dessous, commune pour les deux modes de simulation s'affiche.

Elle permet à l'utilisateur de choisir à partir d'un fichier Excel une configuration prédéterminée en actionnant le bouton «Parcourir » ou de définir son propre système de multilatération, en donnant : le nombre de stations ; par ordre l'emplacement (en latitude et longitude) de chaque station définie par son numéro (N°1 est celui de la station centrale) et sa hauteur en mètre.

L'utilisateur doit cliquer chaque fois sur le bouton « enregistrer » jusqu'à la fin de la saisie de toutes les stations. Delà, il choisit le type de liaison de donnée adapté au système et son débit en Mb/s, lorsqu'on termine la configuration on clique sur le bouton « suivant » qui met fin à la fenêtre configuration et ouvre celle de visualisation.

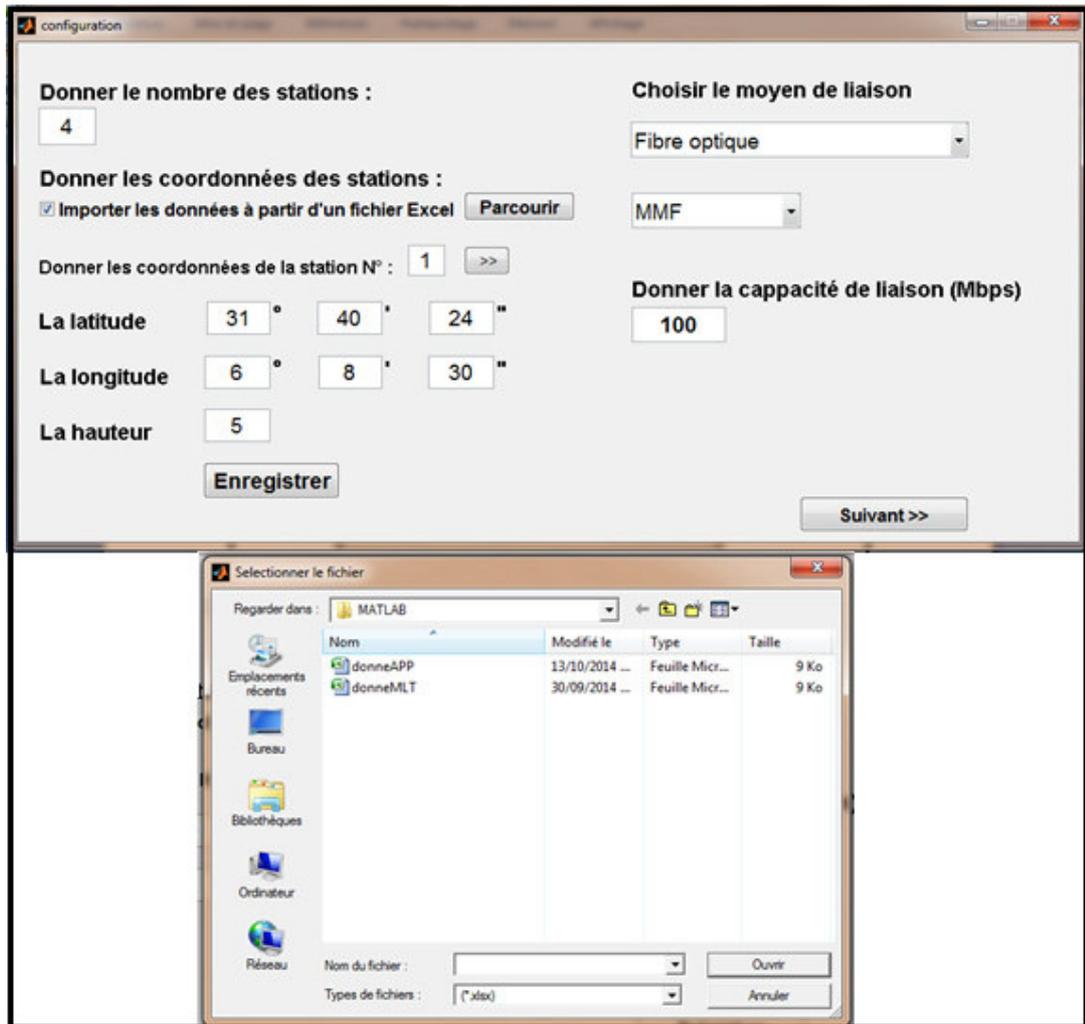


Figure 3.10 : La fenêtre de configuration du système.

3.4.3.3 Visualisation :

Cette fenêtre présentée est réservée à la multilatération sol, dans laquelle nous offrons un choix de calcul entre la simulation de la couverture et celle de positionnement, suivant à la configuration effectuée.

Dans la figure 3.11 nous représentons le premier choix de simulation. Il permet une visualisation de la couverture de toutes les stations ou d'une seule (définie par son numéro). Cette visualisation permet d'analyser la couverture de toute la surface de l'aérodrome en tenant compte des obstacles sol.

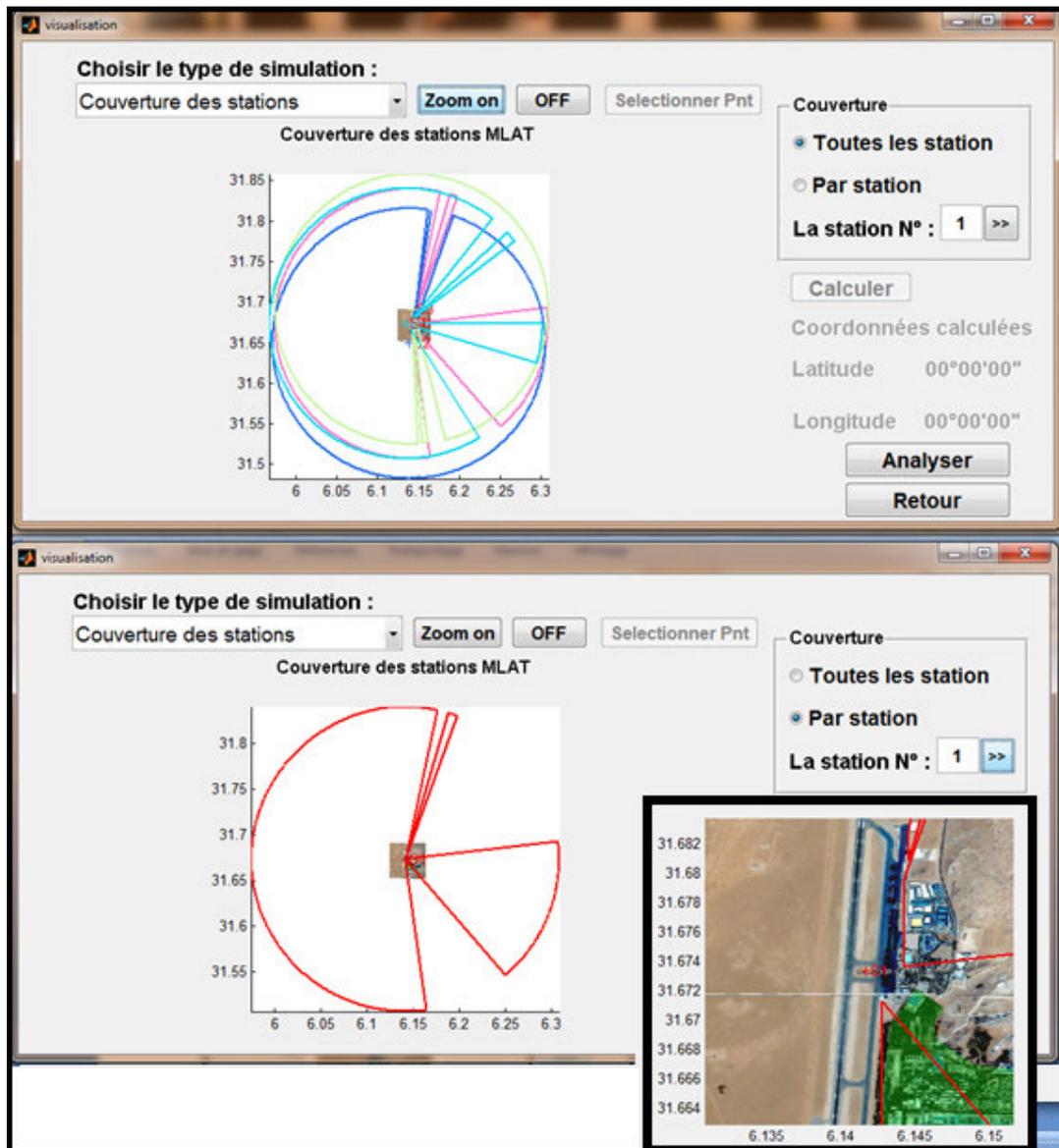


Figure 3.11 : La fenêtre Visualisation de couverture pour multilatération sol.

Pour la simulation de positionnement comme présentée sur la figure (3.12) ci-dessous. On actionne le bouton « choisir un point » le pointeur se transforme en '+' pour fixer un point simulé à un mobile sur la carte.

Le bouton « Calcul » donne alors le résultat de calcul de la position par la méthode TDOA de la multilatération. La position calculée est représentée par son « Latitude » et « Longitude » et visuellement sur la carte. Par conséquent, nous pouvons voir la différence entre la position calculée et réelle (l'erreur) afin de déduire la précision du système.

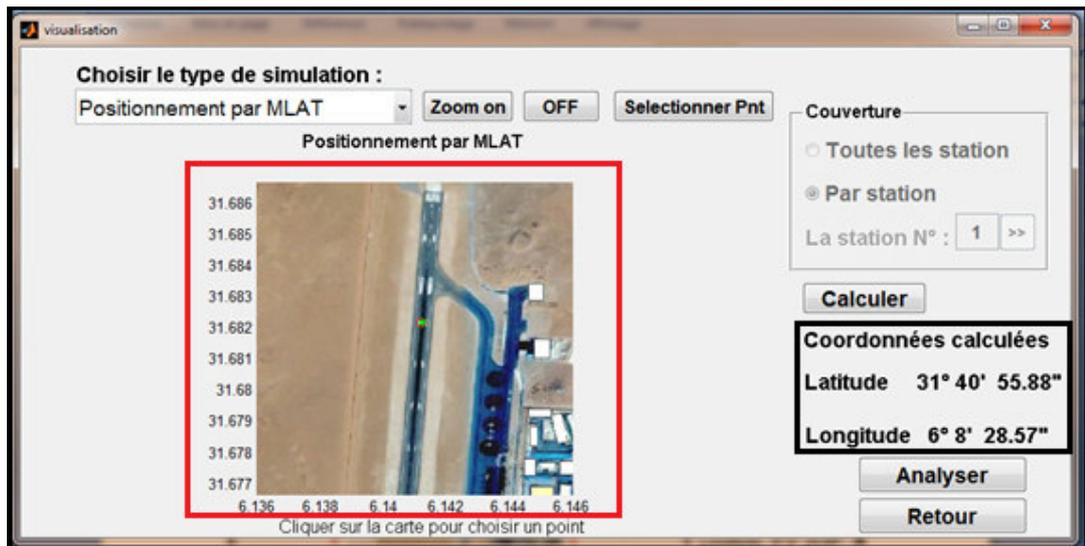


Figure 3.12 : La fenêtre Visualisation de positionnement pour multilatération sol.

3.4.3.4 Visual App :

Cette interface apparaît lorsque l'utilisateur clique sur le bouton « suivant » après l'exécution de la configuration du système en mode multilatération d'approche.

La simulation de la couverture est présentée sur une carte topographique ainsi que les possibilités de choix qui restent identiques à la multilatération sol, comme illustré dans la figure 3.13. De plus, une sélection de types de positionnement est proposée soit par un point ou par une trajectoire définie par deux points (initial et final).

Cette sélection se fait sur l'une des routes prédéterminées. L'affichage des résultats est aussi représenté dans la figure 3.13 pour une trajectoire de huit (08) points intermédiaires, donc, il visualise mieux le déplacement des avions.

Cette l'interface offre une vision en deux « 2D » ou trois « 3D » dimensions des résultats et ouvre un fichier texte de coordonnées des points, en cliquant sur le grand bouton « Coordonnées » qui va s'apparaître à la fin du calcul.

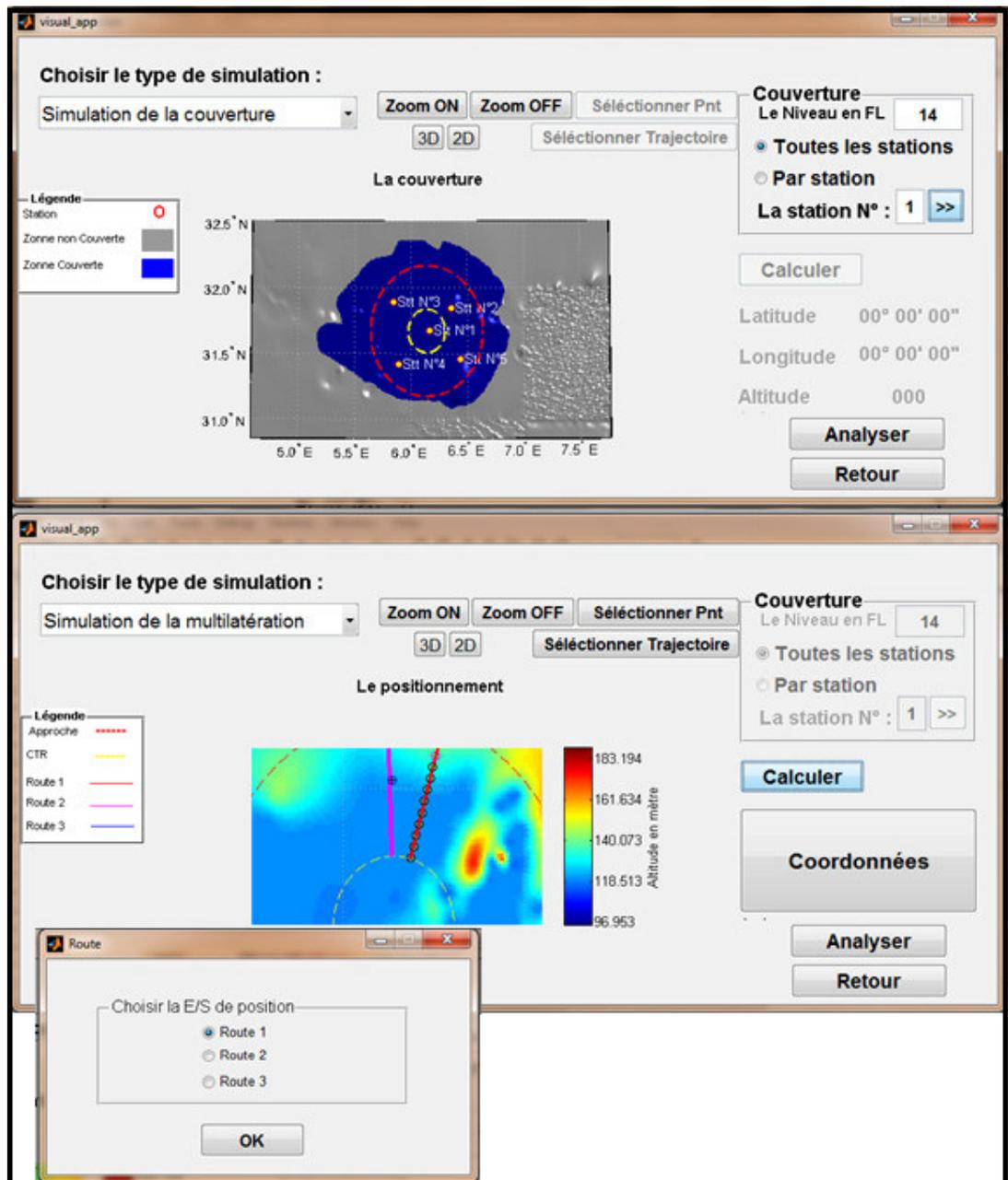


Figure 3.13 : La fenêtre visualisation de couverture et de positionnement pour multilatération approche (Visual_app).

3.4.3.5 Analyse :

Cette fenêtre est illustrée par la figure 3.14 ci-dessous. À travers le bouton « Analyser », nous visualisons une lecture graphique de la variation de l'erreur du calcul des différents points sélectionnés pour deux ou trois dimensions suivant le mode du système testé.

Le bouton « Rapport » permet d'accéder au fichier Word qui contient les détails du système, les choix effectués ; les données injectées ; les calculs et les tests réalisés.

Un exemple d'affichage des graphes de variation de l'erreur en calcul de position de 20 points répartis sur la surface de l'aéroport de Hassi Messaoud est présenté sur la figure 3.14.

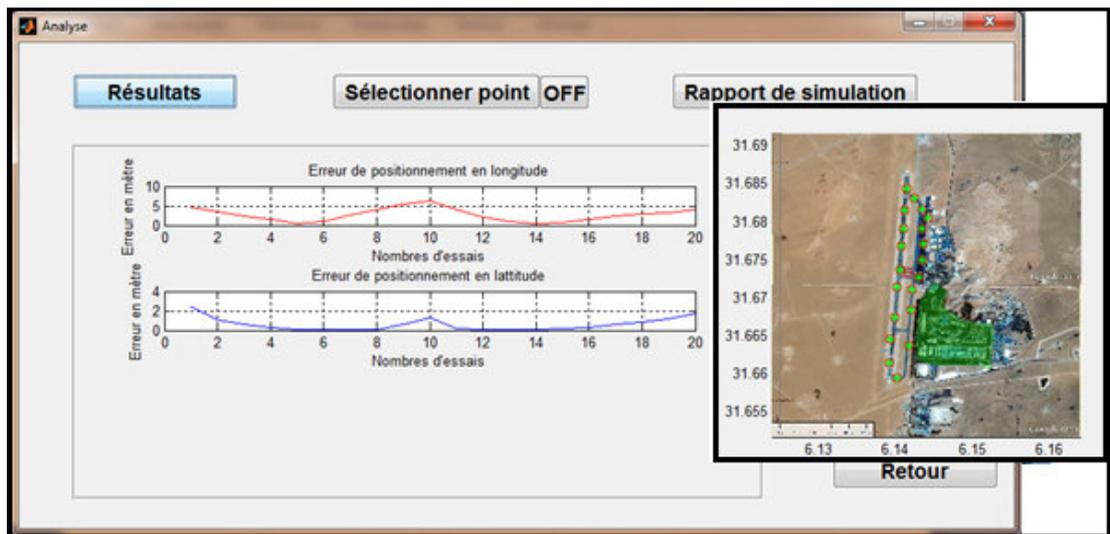


Figure 3.14 : La fenêtre Analyse.

3.4.4 Application

Dans cette section, nous présentons une application qui permet de simuler et d'évaluer le système de surveillance multilatération proposé à l'aéroport de Hassi Messaoud, en se basant sur notre étude préliminaire.

3.4.4.1 Simulation de la multilatération sol sur l'aéroport de Hassi Messaoud

L'implémentation du système multilatération sol et la carte de l'aéroport de Hassi Messaoud sont choisis. De là, nous sélectionnons les obstacles sur cette carte, à l'aide de la fenêtre « Obstacle » comme s'est illustré dans la figure 3.15.



Figure 3.15 : Sélection des obstacles sur la carte de Hassi Messaoud.

Les coordonnées des obstacles sont classées dans le tableau 3.1, selon le numéro attribué à chaque obstacle.

Tableau 3.1 : Coordonnées des obstacles sélectionnés sur l'aéroport de Hassi Messaoud.

N° d'obstacle	Point 1	Point 2
1	Lat 31.6834 N Lon 6.14452 E	Lat 31.681 N Lon 6.14447 E
2	Lat 31.6793 N Lon 6.14447 E	Lat 31.6742 N Lon 6.14423 E
3	Lat 31.6718 N Lon 6.14367 E	Lat 31.6618 N Lon 6.14272 E

Dans notre cas, la configuration adaptée est définie par l'emplacement des stations choisies et des autres données à injecter. Elle est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 3. 2: Description des stations du système MLAT sol de Hassi Messaoud.

N°	Latitude	Longitude	Hauteur m	Moyen de liaison	Début Mb/s
1	31°40'24"N	006°08'30"E	5	Fibre Optique	100
2	31°38'56"N	006°08'18"E	5	Fibre Optique	100
3	31°41'28.9"N	006°08'30.9"E	5	Fibre Optique	100
4	31°40'25"N	006°08'06"E	5	Fibre Optique	100

La fenêtre de visualisation représentée sur la figure 3.16, permet de définir la couverture fournie par le système proposé avec un zoom sur cette dernière.

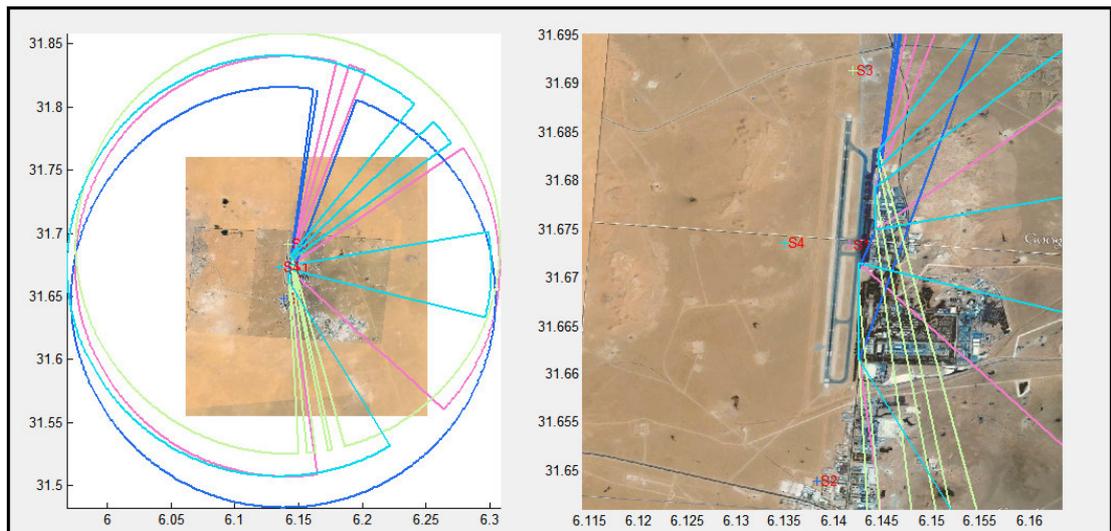


Figure 3.16 : Simulation de la couverture des stations de MLAT sol.

La dernière étape de cette simulation est le « positionnement » par multilatération, dans laquelle nous injectons dans le programme de calcul différents valeurs d'erreur σ_{TDOA} pour analyser notre système (taux d'erreurs).

Une sélection de 153 positions à différents endroits sur l'aire de manœuvre et de mouvement est réalisée. Les résultats obtenus sont traités par une représentation graphique obtenue par la fenêtre «Analyse».

Les figures ci-dessous, représentent la variation des erreurs pour trois valeurs de σ_{TDOA} (10 ns, 9 ns et 5 ns) et pour des positions identiques.

Ces positions sont réparties comme suit :

- Positions de 1 à 40 prises sur la piste;
- Positions de 41 à 80 prises sur les voies de circulation ;
- Positions de 81 à 153 prises sur le parking.

Constatations :

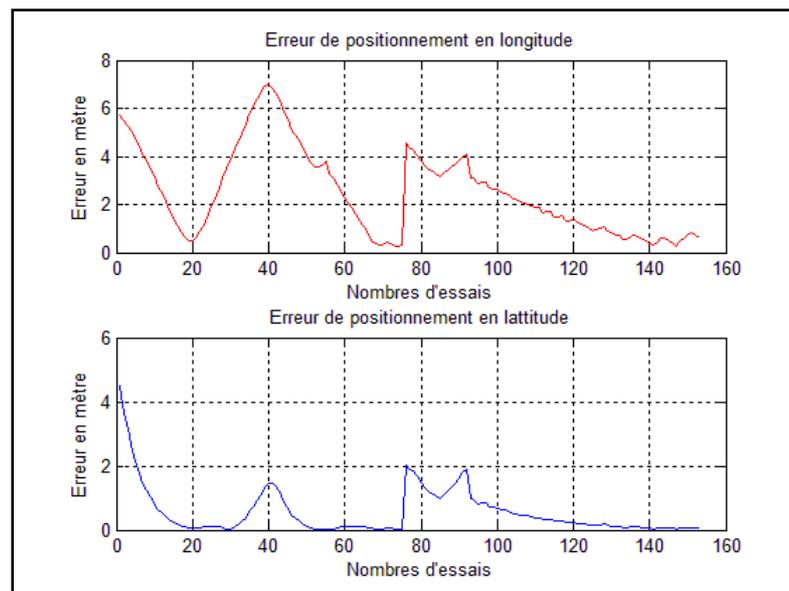


Figure 3.17 : Erreurs de positionnement pour $\sigma_{TDOA}=10$ ns.

De la figure ci-dessus, nous remarquons que la valeur maximale d'erreur en longitude et en latitude pour $\sigma_{TDOA}=10$ ns est respectivement 6.970 m (position 40) et 4.498 m (position 1), ces deux positions se situent sur la piste. La tendance des deux courbes (longitude, latitude) est la même avec une différence dans la valeur d'erreur entre elles.

Si nous calculons l'erreur moyenne en latitude et longitude, nous constatons qu'elle diminue de 5.11 m jusqu'à 0.149 m, tout en nous rapprochant de la station centrale. Cette diminution est présentée sur la figure 3.18.

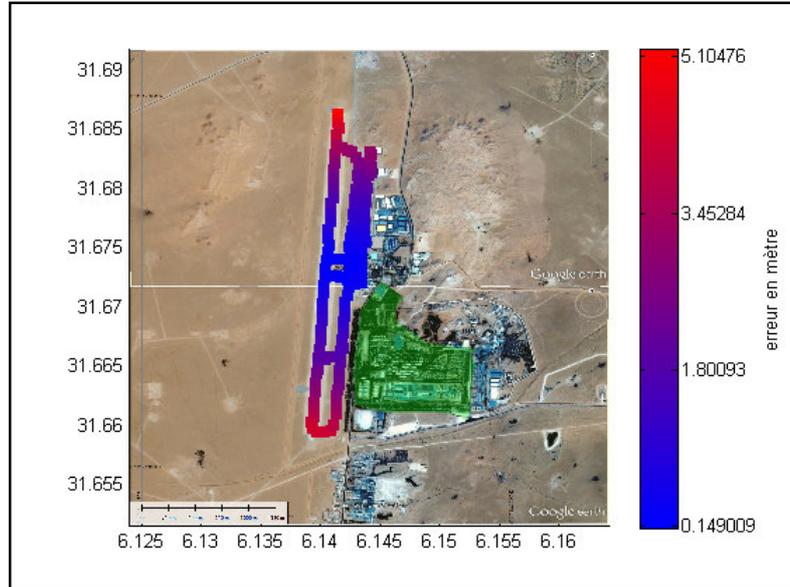


Figure 3.18 : Précision du système pour $\sigma_{\text{TDOA}}=10$ ns.

La figure 3.19 représente la variation d'erreur de positionnement et la précision pour une valeur de $\sigma_{\text{TDOA}}=9$ ns. Les erreurs maximales en longitude et en latitude sont de 6.195 m (position 39) et de 5.614 m (position 41) respectivement.

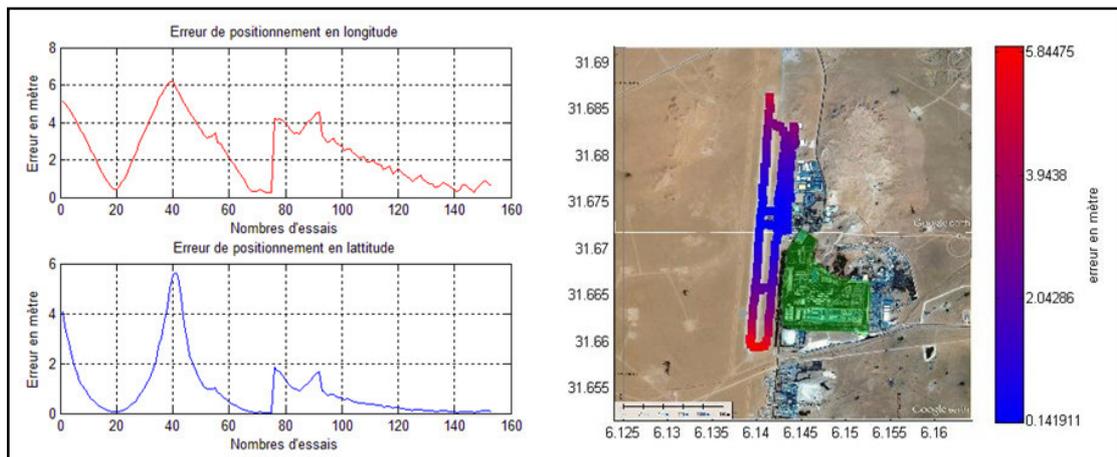


Figure 3.19 : Erreurs et Précision de positionnement pour $\sigma_{\text{TDOA}}=9$ ns.

Concernant l'erreur, les graphiques de la figure 3.18 illustrent que la tendance d'erreur en longitude et latitude est identique et que la différence est

plus accentuée pour les positions de la piste (entre 1 et 40). La précision se situe entre l'intervalle 0.142 m et 5.845 m.

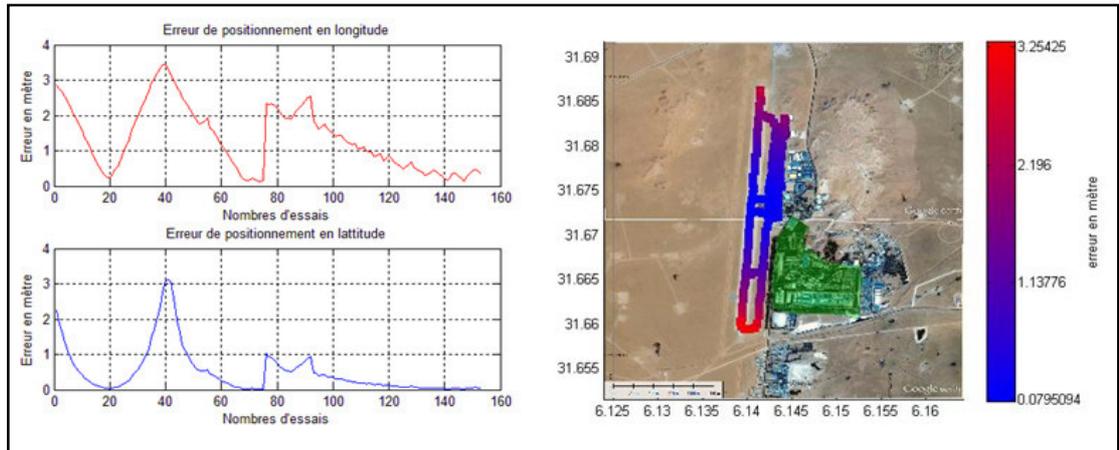


Figure 3.20 : Erreurs et Précision de positionnement pour $\sigma_{TDOA}=5$ ns.

La figure 3.20 représente la variation d'erreur de positionnement et la précision pour une valeur de σ_{TDOA} de 5 ns. Les valeurs maximales en longitude et en latitude sont respectivement 3.448 m et 3.126 m. La différence entre les deux graphes d'erreur (longitude, latitude) est moins importante par rapport aux cas précédents.

Si nous calculons l'erreur moyenne entre la latitude et la longitude, nous constatons quelle est nettement meilleure avec des valeurs dans l'intervalle [0.080 m ; 3.254 m].

3.4.4.2 Discussion des résultats

➤ **Couverture :**

Le principe de cette simulation consiste à tracer pour chaque station proposée de multilatération figurant sur la carte, la zone de détection concernée sur la base de ces performances techniques. La couverture finale de ce système est constituée de l'ensemble des points à visibilité radioélectrique des quatre (4) stations nécessaires à la localisation exigée en deux dimensions.

L'influence des obstacles est clairement observée sur la figure 3.16. Cependant la figure 3.21 montre que l'aire de manœuvre (délimitée en Noire) et l'aire de trafic (délimitée en Rouge) sont bien couvertes par toutes les stations.

Nous pouvons confirmer que la configuration proposée est acceptable pour l'aéroport de Hassi Messaoud.

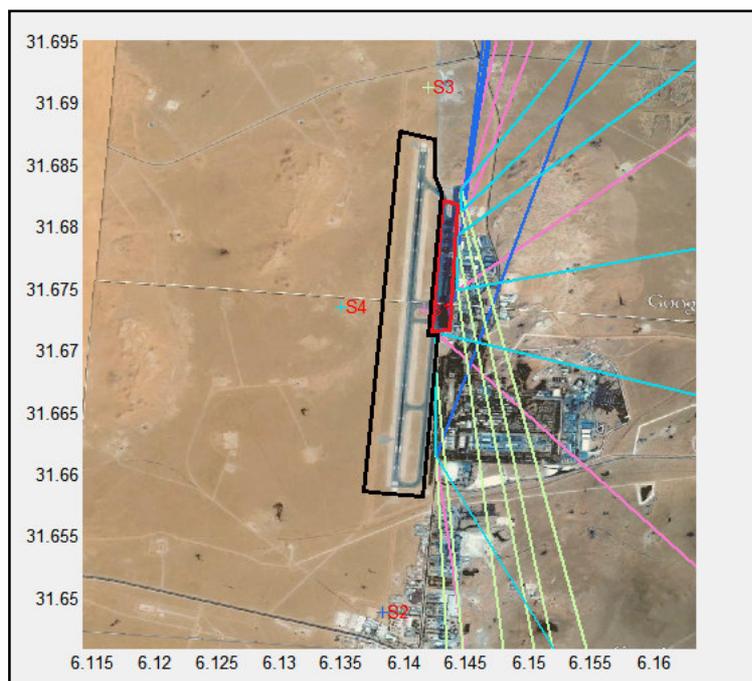


Figure 3.21 : Couverture complète de la surface de Hassi Messaoud.

➤ Positionnement :

D'après les constatations retenues des figures 3.18 ; 3.19 et 3.20, la précision sur les coordonnées X, Y est fonction de la précision des mesures de différences du temps d'arrivée des signaux, mais aussi de la position du point à localiser par rapport à la station centrale.

L'Eurocae dans son MOPS (Minimum Operational Performance Specification) pour la multilatération mode S utiliser dans un A-SMGCS définit les limites suivantes :

- Précision de position horizontale sur l'aire de manœuvre de 7.5m à 12m ;
- Précision de la position au poste stationnement de 20m ;
- Précision horizontale dans l'axe d'approche jusqu'à 2,5 NM 20m ;
- Précision horizontale dans l'axe d'approche de 2,5NM à 5NM 40m.

Par conséquent, le système proposé répond à ces exigences de précision.

3.4.4.3 Simulation de la multilatération de l'approche de Hassi Messaoud

Nous choisirons sur la fenêtre principale l'implémentation du système multilatération d'approche et des données topographiques de la zone terminale de Hassi Messaoud. Par la suite, à l'aide de la fenêtre « Définir approche » nous introduisons les données suivantes:

- Coordonnées de l'aérodrome : Latitude 31.67 N Longitude 6.14 E
- Diamètre de la zone de l'approche : 30 NM.
- Altitude de transition : FL 105.
- Hauteur de la zone CTR : 450 m.
- Nombre de route E/S de l'approche : 03
- Caps : SID1 « 358° » ; SID2 « 16° » ; STAR1 « 180 ».

La configuration proposée est définie par les emplacements des stations choisies et des autres données (voir tableau 3.3).

Tableau 3. 3: Description des stations du système MLAT approche de Hassi Messaoud.

N°	Latitude	Longitude	Hauteur m	Moyen de liaison	Débit Mb/s
1	31°40'27.00" N	006°08'39.00" E	13	Fibre optique	100
2	31°55'44.8984"N	006°23'50.4384"E	15	Fibre optique	100
3	31°53'23.4114"N	005°50'43.9259"E	15	Fibre optique	100
4	31°25'09.0283"N	005°53'31.8035"E	15	Fibre optique	100
5	31°27'30.00" N	006°26'31.0239"E	15	Fibre optique	100

L'étape suivante consiste à simuler la couverture attendue de ce système pour trois niveaux de vol :

- FL 105 : plafond de la zone d'approche de Hassi Messaoud ;

- FL 30 : niveau intermédiaire pour visualiser l'évolution de la couverture ;
- FL 14 : niveau inférieur de la zone d'approche de Hassi Messaoud.

Les résultats obtenus pour chaque niveau sont présentés sur les figures 3.22 ; 3.23 et 3.25 ci-dessous.

Pour le niveau de vol FL 105, nous remarquons que toute la zone d'approche délimitée par un cercle rouge de rayon de 30 NM (Voir figure 3.22) est à l'intérieur de l'intersection des cinq couvertures des stations proposées.

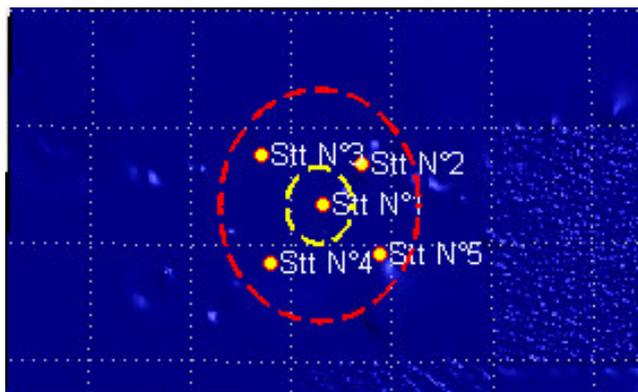


Figure 3.22 : Couverture FL105.

Dans le cas contraire, il sera nécessaire de redéfinir la / les stations limitant la couverture, alors nous devons représenter la couverture de chaque station.

La figure 3. 23 monte que la zone d'approche pour le niveau de vol FL 30 est aussi bien couverte par les stations. Tendis que la couverture fournie par chaque station seule est présentée par la figure 3.24.

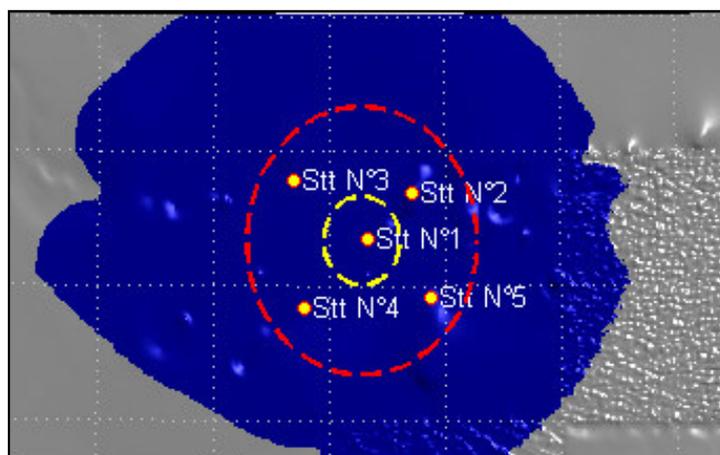


Figure 3.23 : Couverture pour FL30.

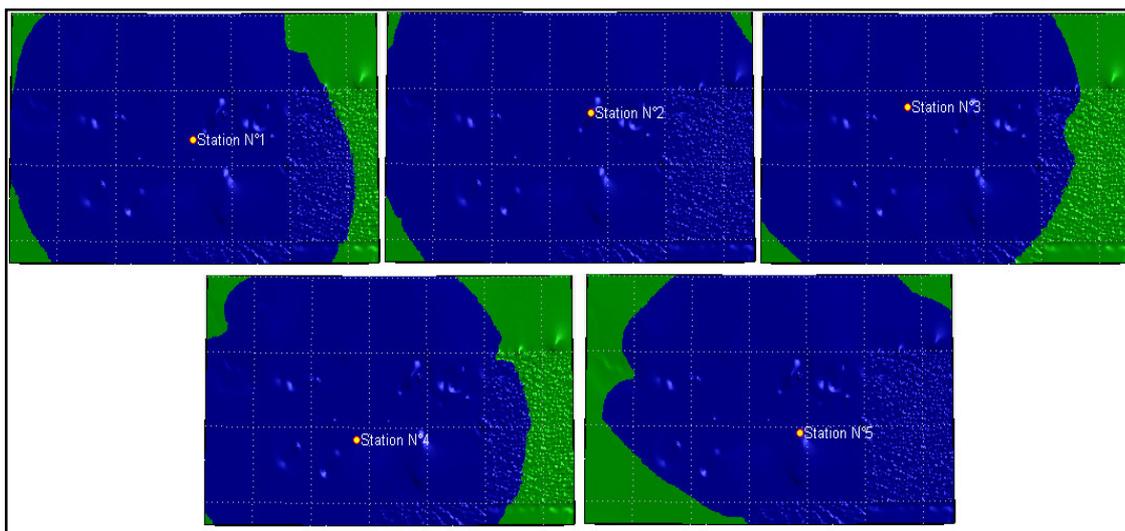


Figure 3.24 : Couverture par chaque station pour FL30.

Pour le niveau de vol FL14 qui représente la limite inférieure de l'approche de Hassi Messaoud, nous pouvons voir sur la figure 3.25 que le système proposé assure la couverture totale de la zone désirée (délimitée en rouge).

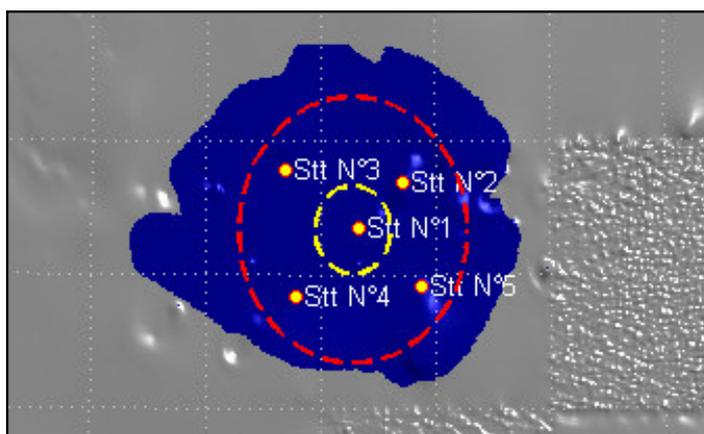


Figure 3.25 : Couverture pour FL14.

Sur la figure 2.26, nous remarquons que la plus grande couverture est celle fournie par la station N°2. C'est la raison pour la quelle, elle est active (elle émit les interrogations).

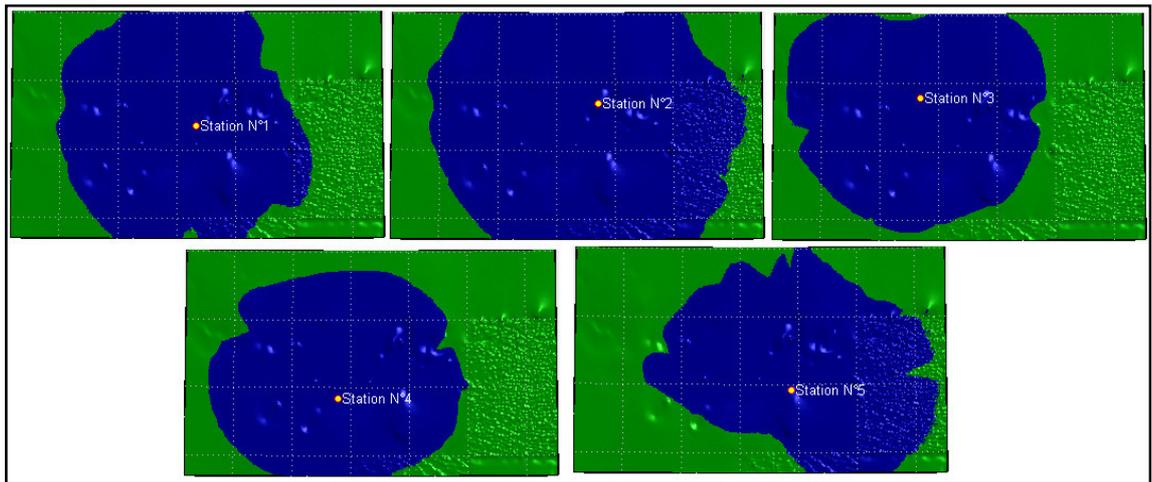


Figure 3.26 : Couverture par chaque station pour FL14.

La dernière étape pour cette simulation est le calcul et le test de positionnement par multilatération, pour une configuration donnée.

Afin d'analyser la précision de notre système, nous avons sélectionné par le bouton «sélectionner trajectoire » 100 positions dans différentes directions dans la zone d'approche de Hassi Messaoud.

Pour chaque trajectoire (direction), le premier point est sur la limite supérieure de l'approche et le deuxième est sur la limite inférieure. La figure 3.27 représente les résultats affichés sur notre fenêtre de visualisation.

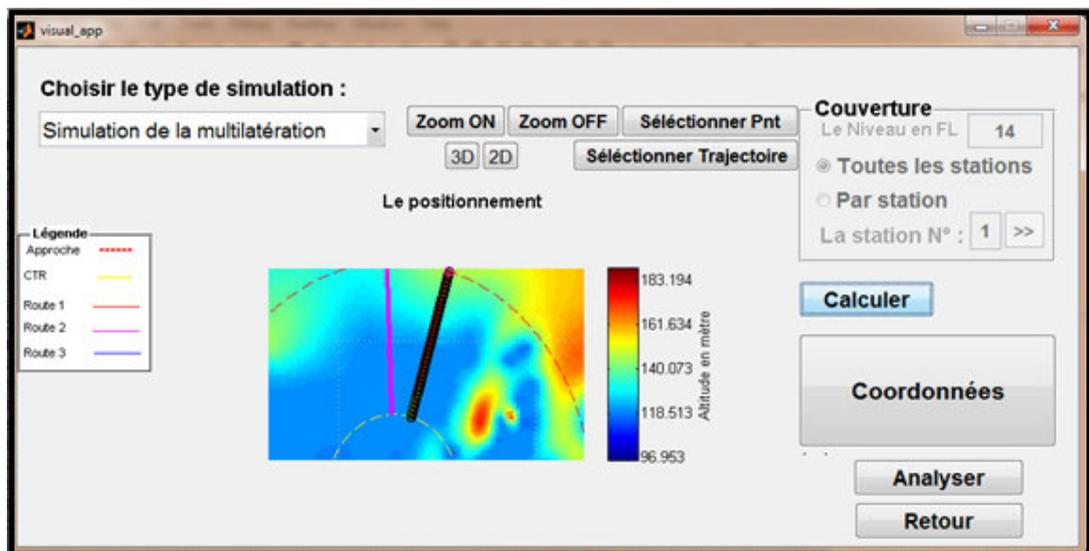


Figure 3.27 : La simulation de positionnement.

Le test est réalisé pour deux valeurs de σ_{TDOA} (1ns et 10 ns) ; les résultats obtenus sont représentés ci-dessous.

Constatations :

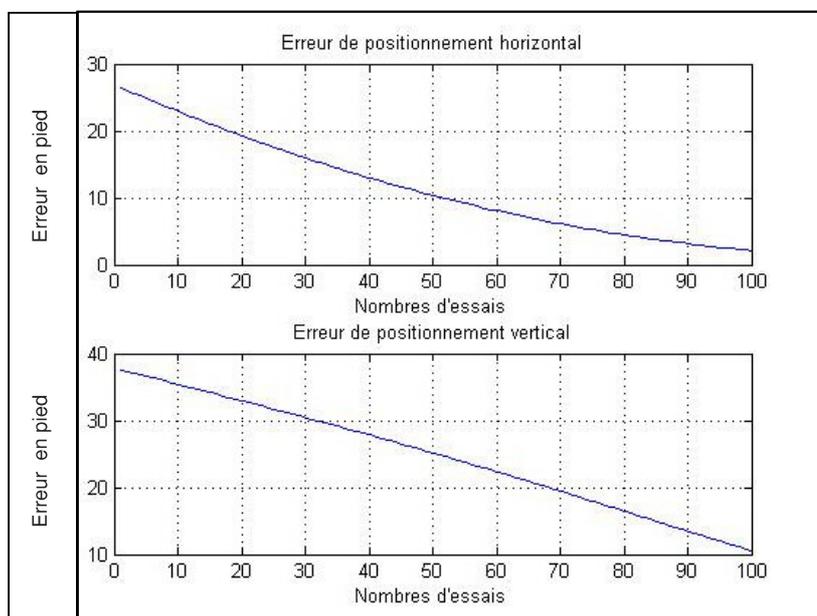


Figure 3.28 : Erreur de positionnement pour $\sigma_{\text{TDOA}}=1$ ns.

Sur le graphique de la figure 3.28, nous remarquons que l'erreur horizontale maximale est égale à 28.453 ft, mais pour l'erreur verticale cette valeur est plus grande, elle est de 38.569 ft. Pour des valeurs minimales des erreurs, nous trouvons une erreur horizontale de 2.147 ft et verticale de 10 ft.

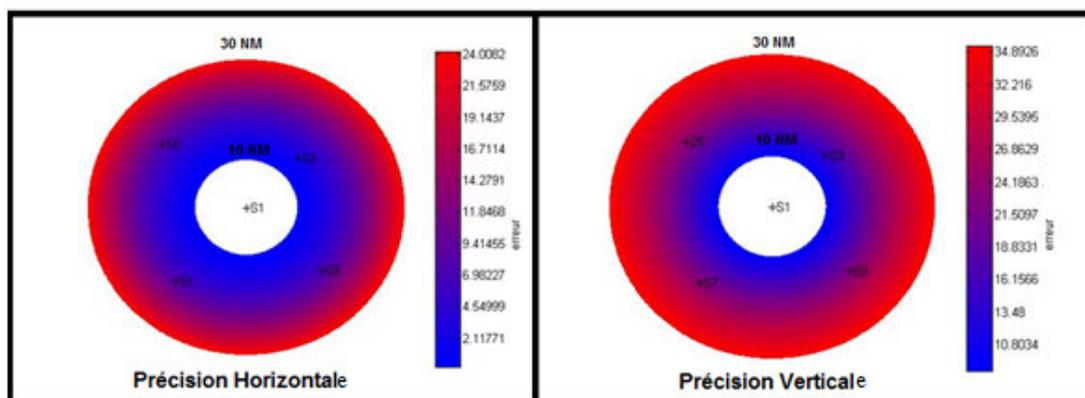


Figure 3.29 : La précision pour $\sigma_{\text{TDOA}}=1$ ns

Concernant la précision de positionnement, deux constatations pour la précision peuvent se présenter, comme illustré sur la figure 3.29, la première est

que la précision augmente tout en s'approchant de la station centrale, et la deuxième est que la précision verticale est mauvaise par rapport à la précision horizontale.

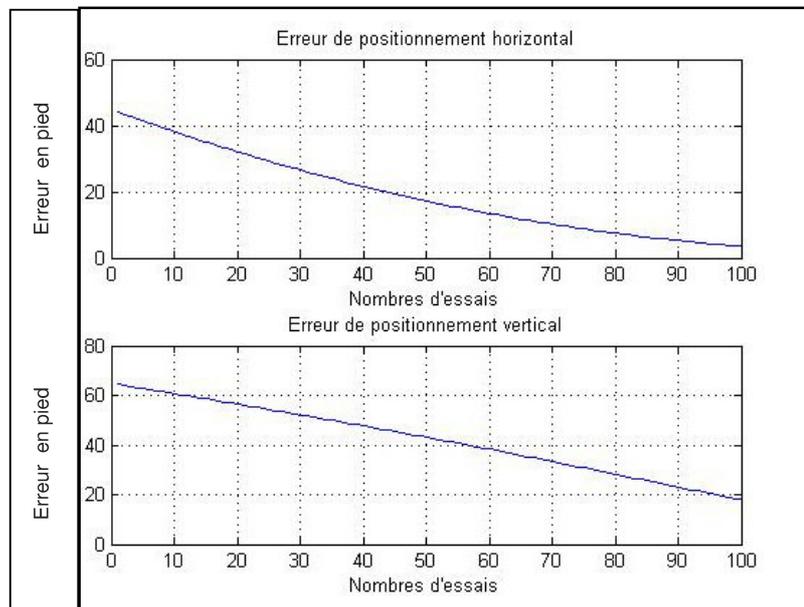


Figure 3.30 : Erreur de positionnement pour $\sigma_{TDOA}=10$ ns.

D'après la figure ci-dessous, nous remarquons que l'erreur horizontale maximale est égale à 45.235 ft et pour l'erreur verticale cette valeur est plus grande, elle est de 64.341 ft. Pour des valeurs minimales des erreurs, nous trouvons une erreur horizontale de 6.745 ft et verticale de 18.897 ft.

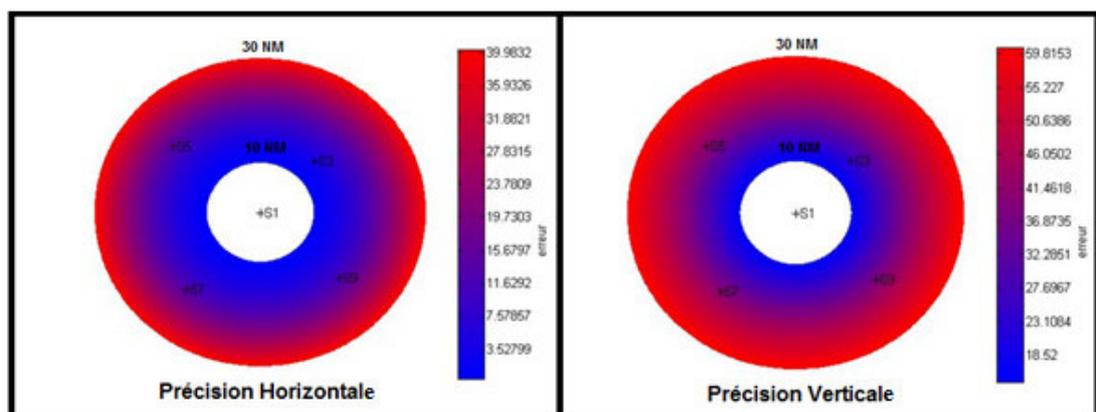


Figure 3.31 : La précision pour $\sigma_{TDOA}=10$ ns.

La variation de la précision reste dans la même tendance sauf que la précision est mauvaise par rapport au cas précédent.

3.4.4.4 Discussion des résultats

➤ **Couverture :**

En surveillance air, la couverture est un critère de visibilité radioélectrique qui prévaut, contraignant en particulier pour les altitudes faibles. Mais les résultats de la simulation ont prouvé que la configuration du système proposé assure une couverture totale de l'approche de Hassi Messaoud au minimum jusqu'à sa limite inférieure (FL 14).

➤ **Positionnement :**

Plus généralement, la précision de la multilatération peut être décomposée en deux composantes horizontale et verticale. D'après les figures 3.29 et 3.31, On peut succinctement retenir que :

- La précision présente ses meilleures valeurs au centre de la distribution des récepteurs ;
- La précision horizontale est supérieure à la précision verticale ;
- La qualité de la mesure verticale (altitude géométrique) est médiocre à faible niveaux : Ces résultats restent fonction de la répartition verticale des récepteurs, mais cette caractéristique, sauf configuration dédiée (caractéristique sans impact en exploitation altitude altimétrique Mode C), ruine toute exploitation de la mesure de hauteur géométrique en approche.

Un exemple est proposé dans [17] d'un réseau TMA de 5 balises de base 20NM, les graphes ci-dessous montrent l'influence d'une précision de la mesure de temps (TDOA) = 1ns sur une couverture de 60NM à 35 000ft.

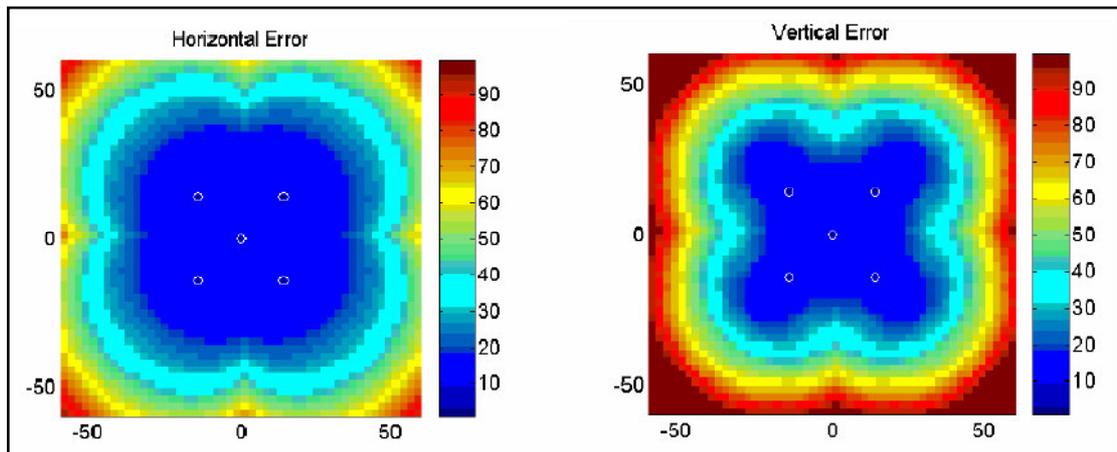


Figure 3.32 : La précision (ft) d'un système TMA pour $\sigma_{\text{TDOA}}=1$ ns [17].

Alors notre système répond aux exigences de précision.

3.5 L'automatisation de la surveillance à l'aéroport de Hassi Messaoud

On a pu présenter précédemment la multilatération Mode S comme un capteur essentiel aux applications de surveillance à la surface (A-SMGCS) et de l'approche. Donc, on peut dire avec certitude que cet équipement contribuera très largement au succès du système de visualisation. Il lui permettra d'atteindre les objectifs de performances de la fonction surveillance.

La mise en place de cette technologie à l'aéroport de Hassi Messaoud fera une occasion unique :

- D'intégrer de manière optimale les technologies de surveillance par multilatération les plus récentes (première en Algérie) ;
- De maximiser la visibilité des contrôleurs aériens sur cet aéroport ;
- De mettre au point l'ergonomie des postes de travail des contrôleurs tour et approche;
- De gérer de manière efficace le trafic aéroportuaire, également de faire face aux développements de l'aéroport et à l'évolution du trafic aérien, tout en garantissant le plus haut degré de sécurité.

La réalisation de ce concept prendra forme grâce à :

- L'installation des quatre capteurs sol de système de multilatération et une unité de traitement ;
- L'équipement des véhicules qui circulent sur l'aéroport ;
- L'intégration des systèmes d'affichage des données qui permettent aux contrôleurs aériens d'observer et d'identifier sur leurs écrans les avions à l'aéroport, avec une grande précision, ainsi un système «filet de sauvegarde», qui affiche une alerte sur l'IHM indiquant les possibles risques d'intrusion de piste.

3.6 Les bénéfices de l'expérimentation de la multilatération

Finalement, l'adaptation de la multilatération à l'aéroport de Hassi Messaoud aidera à acquérir l'expérience opérationnelle nécessaire, par l'anticipation des problèmes liés à son exploitation et l'évaluation de près des résultats de son utilisation, avant de prendre la décision d'opter pour cette technologie pour pallier à certains problèmes de surveillance sol dans d'autres aéroports algériens.

Les bénéfices attendus d'une telle opération sont les suivants :

- Procéder à une évaluation opérationnelle des apports de l'A-SMGCS ;
- Familiariser la communauté aéronautique algérienne avec la multilatération par la manipulation opérationnelle et l'expérience technique ;
- Acquérir une expertise interne dans le développement de procédures de surveillance associé à la multilatération ;
- Former et familiariser les contrôleurs ATC aux principales utilisations de ce concept dans un environnement automatisé.

Les résultats de ces tests seront analysés et documentés pour permettre la rédaction d'un guide opérationnel et technique destiné aux opérateurs et aux équipes de maintenance.

3.7 Conclusion

La multilatération est une technologie prouvée pour une identification exacte des aéronefs.

Nous avons développé un simulateur pour réaliser et évaluer notre système de multilatération proposé à l'aéroport de Hassi Messaoud et aussi pour étudier l'influence du retard dans le système de multilatération, utilisant différentes liaisons de communication.

Une simulation de couverture est également fournie comme un outil d'aide à l'étude et la conception de ce nouveau système à implémenter en Algérie.

En conclusion, l'adaptation de la multilatération à un aéroport est toujours la recherche du meilleur compromis entre le nombre et la position des balises sachant bien sûr, que le coût de ce système est directement lié à ce nombre et que la multiplicité des balises augmente aussi les difficultés et les coûts d'installation et d'exploitation.

CHAPITRE 4

CONCEPT DE SURVEILLANCE DÉPENDANTE AUTOMATIQUE (ADS-B)

4.1 Introduction

Il n'est pas surprenant que la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B) soit appelée à devenir un élément clé du futur système mondial de gestion du trafic aérien (ATM). Ses avantages sont maintenant bien compris, tant par les exploitants que par les fournisseurs de services de navigation aérienne. Elle n'améliore pas seulement la sécurité en augmentant la capacité et l'efficacité, mais promet aussi d'appréciables économies.

Nous nous intéresserons en particulier dans ce chapitre, au concept ADS-B comme moyen de surveillance air/sol.

4.2 Généralités

4.2.1 Principe :

L'ADS-B est automatique du fait qu'aucune action de l'équipage de conduite ou du contrôleur n'est requise pour qu'une information soit transmise. La surveillance est dépendante du fait que les informations touchant la surveillance dépendent des références de navigation et des capacités de diffusion associées à l'émetteur qui les transmet. D'autres techniques de surveillance, comme le radar au sol émet des interrogations et utilise les réponses du transpondeur d'avion pour le localiser, l'ADS-B (à bord de l'avion) diffuse la position GNSS chaque seconde.

L'information reçue par les contrôleurs inclus : l'identification de l'avion, l'altitude, la vitesse, l'accélération, prochain point de navigation et autres informations utiles.

Sur la figure 4.1, les données ADS-B sont reçues par des stations spéciales au sol, qui les transmettent vers les écrans des contrôleurs du plus proche centre de contrôle aérien. À son tour, le contrôleur peut envoyer des données

météorologiques ou autres données vers l'avion par le transmetteur de la station au sol.

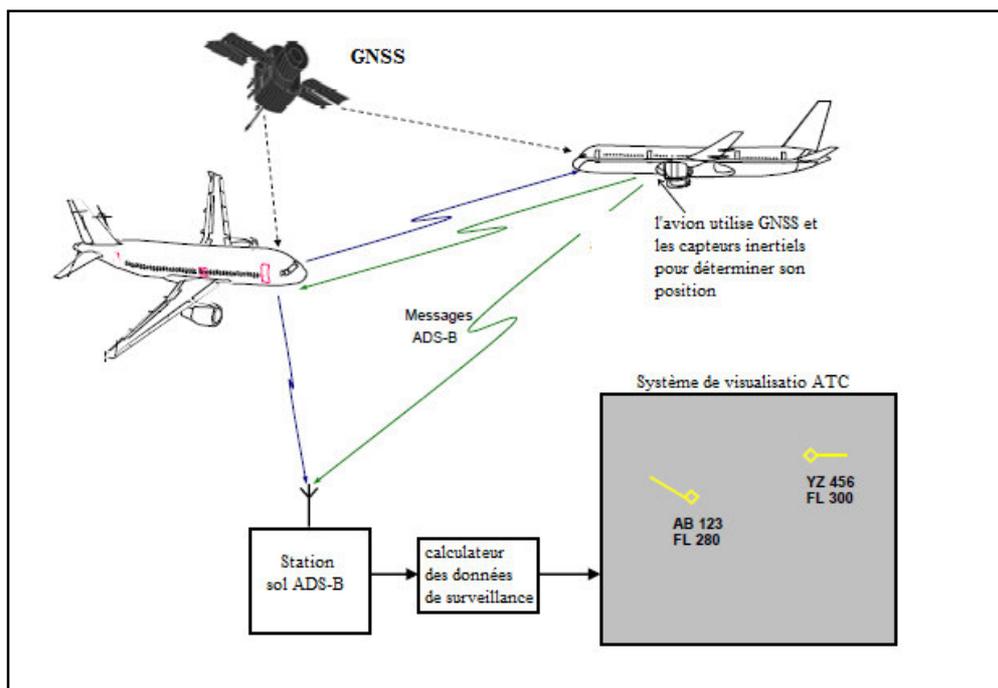


Figure 4.1 : Schéma de principe de fonctionnement de l'ADS-B [8].

4.2.2 Les applications de l'ADS-B

4.2.2.1 Le Concept ASAS

Le concept du Système d'Assistance de Séparation à bord (ASAS Airborne Separation Assistance System) consiste à déléguer à l'équipage une ou plusieurs tâches dévolues aux services de contrôle de la circulation aérienne, sous réserve de l'accord des deux parties.

Le PO-ASAS (Principe d'utilisation des Operations du Système d'Assistance de Séparation à bord) distingue, les applications ASAS, procédures opérationnelles applicables par les contrôleurs aériens et les pilotes, qui permettent d'atteindre les buts de l'utilisation des capacités du système ASAS. Et le système ASAS, qui permet aux équipages de maintenir la séparation par rapport à un ou plusieurs aéronefs et fournit des informations de trafic avoisinant.

Trois catégories d'ASAS sont définies :

- **Application ASAS basique** ou **ATSA** (airborne traffic situational awareness) qui vise à améliorer l'aide à l'acquisition visuelle du trafic avoisinant (en vol et au sol) et augmenter la qualité de gestion du vol (flight management). Il ne concerne pas le changement de responsabilité des séparations (ATC vers les pilotes).
- **Applications ASAS coopératives ("spacing" et "separation")**
 ASPA (airborne spacing), l'équipage doit être entraîné à maintenir une séparation par rapport à un aéronef donné, la séparation entre aéronefs reste toujours à la charge du contrôleur.
 ASEP (airborne separation), la responsabilité de séparation est partiellement déléguée à l'équipage, mais limitée à des aéronefs désignés. La délégation de responsabilité est spécifiée par une clairance précise, limitée dans les temps et dans l'espace. Pour ce type d'application, de nouvelles normes de séparations devront probablement être définies.
- **Application ASAS autonome ("self separation")** ou **AAUT** (airborne self separation), l'équipage doit assurer la séparation avec les aéronefs connus conformément aux minima applicables dans l'espace aérien dédié.

4.2.2.2 Le package one

Il est envisagé dans le Package one que l'ADS-B dans des zones considérées à faible et moyenne densité de trafic parviendra à atteindre le niveau de performance (précision, intégrité, le taux de mise à jour) de surveillance pour permettre la mise en place de minima de séparation opérationnelle ADS-B. Il est attendu qu'un tel système atteindra ces objectifs d'une manière optimale dès lors que les équipements nécessaires sont installés dans tous les aéronefs.

Les applications du package one ne modifient pas les rôles fondamentaux de chacun des contrôleurs ou des pilotes, mais elles permettent de fournir une meilleure qualité de service (séparations, informations).

Le package one comprend deux groupes d'applications de surveillance [1] :

4.2.2.2.1 Applications de surveillance au sol (GSA) cinq applications GSA ADS-B sont définies dans le Package one :

- ATC surveillance d'espace en route (ADS-B-ACC) : cette application a pour but de compléter la surveillance radar du trafic "en route". Pour permettre la couverture de toutes les zones considérées, cette application nécessite la mise en place d'un large réseau de stations ADS-B, son implémentation peut être envisagée en première phase dans des zones à faible densité de trafic.
- ATC surveillance des zones terminales (ADS-B-TMA) : cette application a pour but de compléter la surveillance radar du trafic en zone terminale, en particulier à basse altitude et proche des terrains tout comme les zones disposant d'une simple couverture radar.
- ATC surveillance des zones non-radar (ADS-B-NRA) : cette application a pour but la mise en place d'une surveillance ATC dans des zones non couvertes par des radars, comme certaines zones océaniques ou reculées par exemple le Sud algérien (Sahara).
- surveillance à la surface d'aéroport ADS-B-APT : cette application fournit une nouvelle source d'information de surveillance pour une gestion plus sûre et efficace des mouvements au sol dans les aéroports, avec ou sans SMGCS (Surface Movement Guidance Control System). Les véhicules équipés pourront être visualisés avec les aéronefs.
- Aircraft derived data for ATC tools (ADS-B-ADD): cette application fournit des données bord supplémentaire aux applications sol. Par exemple, pour développer ou améliorer des outils ATC comme les outils MTCD (Medium Term Conflict Detection), AMAN (Arrival MANager), DMAN (Departure MANager), et filets de sauvegarde.

Les applications CDM (collaborative Making Decision) bénéficient aussi de l'apport de cette application. Il faut noter que cette application ne fait qu'enrichir en données les différents outils cités. Une harmonisation entre les autres Data Link (exemple Mode S, ADS-C) est nécessaire pour faciliter l'intégration de ces fonctionnalités dans les avions.



Figure 4.2 : Application de surveillance ADS-B au sol.

4.2.2.2.2 Applications de surveillance à bord (ASA) : L'ASA représente l'ensemble des applications air-air définies comme suit :

➤ Appartenant à la première catégorie ATSA du PO-ASAS :

- Enhanced traffic situational awareness on the airport surface (ATSA-SURF) : cette application fournit au pilote une meilleure perception de la situation du trafic sur un aéroport, que ça soit sur les pistes ou les taxiways et à n'importe quelle condition météo.

Cette amélioration se fait par la mise en place d'un visu bord qui permettra au pilote de voir, non seulement les aéronefs, mais aussi, tous autres véhicules évoluant sur les aires de trafic ou de manœuvre. En plus de la visu du trafic, des fonctions d'alertes sont incluses pour avertir le pilote des situations de conflits potentiels, par exemple : l'avertir qu'une piste est déjà occupée (Voir Figure 4.2) ;

- Enhanced traffic situational awareness during flight operations (ATSA-AIRB) : cette application fournit au pilote une meilleure perception de la situation du trafic dans n'importe quelle condition de visibilité. Le trafic environnant est visualisé sur un display avec l'identification et la position de chaque aéronef équipé.

Afin de permettre aux pilotes de détecter des situations de conflit avec d'autres aéronefs, un supplément d'information de trafic peut être transmis au pilote par l'ATC (concept TIS-B : Traffic Information Service-Broadcast) au d'autres aéronefs.

En plus de la visualisation du trafic, des fonctions d'alertes sont incluses pour avertir le pilote des situations de conflits potentiels. Cependant la notion de conflit potentiel reste très subjective, dans le sens où elle dépend de la densité et la complexité de l'espace dans lequel évolue l'aéronef.

- Enhanced visual acquisition for see and avoid (ATSA-S&A): cette application est une aide au pilote pour exécuter la règle de l'air "voir et éviter" quand la séparation entre aéronefs n'est pas assurée par l'ATC (exemple : entre IFR et VFR en classe D, E, G).

L'objectif de cette application est bien sur l'augmentation de la sécurité. Le trafic environnant à une portée visuelle sera reporté sur un écran pour le pilote avec l'identification et la position de l'aéronef équipé. En plus de la visualisation du trafic, des fonctions d'alertes sont incluses pour avertir le pilote des situations de conflits potentiels.

- Enhanced successive visual approaches (ATSA-SVA): cette application est une aide au pilote pour effectuer des approches visuelles successives quand la responsabilité de maintien de la séparation visuelle avec l'aéronef qui le précède est transférée. Le but est d'effectuer des approches visuelles successives, régulières et sûres, particulièrement dans des zones denses. Le trafic environnant est visualisé sur un display avec l'identification et la position de l'aéronef équipé. D'autres paramètres spécifiques, particulièrement de l'aéronef précède en position d'approche, seront affichés au pilote tels que la vitesse et la distance séparant les deux aéronefs.

➤ Appartenant à la deuxième catégorie ASPA du PO-ASAS :

- Enhanced sequencing and merging operations (ASPA-S&M) : cette application est conçue pour un environnement radar des phases de vols croisière jusqu'à l'atterrissage. L'objectif de cette application est de redistribuer les tâches relatives au trafic entre les contrôleurs et les pilotes.

Les contrôleurs donnent de nouvelles instructions de contrôle (exemple a des pilotes afin d'établir et maintenir une séparation en distance ou en temps avec un aéronef désigné. Le pilote exécute cette instruction à l'aide des nouvelles fonctions bord mises à sa disposition telles que la visualisation de l'information de trafic, les dispositifs de maintien de séparation et d'alerte...

- In-trail procedure in oceanic airspace (ASPA-ITP): cette application est conçue pour les zones océaniques non couvertes par les radars où les aéronefs suivent de longues routes prédéfinies en croisière. L'objectif de cette application est d'améliorer l'utilisation des routes flexibles en zone océanique par l'optimisation des taux de changement de niveau de vol qui permettra aussi aux avions d'évoluer à leurs niveaux de vol optimaux pour économiser le carburant et éviter les zones de turbulence ou tout simplement en cas de changement de plan de vol.
- Enhanced crossing and passing operations (ASPA-C&P): cette application est conçue pour un environnement radar et concerne toutes les phases de vols. L'objectif de cette application est de permettre au contrôleur de donner de nouvelles instructions pour la résolution des conflits. Par exemple lors d'un croisement ou d'un dépassement, le pilote a pour instruction de maintenir une séparation donnée. Il exécute cette instruction à l'aide des nouvelles fonctions de bord mises à sa disposition telle que la visualisation de l'information de trafic, les dispositifs de maintien de séparation et d'alerte. Avec une telle application, les résolutions de conflits peuvent être anticipées ce qui permet par exemple d'augmenter la capacité d'un secteur.

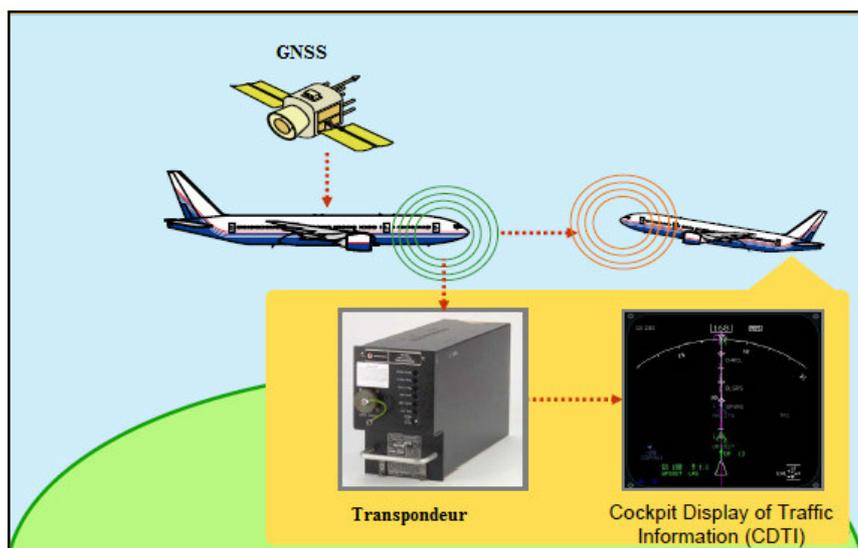


Figure 4.3 : Application de surveillance Air-Air (ASA).

4.3 La technique ADS-B

4.3.1 Fonctionnement

L'ADS-B est un système qui utilise les transmissions d'un avion pour fournir la position géographique, l'altitude pression, la précision de mesure de position, l'identité du vol, l'adresse de l'aéronef en 24 bits, l'accélération et autres données qui sont déterminées par l'équipement à bord. Typiquement, l'équipement de positionnement de l'aéronef est un récepteur GPS ; cet équipement doit fournir des informations liées aux erreurs de positionnement. Le capteur d'altitude est la même source barométrique (ordinateur de bord) utilisée pour le SSR. Le GPS intégré et le système inertiel sont aussi utilisés.

Un système ADS-B se compose, comme illustré dans la figure 4.4, des éléments suivants [18] :

- Un sous-système de transmission comprenant la fonction de génération (qui fusionne les données provenant des senseurs avion ou d'entrées pilote pour rédiger le message ADS-B) et la fonction de transmission de messages ;
- Un médium de diffusion par liaison de données ;
- Un sous-système de réception comprenant les fonctions de réception des messages et d'assemblage ou élaboration des rapports dans l'aéronef, le

véhicule ou le système terrestre qui synthétise les messages réceptionnés pour utilisation dans le cadre de diverses applications.

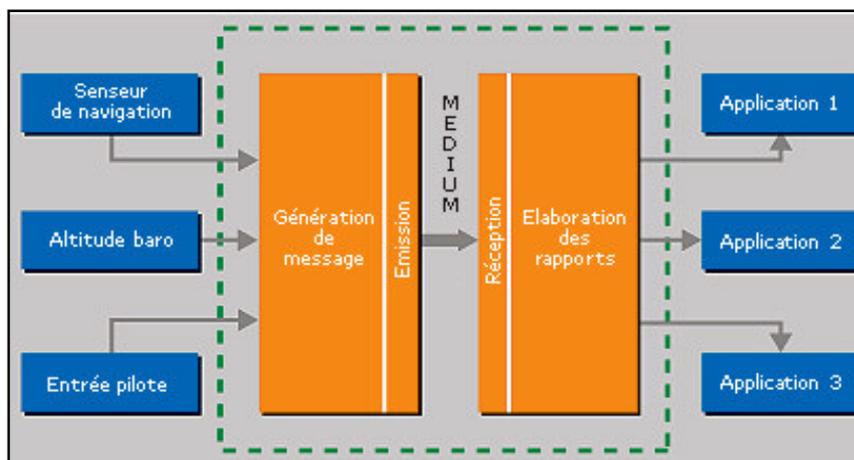


Figure 4.4 : Schéma du système ADS-B.

Un système sol ADS-B utilise une antenne fixe positionnée à une zone de couverture, pour recevoir des messages transmis par un avion ; une antenne unipolaire peut être utilisée. Il ne transmet pas nécessairement toutes les données. La station ADS-B sol de réception est la plus simple et la moins coûteuse.

4.3.2 Contenu du message ADS-B :

Il dépendra de différents paramètres tels que l'application pour laquelle il est utilisé, le média et donc la taille du message disponible.

- Adresse OACI 24 bits identifiant de façon unique l'émetteur ;
- Indicateur d'appel qui correspond à l'identifiant avion pour les besoins de communications vocales (il s'agit souvent du numéro de vol) ;
- Vecteur d'état incluant la position avion, sa vitesse et la qualité de ces données ;
- Statut (urgence/priorité) ;
- Intention (cela pourrait inclure le ou les prochains points où la trajectoire avion sera modifiée).

Certains de ces paramètres seront transmis systématiquement tandis que d'autres dépendront de l'application, de la situation de l'avion (urgence...), avec

des périodes de rafraîchissement en fonction de la phase de vol. Les périodes actuellement proposées sont:

- 10s pour les zones en route ;
- 5s pour les zones terminales ;
- 1s pour les opérations sur surface aéroportuaire (exigence OACI pour le SMGCS).

4.3.3 Architecture d'un système ADS-B :

L'architecture physique d'un système ADS-B peut se décomposer en trois segments [1] :

- Le segment bord ;
- Le médium de communication (Data Link) ;
- Le segment sol et/ou air.

4.3.3.1 Le Segment bord

L'ADS-B possède deux types d'architecture bord l'ADS-B "Full" et l'ADS-B "Out" représentés sur la figure 4.5. L'ADS-B "Out" inclus uniquement la transmission des données, prévue pour équiper en premier temps l'aviation générale. L'ADS-B "Full", en plus de la transmission, il inclue aussi une fonction réception des données. À long terme, il est destiné à équiper, au minimum, l'aviation commerciale.

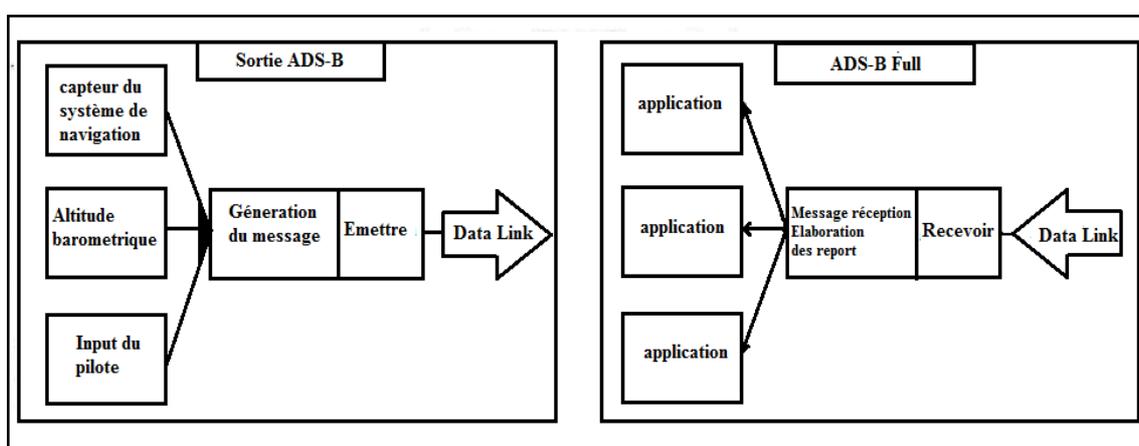


Figure 4.5: Architecture ADS-B bord.

L'architecture fonctionnelle "bord" de l'ADS-B comprend :

- Sources de données de l'avion (Aircraft Data Sources) : Elles fournissent les données de position et autres informations à inclure dans les rapports ADS-B à émettre. Elles alimentent également le CDTI (Cockpit Display of Traffic Information) qui est le système de visualisation des fonctions de surveillance propres à l'avion. Les sources peuvent être le GNSS, l'INS/IRS, VOR/DME, etc. ou bien le FMS qui calcule une position à partir des différents systèmes de navigation disponibles ;
- Emetteur/Récepteur de données (Transmit/Receive Data) : Il assure l'émission/réception des messages ADS-B vers/de la source ADS-B ou autres utilisateurs. L'adresse OACI 24 bits est programmée dans l'émetteur ADS-B ;
- Traitement de données de surveillance (Surveillance Data Processing) : Il traite toutes les données extraites des rapports ADS-B et produit la meilleure image de surveillance pour le CDTI ainsi que pour les autres fonctions d'utilisateurs. De même, il traite les données issues des autres sources telles que le TCAS de façon à assurer une présentation homogène au pilote entre les différents systèmes ;
- Le CDTI et les fonctions de surveillance : le CDTI est la fonction de visualisation de trafic environnant à partir des rapports ADS-B.

4.3.3.2 Les médias ADS-B

À ce jour, trois médias différents sont disponibles avec des différents degrés de standardisation et de validation :

- Le mode S Squitter long ou 1090 ES ;
- La VDL 4 "VHF Data Link Mode 4" ;
- L'Universal Access Transceiver ou UAT.

Seuls des résultats préliminaires ont été publiés qui permettent d'avoir une idée partielle des performances respectives de ces équipements. Cependant, il est impossible de dire lequel ou lesquels de ces médias seront retenus en tant que liaison de données pour l'ADS-B. Néanmoins, il apparaît qu'un équipement mixte

pourrait être nécessaire, pour des besoins d'interopérabilité, mais aussi pour assurer un niveau de sécurité compatible avec la criticité de l'application.

4.3.3.2.1 Principe de fonctionnement : [19]

- **Mode S 1090 ES** : Sa portée dans l'application Air-Sol est entre [100NM-120NM]. Ce mode induit une légère modification des transpondeurs actuels. Dans des zones à faible densité de trafic, la portée peut atteindre plus de 200 NM. Ce type de média est normalisé par l'OACI.

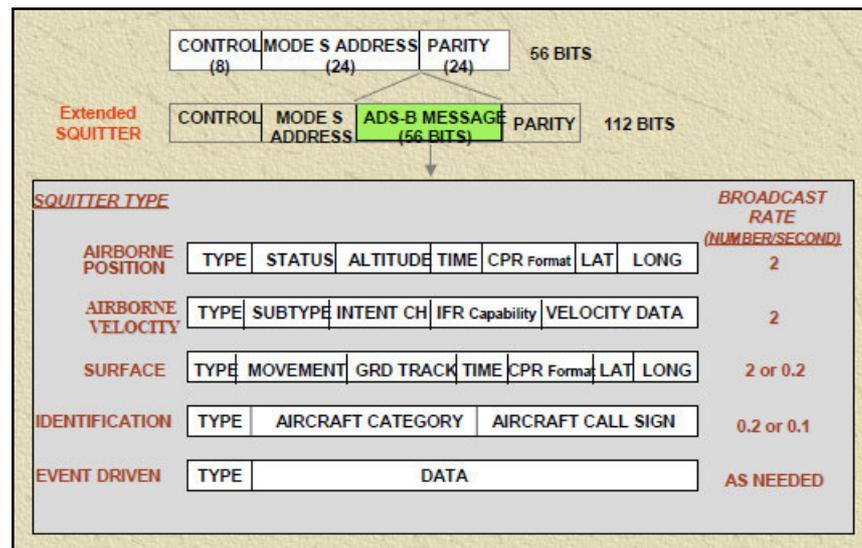


Figure 4.6: Format de données Mode S 1090 Extended Squitter.

- **La VDL mode 4** : C'est un système de communication en VHF, le principe consiste à diviser le temps de communication d'une fréquence en multitude de slots. Pour cela deux fréquences sont nécessaires. La portée varie entre [140NM-200NM]. Ce type de média est normalisé par l'OACI.

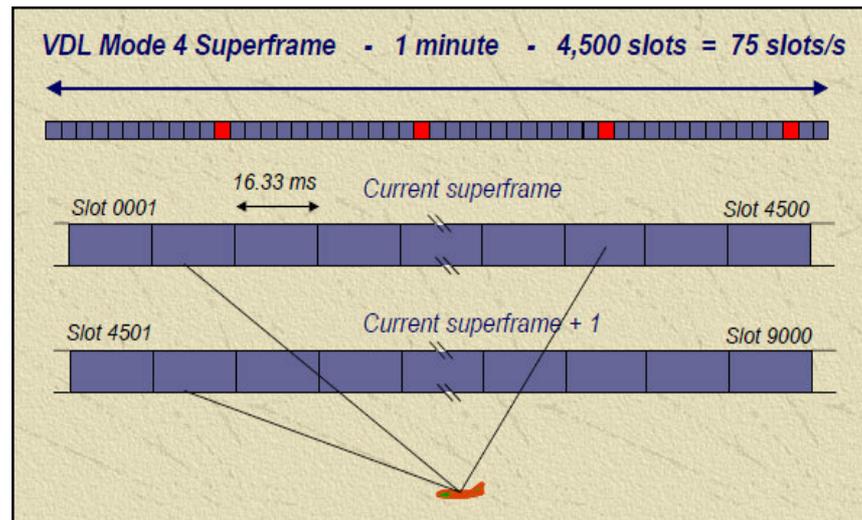


Figure 4.7 : Format de données VDL mode 4.

- **L'universal Access Transceiver (UAT)** : le principe est d'émettre chaque seconde une structure de données dont 20% est réservée à la gestion interne des stations sol. Le reste étant réservé à la transmission des messages ADS-B. Ce type de média n'est pas normalisé par l'OACI.

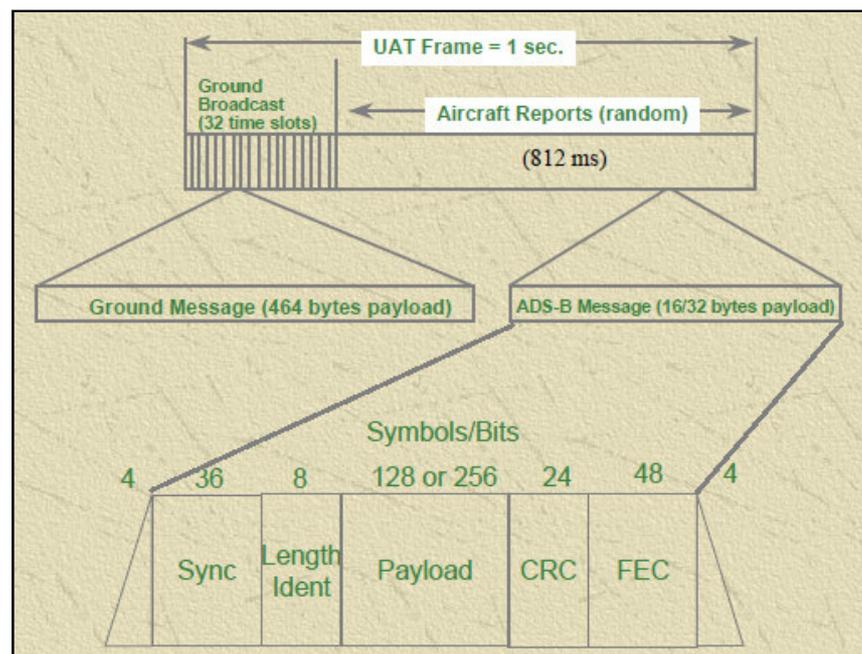


Figure 4.8 : Format de données du système UAT (Universal Access Transceiver).

4.3.3.2.2 Critères de choix :

Parmi les critères à considérer pour prendre une décision, on trouve en particulier:

Les performances de la liaison de donnée, qui déterminent sa capacité à participer aux diverses applications envisagées et son intégration dans les architectures sol et embarquées actuelles [19].

➤ **Performance** : Les trois liaisons de données sont actuellement comparées pour les paramètres suivants:

- La période de rafraîchissement des données qui doit être conforme, en fonction des phases de vol, aux données présentées précédemment ;
- La portée en terme de liaison air-air et air-sol ;
- La capacité est le nombre d'avions maximal pris en compte simultanément par la liaison de données ;
- L'intégrité des données transmises implique la capacité du système à transmettre le message ADS-B sans qu'une altération ne soit détectée ;
- La disponibilité de la liaison, sans qu'elle ne soit affectée par une panne.

➤ **Intégration dans l'architecture actuelle** : Afin de garantir une mise en place à court terme de certaines applications utilisant l'ADS-B, il est nécessaire que l'intégration des équipements et en particulier de la liaison de données soit la plus aisée possible, et nécessite le moins de modifications possibles des architectures sol et bord.

À ce niveau, il est indéniable que le mode S « Extended Squitter » a l'avantage. En effet, le mode S est d'ores et déjà en place et ne nécessite qu'une modification logicielle alors que pour les autres liaisons de données, des architectures spécifiques doivent être développées et de nouvelles antennes installées ce qui pourrait être une contrainte majeure pour des aéronefs de faibles dimensions.

L'attribution d'une nouvelle fréquence pour l'UAT, ou de plusieurs pour la VDL mode 4, dans des gammes déjà surchargées, constitue une contrainte supplémentaire. Une récente étude réalisée par Eurocontrol a démontré que pour la zone terminale de Francfort, sept fréquences seraient nécessaires pour la VDL

mode 4 et cinq pour la région terminale de Bruxelles. Mais le mode S présente aussi des contraintes. En particulier, cette liaison constitue un point commun entre les systèmes de surveillance sol, l'ADS-B ainsi que pour le filet de sauvegarde qui est l'ACAS. Toute panne de l'équipement pourrait avoir des conséquences graves sur les opérations des aéronefs.

4.3.3.3 Le segment sol

Il se décompose en une station sol ADS-B qui dépend de la technologie employée (1090 ES, VDL4, UAT).

La station sol remplit les fonctions récapitulées dans la figure 4.11 suivantes :

- Une fonction réception "Data Acquisition Unit / Ground", qui assure la réception des messages ADS-B transmis par les aéronefs ADS-B "Out".

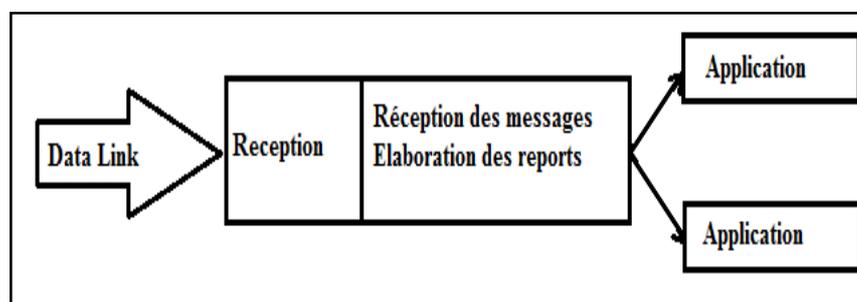


Figure 4.9 : Schéma de réception ADS-B.

- Une fonction transmission suivant le Data Link choisi qui transmet des informations diffusées vers les différents usagers équipés pour l'ADS-B (TIS-B)

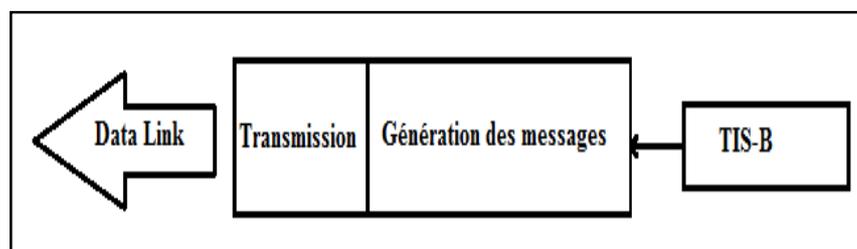


Figure 4.10 : Schéma de transmission TIS-B.

- Une fonction de tri qui permet de rejeter les messages ADS-B non valides avant de les encoder en reports ADS-B. Une fonction d'encodage, qui

permet d'élaborer des reports ADS-B à partir des messages ADS-B reçus et leur mise au format catégorie ASTERIX- 21.

- Un centre ATC qui intègre un processeur répartiteur des données de surveillance SDPD (Surveillance Data Processing and Distribution), qui assure le traitement des données de surveillance de différentes sources dans un environnement multi surveillance pouvant comprendre l'ADS, ainsi que des fonctions ATM (centre de contrôle).

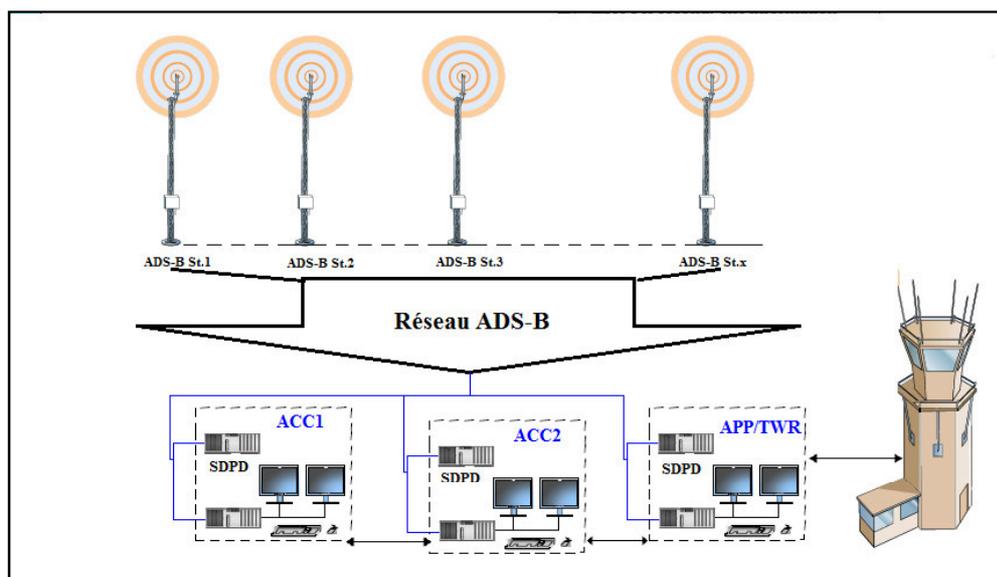


Figure 4.11 : Architecture sol d'un système ADS-B.

4. 4 L'adoption de l'ADS-B dans le monde

À nos jours, L'ADS-B est certifiée par la majorité des organisations de navigation aérienne, les plus importantes sont :

L'OACI : La 11ème Conférence sur la Navigation Aérienne, qui s'est tenue à Montréal, en Septembre 2003 a reconnu l'ADS-B comme une application de liaison de données air-sol.

L'EUROCAE : Elle est l'organisation qui publie les standards techniques pour l'avionique incluant les fonctionnalités et les tests. Concernant l'ADS-B EUROCAE a publié les documents suivants :

- ED73A Mode S MOPS (spécification de performances minimales) qui inclue les messages ADS-B 1090 ES ;

- ED102 ADS-B pour le 1090 Mhz;
- ED-108 MOPS provisoire, pour la partie transmission ADS-B bord de la VDL 4.

L'ADS-B a prend une position importante par rapport aux autres moyens de surveillance, alors des différents pays ont décidés de l'adopter, comme :

Australie : Airservices Australia s'est lancée dans la mise en service opérationnelle de l'ADS-B basée sur Mode S Extended Squitter. Cela a débouché sur une couverture ADS-B de tout l'espace aérien d'Australie en 2005 à partir de 28 sites à travers le pays [20], comme illustré dans la figure 4.12. Vingt (20) stations additionnelles sont lancées en 2007, ce qui a permis de réduire la séparation à 5 NM [21].

Les services de la navigation attendent des économies significatives lorsque l'utilisation de l'ADS-B atteindra le point où son réseau SSR pourra être retiré en toute sécurité [22].

USA : En annonçant en 2006 son programme ADS-B, la Federal Aviation Administration (FAA) des États-Unis, a souligné que cela permettrait en définitive de retirer du service une grande partie du réseau radar secondaire de surveillance (SSR) du pays, ce qui économiserait 1 milliard de dollars [22].

Jusqu'à 2010, il est installé près de 500 stations ADS-B dans différentes régions dans le pays. À 2013, plus de 1500 stations sur 796 cites sont réalisées [21]. La figure 4.12 représente aussi la couverture assurée par les stations ADS-B du programme américain.

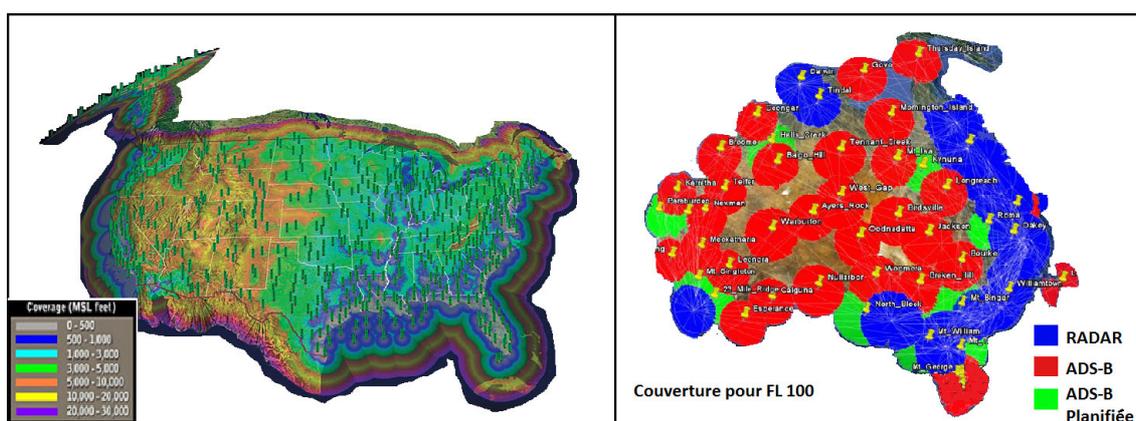


Figure 4.12 : Couverture actuelle par l'ADS-B de l'USA et l'Australie.

Japon : un groupe de travail a été mis en place en 2000, pour mener une étude sur l'implémentation de l'ADS-B au Japon ("ADS-B Work Group in Japan"). En 2001, l'ADS-B WG a mis en place une stratégie de développement et d'évaluation de l'ADS-B 1090 ES.

France : l'ADS-B et la multilatération sont en fonctionnement dans plusieurs aéroport dans la France (Paris CDG et ORLY en 2006, Lyon en 2007, Toulouse en 2008, Marseille en 2009, Ajaccio en 2010...) [21].

4. 5 Conclusion

Le radar ne constitue plus aujourd'hui la seule technologie capable d'assurer la surveillance du trafic aérien. L'avènement des systèmes satellitaires et des liaisons de données air-sol a fait émerger d'autres technique : comme l'ADS-B, objet de nombreuses recherches et expérimentations depuis une quinzaine d'années.

A moyen et long terme, le système de contrôle du trafic aérien peut évoluer vers plus d'intégration des diverses sources de données dans les équipements de traitement au sol et également vers une délégation de certaines fonctionnalités, comme la séparation, aux pilotes.

A l'évidence, le radar va perdre son monopole, alors l'ADS-B est sans conteste le moyen qui sera développé et étendu.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE L'ADS-B EN ALGÉRIE ET SIMULATION DE SA COUVERTURE ENVISAGÉE

5.1 Introduction

Au niveau régional, nous noterons l'intérêt grandissant de l'Afrique du Sud et de la Namibie pour l'ADS-B. L'ampleur du projet australien et américain ainsi que la normalisation de cette technique ont influé certainement sur les décisions de plusieurs pays africains désireux de se doter d'un moyen de surveillance alternatif au radar.

Par ailleurs, on trouve dans chacun des principaux regroupements africains chargés du développement de l'aviation civile, des programmes d'implémentation de l'ADS/CPDLC¹.

Au vu de l'ampleur du déploiement de l'ADS-C (Surveillance Dépendante Automatique – Contrat) en Afrique pour l'Algérie par exemple, une approche peut être envisagée dès à présent afin de prévoir l'implémentation des fonctionnalités liées à l'ADS-B par une mise à niveau des systèmes de contrôle de trafic aérien automatisés déjà mis en place.

5.2 L'implémentation de l'ABS-B en Algérie

En Algérie l'espace aérien Nord est bien couvert par le radar, à l'exception d'une zone à l'ouest de Constantine dans laquelle, les techniques de contrôle procédural sont utilisées.

L'ENNA s'est engagé à fournir à court terme des services de contrôle dans l'espace aérien Sud, où un nombre significatif d'opérations aériennes soutiennent les activités pétrolières dans la zone au sud de Ghardaïa, en particulier à Hassi Messaoud et ses alentours. Il est attendu aussi qu'un nouveau CCR à Tamanrasset voie le jour et que les voyages touristiques vers les parcs naturels autour de Tamanrasset continuent à se développer.

¹ Rapport de la 3^{ème} réunion OACI du CNS/ATM/IC/SG/3 AFI à Nairobi, 27-30 March 2001.

Une première utilisation de l'ADS-B peut être envisagée au sud de la FIR Algérie. Cette FIR est caractérisée par une densité de trafic moyenne (Sud/Est) et constitue une bonne alternative de radar secondaire.

Des études montrent qu'une économie de plus de 60 millions de Dollars peut être dégagée par la solution ADS-B 1090 ES sur une période de 20 ans (durée de vie d'une station radar). Une couverture totale de la FIR par ADS-B au lieu de radar secondaire peut générer des économies appréciables au pays et à l'établissement à long terme [23].

5.2.1 Les applications ADS-B proposées

Dans ce qui suit, nous correspondrons à chacun des besoins de surveillance en route (précités dans le premier chapitre), l'application ADS-B susceptible d'y répondre:

- Pour le complément de la couverture Sud-Centre et Sud-Est, l'ADS-B/NRA est envisagé ;
- La limitation de la couverture en-dessous du niveau de vol FL 100 dans la région de Boussaâda nécessite de rajouter des stations supplémentaires en utilisant l'application ADS-B/NRA ;
- La couverture des principaux axes Nord-Sud par l'ADS-B/NRA ;
- Doubler les couvertures radars par l'ADS-B/ACC ;
- Pour la gestion de la TMA Alger et éventuellement les TMA Est et Ouest, si la densité du trafic le justifie l'ADS-B/TMA ;
- La surveillance de la zone d'approche de Hassi Messaoud, d'Oran et de Constantine peut être prise en charge par l'application d'une solution mixte MLAT et ADS-B/TMA ;
- L'ADS-B/ADD permet d'améliorer d'une manière générale les fonctions ATC sol, en particulier les outils d'alerte et de surveillance comme le STCA.

5.2.2 Architecture ADS-B proposée

Les applications ADS-B/NRA, ADS-B/ACC et ADS-B/TMA font partie de l'ensemble des applications « Ground Surveillance » du package one. Leurs mises en œuvre nécessitent le déploiement au sol d'un ensemble de stations de

réception des messages ADS-B transmis par les avions équipés. La couverture est déterminée par la localisation des sites récepteurs ADS-B au sol. Leur co-implantation proposée avec voix et données au niveau des installations de CNS fournit une couverture au-dessus de l'espace aérien de toute la FIR Algérienne.

Dans le chapitre précédent nous avons présenté les avantages et inconvénients de chaque médium de communication air/sol actuellement disponible pour l'ADS-B. Pour la suite de notre étude, nous retiendrons un seul type comme hypothèse de travail.

5.2.2.1 Le média de communication proposé :

La mise en œuvre de l'ADS-B nécessite le choix du type de liaison de données air/sol (VDL4, 1090 ES et UAT). Il convient pour l'Algérie de choisir un moyen qui permet l'interopérabilité entre États Africains et également aux niveaux internationaux.

Pour le choix du média de communication, nous devons prendre en compte certains critères, à savoir :

- Les standards internationaux requis (ICAO, RTCA, AEEC, etc...) ;
- L'allocation des fréquences ;
- Disponibilité de l'équipement ;
- Capacité de l'équipement (nombre d'avions) ;
- Couverture ; Précision et intégrité ;
- Situation internationale et en particulier les pays voisins ;
- Stratégies des principaux acteurs liés au domaine de l'aérien.

En effet, la communauté internationale de l'aviation civile a décidé depuis 2003 (11^{ème} conférence de la navigation aérienne) de prendre en compte, à court terme, le Squitter long Mode S 1090 pour l'introduction de l'ADS-B au niveau national et régional. Le choix peut pencher plus en faveur du "1090 ES" pour les raisons suivantes :

- Airbus a formulé son intention d'équiper de tous ces nouveaux avions de transport avec des transpondeurs qui répondent au standard "1090 ES";

- La NASA, FAA et le département de transport américain conduisent des essais de Mode S 1090 ES dans le Golf du Mexique ;
- UPS, transporteur de fret américain a installé des équipements ADS-B "1090 ES" pour ses 107 Boeing 757 et 767 ;
- Plusieurs équipementiers en avionique disposent des produits conformes au standard "1090 ES" pour les avions de transport, business jet et aviation générale;
- Sensis Corporation, fournisseur des infrastructures sol pour les essais Australiens a fourni plus de 150 stations sol pouvant traiter les messages ADS-B "1090 ES".

Le 1090 ES opère sur la fréquence 1090 MHz qui est déjà utilisé pour la surveillance radar secondaire. Concernant l'actuel média de communication déjà installé dans les avions pour l'ACAS/TCAS, il semble que le Mode S squitter long est le plus adapté pour les besoins de surveillance air/sol.

Les coûts d'upgrade bord resteront à court et à moyen terme acceptables, car les changements concernent essentiellement le transpondeur et sa connexion au système de navigation de bord. Cependant, les avions d'anciennes générations doivent probablement remplacer leurs transpondeurs et leurs systèmes de navigation.

Tous les facteurs cités ci-dessus favorisent le médium «1090 MHz Extended Squitter». Nous garderons donc ce dernier comme hypothèse de travail pour la suite de l'étude.

5.2.2.2 Les sites proposés :

Dix neuf (19) stations seront nécessaires pour répondre aux besoins de surveillances.

Le choix des sites est motivé en majorité par le fait, qu'il s'agisse d'aérodromes ou de sites déjà occupés par des moyens radionavigations. Les avantages de ces sites sont :

- Sites déjà exploités et sécurisés, donc accessibles pour les besoins de maintenance ;
- Présence d'énergie ;

- Existence de réseau de communication pouvant être utilisé pour les besoins des stations ADS-B.

Étant donné que nous avons pris comme hypothèse d'étude l'utilisation du médium 1090 ES, nous nous baserons pour déterminer le nombre de stations à implémentées, sur un rayon théorique de couverture égal à 200 NM.

Ces stations viendront renforcer la couverture de surveillance aérienne des cinq radars déjà existants et implantés dans cinq wilayas du pays à savoir : Alger, Annaba, Oran, El Oued et El-Bayadh, notamment dans le sud du pays, à cause des insuffisances constatées. Pour assurer une sécurité absolue du trafic aérien, il est nécessaire de déployer les stations suivantes :

- Quatre stations au niveau des aérodromes de Boussaâda, Tiaret, El Goléa et Ghardaïa pour combler le manque de couverture du secteur Sud/Centre. La transmission de données peut se faire par des liaisons en fibre optique entre les stations ADS-B et le CCR Alger, pour Boussaâda une liaison FH sera probablement nécessaire au cas où le site choisi serait localisé sur une montagne ;
- Une station ADS-B à Tamanrasset suite à l'ouverture de l'aérodrome mixte (civil et militaire) en 2012 et le début de l'installation d'un nouveau CCR ;
- La couverture de la partie sud formée du flux croissant du trafic aérien passant par Djanet par quatre stations supplémentaires situées sur le site de Bordj Omar Driss et sur les aérodromes de : In Salah, Illizi et Djanet. La transmission de données pourra se faire via VSAT entre les stations ADS-B et le CCR ;
- Pour couvrir les principaux axes Nord-Sud et particulièrement une région d'ombre à l'extrême Sud/Ouest du pays ; trois stations supplémentaires seront nécessaires à : Adrar, Bordj Badji Mokhtar et Chenachen. Ces stations devront être autonomes, car elles seront implémentées dans des zones désertes et difficilement accessibles. Les transmissions de données se feront probablement via VSAT vu l'éloignement de ces dernières ;
- Prévoir une station à Alger qui servira de back up pour le radar d'Alger, sachant que la TMA Centre constitue le secteur le plus dense en terme de trafic en Algérie (Voir paragraphe 1.3.1.1.B) ;

- Doubler voir remplacer les radars en fin de vie par l'ADS-B, pour cela, quatre autres stations devront être déployées, ce qui va permettre d'avoir une surveillance multiple (radars et ADS-B). La transmission de données pourra se faire par une liaison en fibre optique entre les stations ADS-B et le CCR Alger, cette liaison est déjà disponible ;
- Pour renforcer la couverture de l'aérodrome de Constantine et la zone pétrolière de Hassi Messaoud, nous proposons deux nouvelles stations ADS-B afin d'avoir une surveillance mixte de l'approche par ADS-B et multilatération. La transmission de données pourra se faire par une liaison en fibre optique entre la station ADS-B et les aéroports avec des interconnexions aux CCR de manière à ce qu'ils puissent également être utilisés dans les opérations en route.

Les sites choisis doivent être vérifiés d'un point de vue couverture radioélectrique des stations ADS-B afin d'optimiser le nombre de ces stations.

Le tableau 5.1 ci-dessous présente les coordonnées des emplacements futurs des nouvelles stations ADS-B.

Tableau 5.1 : Emplacement de l'ADS-B.

	Type d'ADS-B	Site	Coordonnée
FIR Nord	Mixte MLAT/ADS-B	Alger	36°40'37"N 003°10'50"E
	ADS-B	Annaba	36°54'43.40"N007°41'07.10"E
	Mixte MLAT/ADS-B	Oran	35°41'46.88"N000°46'16.20"W
	ADS-B	El Oued	33°31'03.99"N 006°45'52.16"E
	ADS-B	El Bayadh	33°37'37.36"N001°03'51.20"E
	Mixte MLAT/ADS-B	Constantine	36°17'07"N 006°37'09"E
	ADS-B	Boussaâda	35°19'53"N 004°12'16"E
	ADS-B	Tiaret	35°20'29"N 001°28'01"E
	ADS-B	El Goléa	30°34'08"N 002°51'53"E
	ADS-B	Ghardaïa	32°22'54"N 003°47'58"E
FIR Sud	Mixte MLAT/ADS-B	Hassi Messaoud	31°40'26"N006°08'26"E
	ADS-B	Bordj Omar Driss	28°07'59"N 006°50'21"E
	ADS-B	Illizi	26°43'25"N 008°37'04"E
	ADS-B	Djanet	24°17'35"N 009°27'07"E
	ADS-B	Adrar	27°50'21"N 000°11'07"E
	ADS-B	In Salah	27°15'13"N 002°30'39"E
	ADS-B	Chenachene	26°00' 00" N 004°15' 00" W
	ADS-B	Tamanrasset	22°48' 40" N 005°27' 03" E
ADS-B	Borjd Badj Mokhtar	21°22'30"N 000°55'26"E	

5.2.2.3 La configuration ADS-B :

Un système ADS-B basé sur une configuration "air/sol" semble être le plus adapté pour une implémentation initiale en Algérie. Une configuration "air/sol" signifie que les messages transmis par les aéronefs nécessitant uniquement la partie transmission. Ils seront reçus et traités principalement par les stations sol.

L'architecture peut être représentée comme suit :

5.2.2.3.1 La station sol :

La station à installer dans chaque site sélectionné nécessite :

- Une antenne sol : L'antenne de bande L dédiée à la fréquence 1090 MHz. Les systèmes d'antenne disponible avec le système ADS-B sont directionnels et omnidirectionnels. Elle doit avoir un gain très important pour l'utilisation de la surveillance en route ainsi que pour les services data link (liaisons de données). L'antenne doit être implantée près du shelter afin que les pertes dues aux longueurs des câbles soient réduites ;
- Un récepteur 1090 ES : Le récepteur est conçu pour garantir des performances en utilisant plusieurs filtres. Les informations sont transmises à travers des câbles coaxiaux. Le signal est alors traité (abaissé et converti) par une fréquence intermédiaire "IF" commune. Le récepteur peut être installé à l'intérieur ou à l'extérieur d'un shelter ;
- Une unité de traitement de message (MPU) : Le MPU exécute le traitement des données ADS-B venues du récepteur. Les données sont alors transmises au système de visualisation local de la situation aérienne "Site Monitoring Display" et aux centres ATC utilisateurs ;
- Un groupe électrogène et/ou onduleur à grande stabilité (Énergie) : Une station ADS-B 1090 ES requiert peu de puissance, moins de 1500 Watts. L'alimentation devra être secourue par la mise en place selon le type d'alimentation, d'un groupe électrogène et/ou un onduleur "Uninterrupted Power System" (UPS);
- Un moyen de communication vers les centres de contrôle en route et/ou d'approche : Le but du système de communication est de transmettre les informations entre les stations sol éloignées et les systèmes de traitement et de visualisation. Cette communication peut être réalisée par différents moyens, tout dépend des applications opérationnelles et des performances requises. Les techniques suivantes peuvent être utilisées : lignes spécialisées ; lignes téléphoniques conventionnelles (fibre optique) ; faisceau Hertzien ou Satellite (VSAT) ;
- Un récepteur GPS (pour le temps) ;

- Un système de visualisation local de la situation aérienne : Le "Ground Site Monitoring Display" est l'écran sur lequel sont visionnés les degrés de performance de la station sol pour les besoins de la maintenance technique et la situation du trafic ;
- Un système local de supervision technique.

5.2.2.3.2 Le Centre de contrôle, position future :

La mise en œuvre du plan de surveillance proposé a un impact important sur les systèmes de traitement et de visualisation du ou des centres ATC qui seront amenés à exploiter les données ADS-B mode S et SSR. Nous avons identifié les impacts suivants :

- Ajout d'une ou plusieurs interfaces de communication ;
- Traitement de plot ADS-B et SSR : création de piste, poursuite, corrélation des pistes avec les plans de vol, éventuellement fusion avec les pistes ADS-B et radars ;
- Visualisation des pistes;
- Mise à niveau des fonctions de surveillance et d'alerte STCA, MSAW, RAM et CLAM pour tirer profit des reports ADS-B et données SSR ;
- Les systèmes d'enregistrement légal "Data Recorder" devront également être mis à niveau pour permettre l'enregistrement de toutes les données ;
- Un système de supervision technique spécialisée.

Les impacts seront plus particulièrement localisés sur les fonctions suivantes de l'Eurocat X du centre ACC d' Alger :

- Surveillance Data Processing (SDP) : Le SDP est un processeur centralisé pour l'intégration des informations parvenant des différents moyens de surveillance (radars et ADS-B). Sa fonction est d'effectuer les différents contrôles d'intégrité du récepteur de données et de calculer le nombre d'alerte de sécurité détecté sur des pistes ADS-B. L'autre fonction est semblable que celle du RDPS (Radar Data Processing System), le SDP est capable de corréler l'information du Flight Plan Data avec celle de la Surveillance Information Processing

Unit (SDPU) pour estimer la prochaine position possible associée à un avion.

La corrélation entre la surveillance en route et les données "plan de vol" seront utilisées pour la présentation de l'indicatif de l'avion sur ses positions spécifiques. L'indicatif d'appel ainsi que n'importe quelle autre donnée prédéfinie sera annexée aux données route pour les inclure sur l'étiquette avion affichée sur le display.

- Air Traffic Situation Display (ATSD): L'ATSD est la fonction qui fournit une visualisation automatique et continue du trafic environnant provenant de toutes les sources disponibles (le plan de vol, les reports des pilotes, ADS-B et radars).

La figure ci-après résume l'architecture d'un centre ATC :

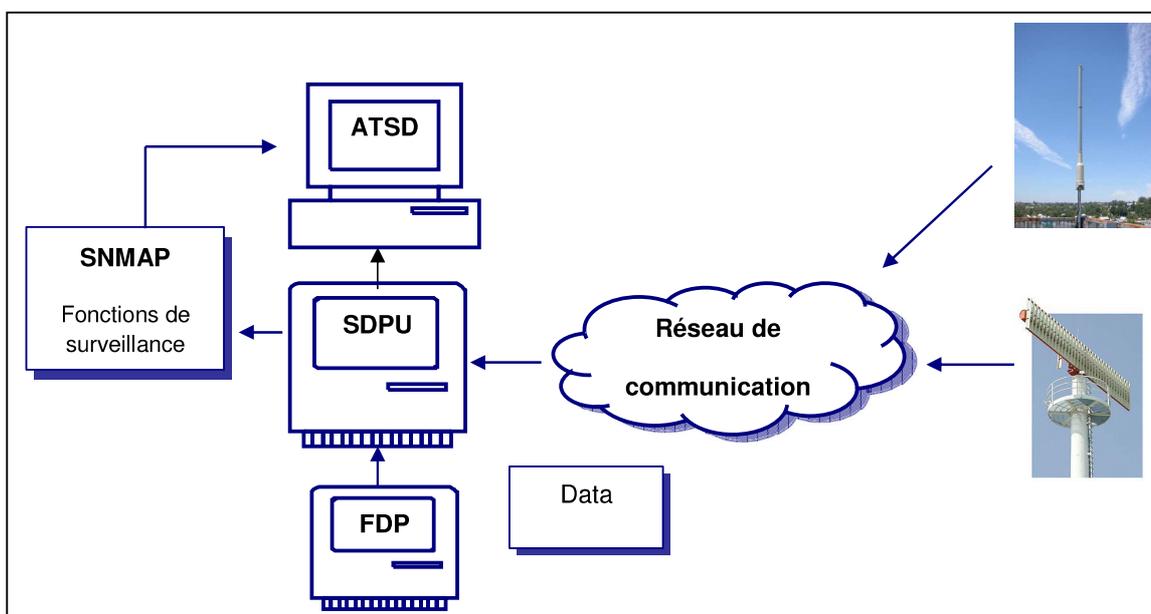
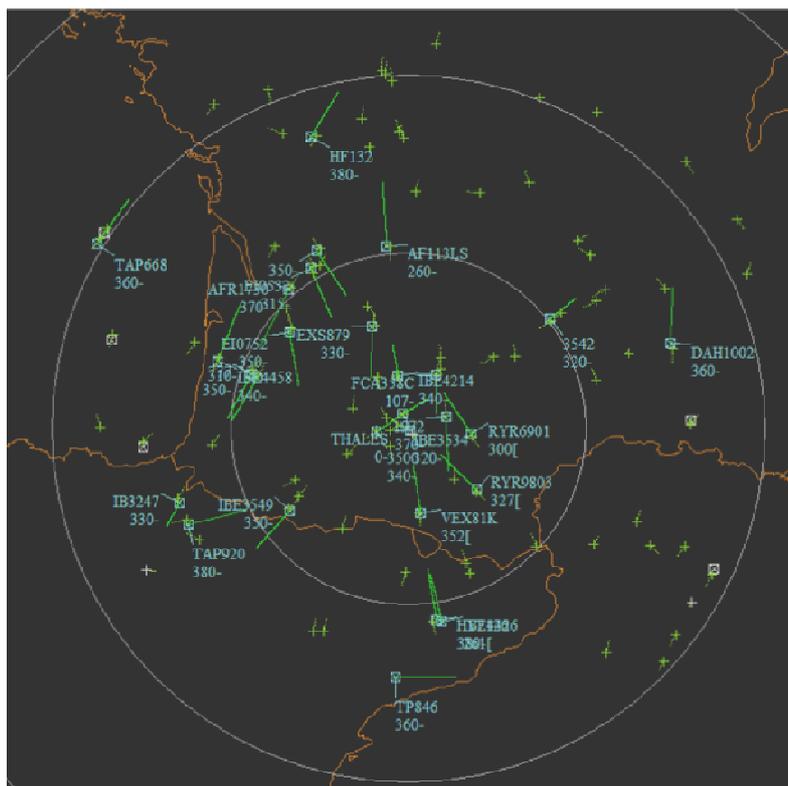


Figure 5.1 : Architecture centre ATC.

Voici un exemple de ce que l'on peut observer sur une position de contrôle dans un environnement multi-surveillance :



Plots verts : radar secondaire



Étiquettes bleues : avions ADS-B

Figure 5.2 : Situation aérienne autour de Toulouse. [24]

5.3 Simulation de la couverture attendue

Dans cette section, nous présenterons un outil permettant de simuler et d'évaluer la couverture des nouveaux moyens de surveillance en route. Son principe consiste à tracer pour chaque station (Radar et ADS-B) figurant sur la carte, la zone de détection concernée sur la base de ces performances techniques.

5.3.1 Objectifs de la simulation des couvertures

Le travail présenté traite des besoins de la surveillance du trafic aérien en Algérie pour une meilleure intégration du concept CNS/ATM. L'idéal est d'arriver à une couverture totale de l'espace aérien algérien. Pour cela, une simulation de couverture réelle, par Global Mapper (version 13) en tenant compte du relief a été réalisée.

Le résultat attendu de notre simulation doit montrer que les sites choisis sont les plus adéquats pour combler le trou de couverture radar actuelle dans le

Nord algérien d'une part et la prise en charge des principaux flux de trafic, d' autre part.

5.3.2 Hypothèse du travail :

5.3.2.1 Les coordonnées des sites proposés : sont les coordonnées géographiques des aérodromes sauf pour le cas :

- Sites envisagés pour le remplacement des radars existants (Alger, Annaba, Oran, El Oued et El Bayadh), où l'emplacement sera le même ;
- Site de Bordj Omar Driss dont des coordonnées correspondent à ceux d'aide radionavigation VOR/DME BOD ;
- Site Chenachene, repéré à l'aide du Google Earth.

5.3.2.2 L'élévation des antennes radars : pour la simulation selon les recommandations OACI est de 30 m du sol [25]. Pour les antennes ADS-B, une hypothèse l'élévation de 20 m est prise.

5.3.2.3 La portée maximale pour :

- PSR est de 80 NM ;
- SSR est de 250 NM ;
- ADS-B est de 200NM.

5.3.3 La réalisation de la simulation

La simulation est projetée sur la carte de l'Algérie qui a été réalisée avec une grande précision, au niveau de l'Institut National de Cartographie (INC).

La démarche de notre travail est la suivante :

5.3.3.1 Simulation de la situation actuelle :

Pour l'élaboration des couvertures radars du Nord Algérien à l'aide du logiciel Global Mapper, il faut :

- Ouvrir la carte topographique de la région Afrique Ouest pour importer la carte de l'Algérie et injecter la carte de la FIR Alger, les secteurs et les routes aériennes. La grille d'altitude est intégrée pour chaque point de région considérée, ses coordonnées (en WGS 84) ainsi son élévation (en mètres) sont indiquées en bas de la fenêtre ;

- On introduit les propriétés des cinq radars secondaires actuels à simuler, tel que : le nom de la station en question, la position (Voir le tableau 1.7) et les caractéristiques techniques de l'antenne, puis on choisit ses propriétés par exemple : la couleur, le fond et le symbole, comme illustré dans les figures 5.3 et 5.4 ci-dessous;

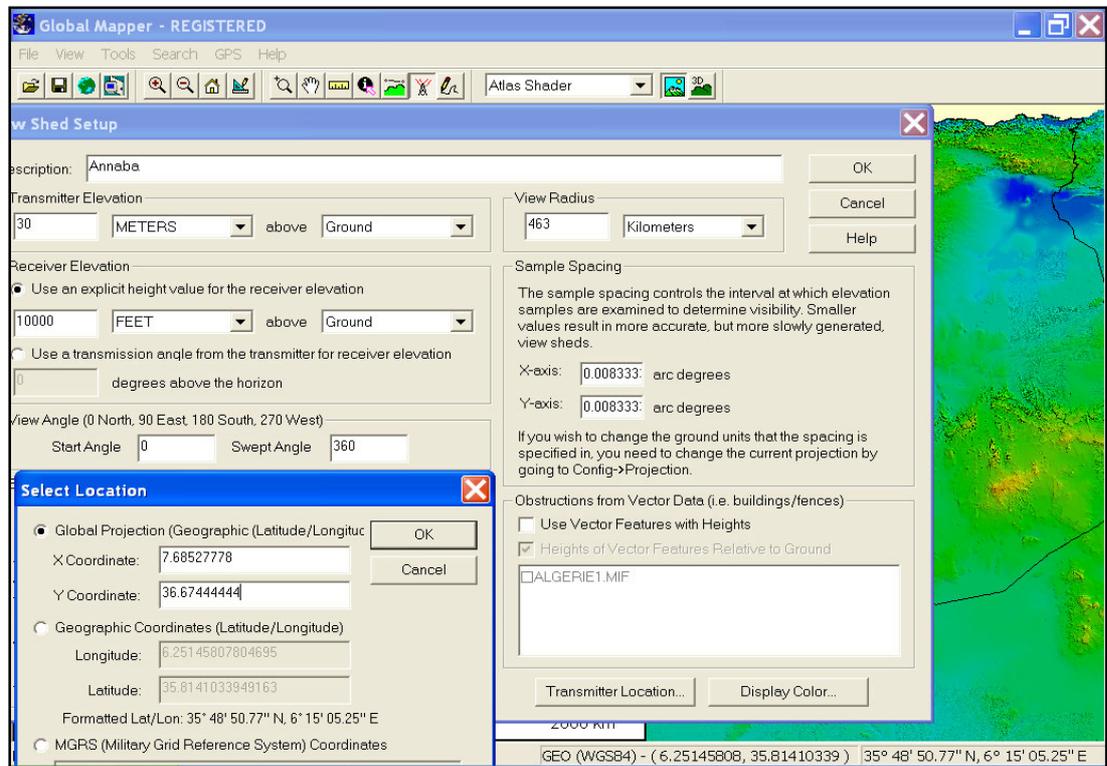


Figure 5.3 : Exemple d'insertion de la station radar d'Annaba.

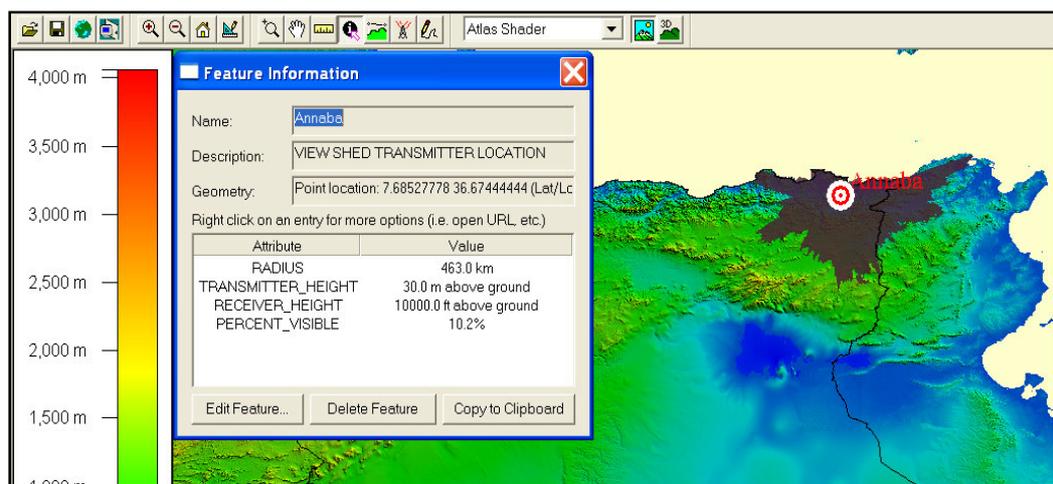


Figure 5.4 : Exemple de traçage de la couverture radar d'Annaba FL100.

La couverture actuelle assurée par les radars existants est montrée dans la figure 5.5.

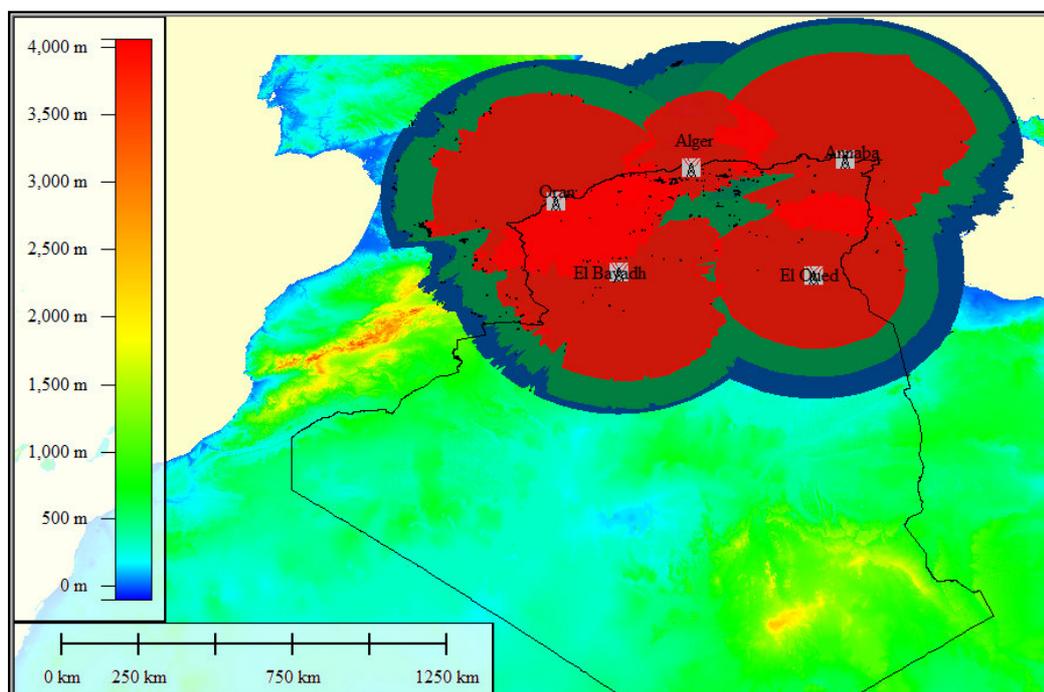


Figure 5.5 : Simulation de la couverture radars actuels.

Commentaires :

On remarque dans cette simulation que les radars existants assurent une couverture simple totale de l'espace aérien du Nord au-dessus de 20.000 pieds, avec une double couverture fournie dans environ la moitié de cette zone.

Tandis qu'à 10.000 pieds un trou notable dans la couverture simple est remarqué à l'ouest de Constantine et au-dessus de la région de Boussaâda, à cause des reliefs qui obstruent la couverture des radars de Bouzaréa et de Annaba (La figure 5.6 montre ce manque de couverture). Aucune couverture n'est fournie dans l'espace aérien du Sud.

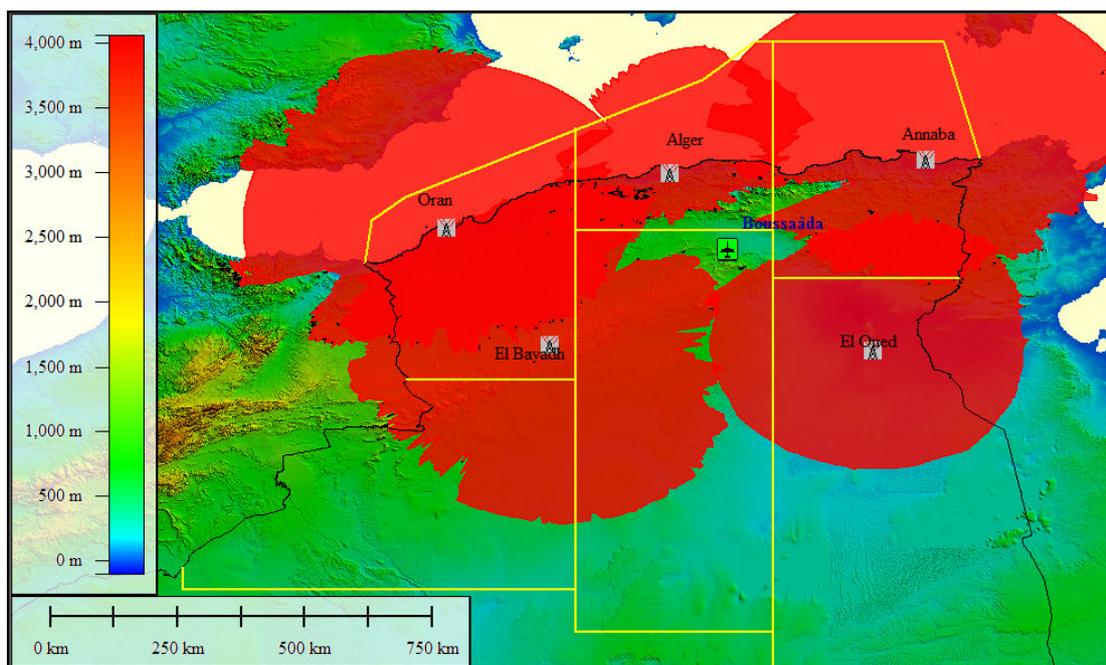


Figure 5.6 : La non-couverture de Boussaâda FL100.

5.3.3.2 Simulation de la situation proposée :

Une fois l'étape de la mise en œuvre de la couverture radars actuels est terminée. On aborde l'étape du traçage de la couverture des stations ADS-B proposées, en suivant les mêmes étapes. Par ordre de priorité décroissant, il est proposé en premier lieu, de combler le manque de couverture du secteur Sud/Centre par des stations au niveau de : Boussaâda, Tiaret, El Goléa et Ghardaïa. La simulation qui vient par la suite (Figure 5.7) justifiera le choix de ces implémentations.

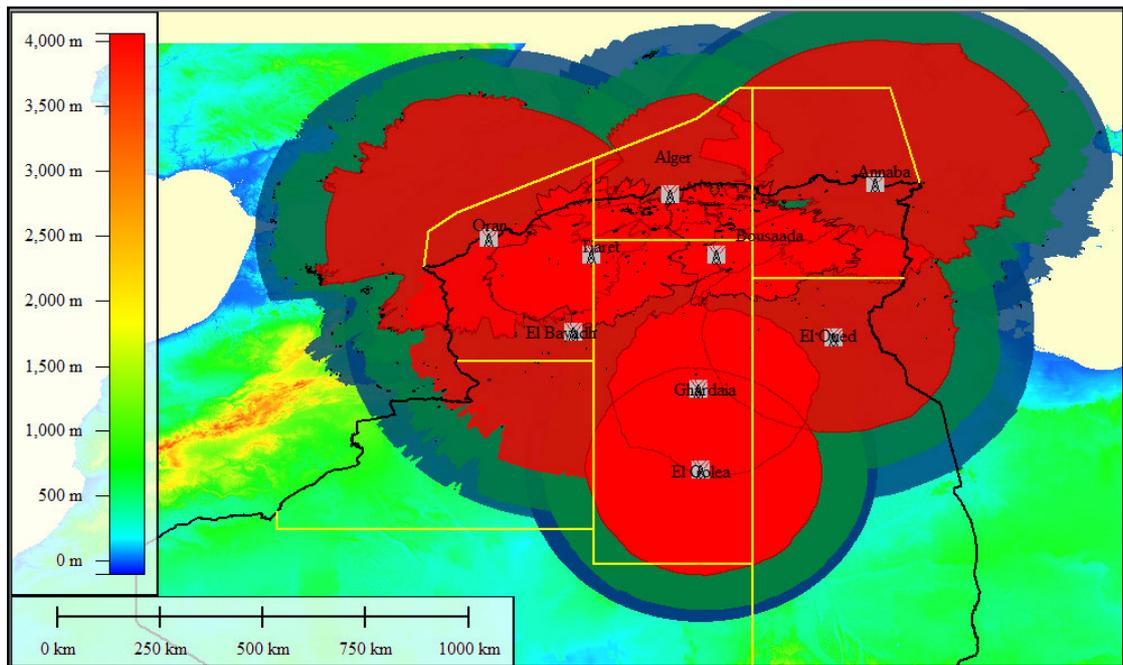


Figure 5.7 : Couverture du secteur Sud/Centre par ADS-B.

En suit, couvrir les principaux axes du flux de trafic Nord-Sud :

- Axe 1 : passant par Hassi Messaoud, Bordj Omar Driss, Illizi, Djanet et Tamanrasset ;
- Axes 2, 3 : passant par In Salah et Bordj Badji Mokhtar.

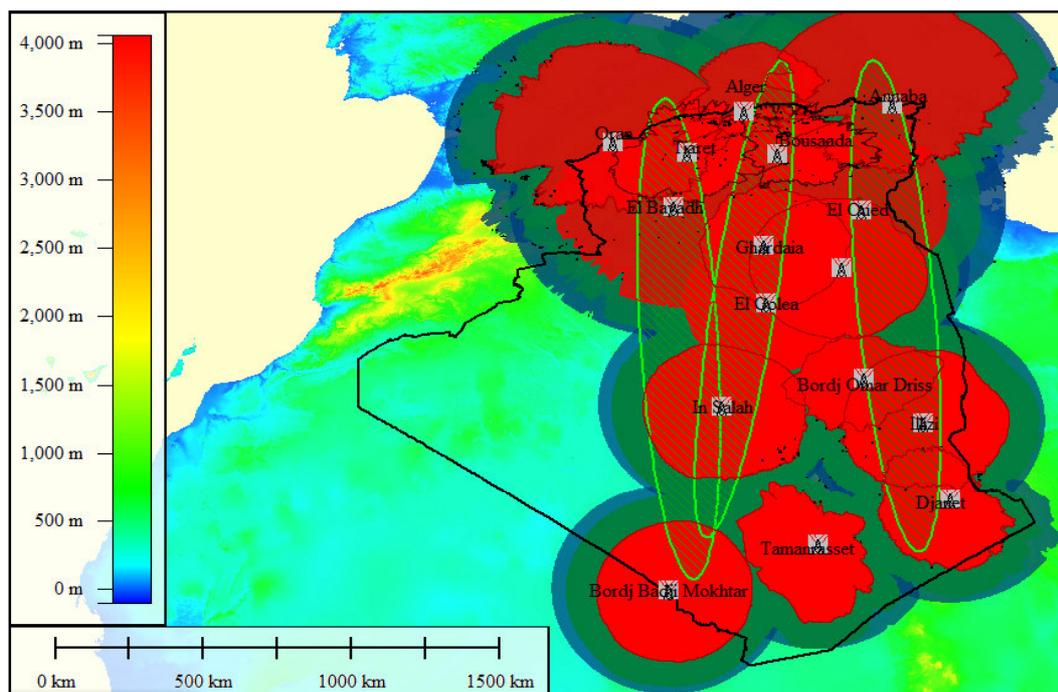


Figure 5.8 : Simulation de la couverture proposée ABS-B des axes du flux de trafic Nord-Sud.

L'étape suivante consiste à doubler voire remplacer les radars en fin de vie par des sites ADS-B à : Alger, Constantine, Oran, Annaba, El Oued et El Bayadh.

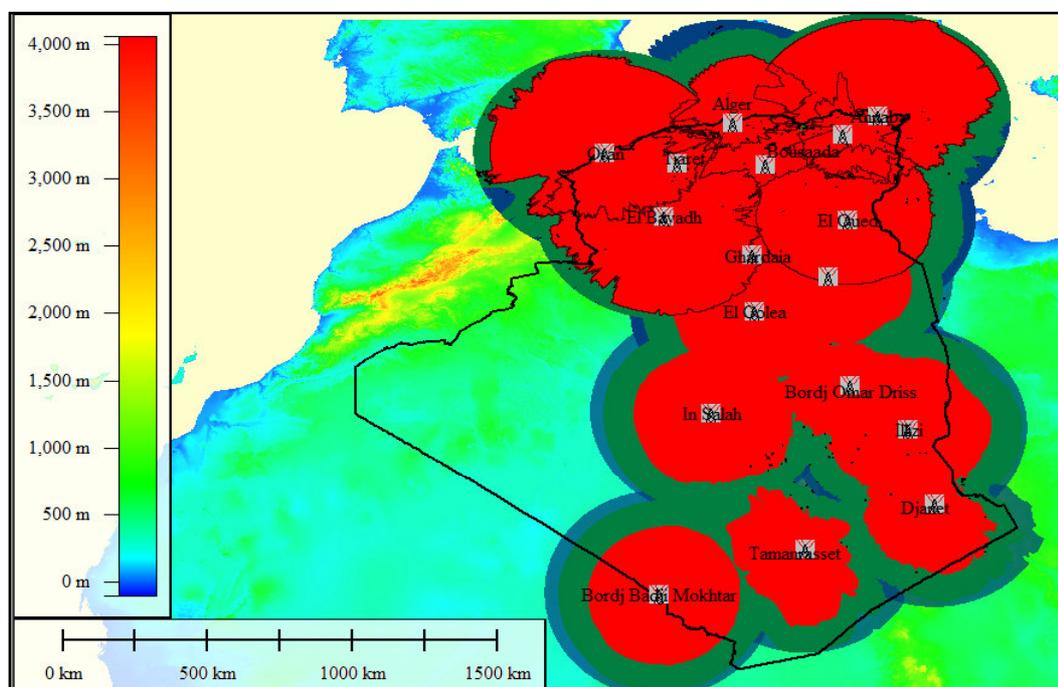


Figure 5.9 : Simulation de la couverture des sites nécessaire à doubler voire remplacer les radars existants.

En fin, pour couvrir l'extrême Sud/Ouest du pays, des stations supplémentaires seront nécessaires à Adrar et Chenachen.

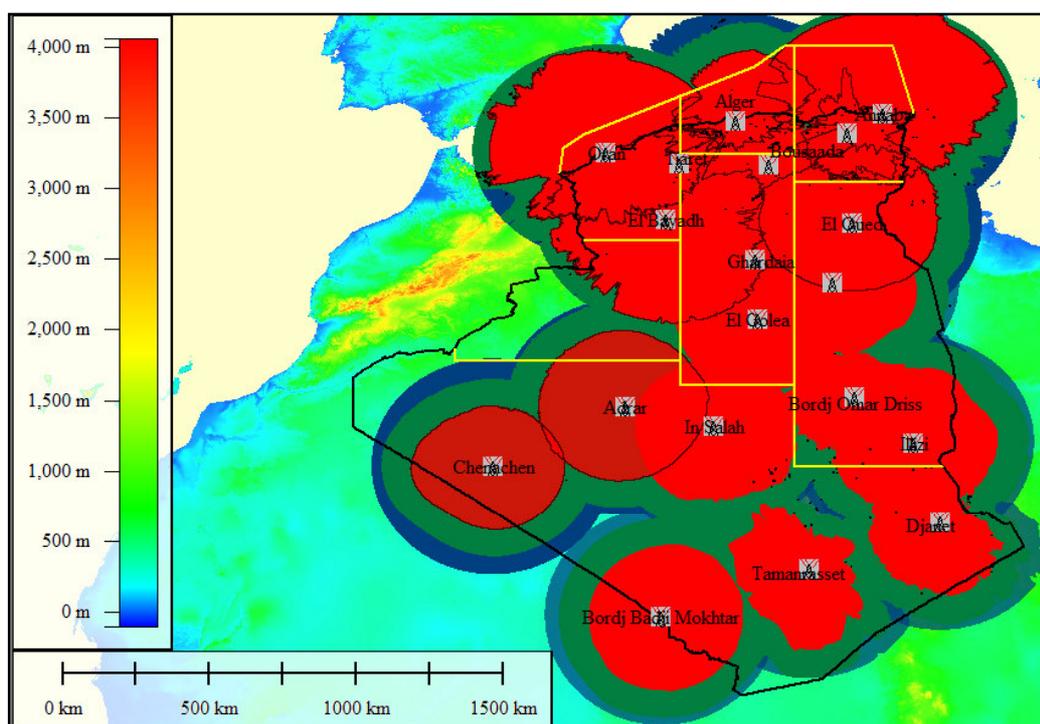


Figure 5.10 : L'extension de la couverture dans le secteur Sud/Sud.

5.4 Analyse des résultats obtenus

La figure 5.11 reprend les couvertures des stations radars existantes, en plus de celle des stations que nous proposons. On remarque que la superposition des différentes couvertures radars et ADS-B permet de :

- Compléter et doubler la couverture Nord des radars actuels jusqu'au secteur Sud-Centre et remédier au problème de surveillance de la région de Boussaâda, et ce pour n'importe quel niveau de vol adopté ;
- Assurer une couverture continue des principaux axes Nord-Sud de transit constitué par des routes internationales importantes passant par la zone de Djanet (UA605), de Tamanrasset (UA604), de Bordj Omar Driss (R978) et d'In Salah (UB726).

La configuration proposée permet de couvrir presque la totalité de la FIR Alger.

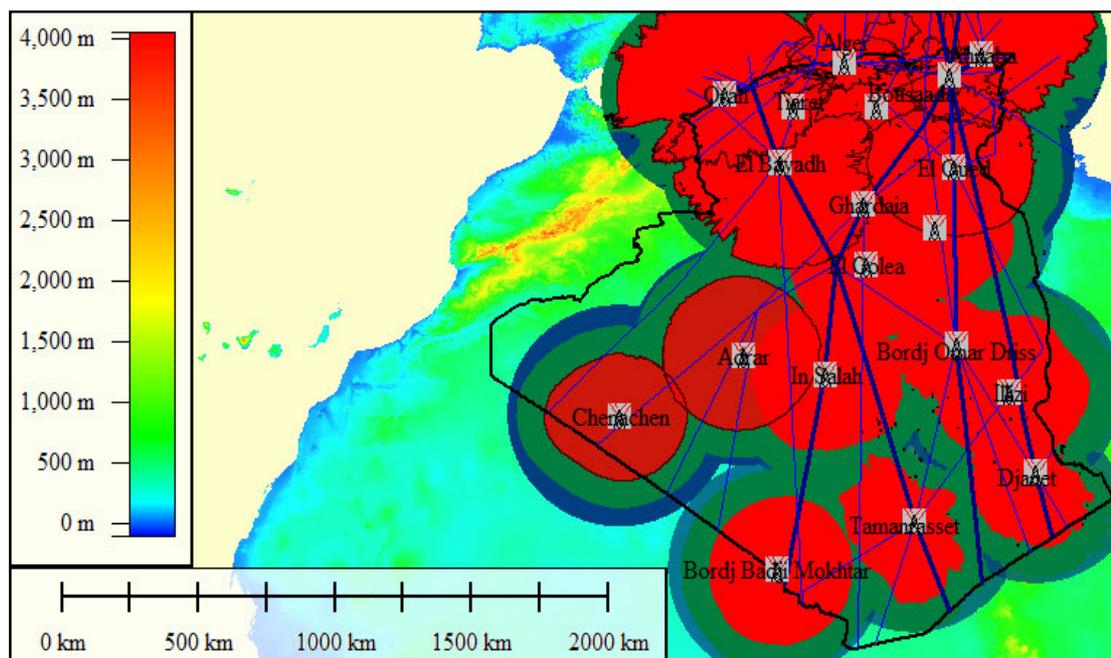


Figure 5.11 : Simulation de la couverture finale des sites existants et proposés.

5.5 La mise en œuvre opérationnelle du projet

Pour cette phase, un plan d'implémentation ainsi qu'un scénario de transition ont déjà été établis pour permettre d'organiser l'installation et la transition des nouvelles infrastructures afin de minimiser l'impact sur les services opérationnels.

Durant cette phase, la principale tâche qui doit être achevée est l'installation de toutes les stations sol sur les sites sélectionnés, ainsi que la modification du ou des systèmes ATC existants. Selon les cas de figure cités ci-après, une période de transition est nécessaire pour :

- La finalisation des mises au point opérationnelles et techniques ;
- La prise en main des nouvelles fonctions ;
- Une familiarisation à la nouvelle organisation ;
- Tester les plans d'urgences.

Nous devons être prêts à faire face aux difficultés d'interface entre les systèmes nouveaux et ceux existants. Une forte coopération et coordination entre les experts techniques et opérationnels sont absolument nécessaires. Par ailleurs,

le lancement d'un programme de formation d'experts en management serait un bon investissement.

Les deux cas se présentent :

1^{er} cas : ACC Tamanrasset non opérationnel :

Il sera nécessaire de mettre à niveau le système de gestion du trafic aérien d'Alger afin qu'il puisse prendre en compte les pistes ADS-B.

En 2020, il est très probable que le système EUROCAT-X d'Alger soit en cours de remplacement car il aura atteint sa fin de vie théorique. Les outils de contrôle aérien actuels doivent être remplacés par un nouveau système qui s'interfacera à toute nouvelle station ADS-B implantée. Le nouveau système, basé sur les produits EUROCAT-X de Thales et ATALIS d'Egis Avia, continuera comme l'ancien à gérer l'ADS-C, le CPDLC, et est capable de traiter les données ADS-B.

L'implantation de ce nouveau système permettra de réduire les séparations dans l'espace désertique et d'améliorer dans l'absolu la sécurité dans l'espace couvert par le radar.

2^{ème} cas : ACC Tamanrasset opérationnel :

Le choix de Tamanrasset n'est toutefois pas fortuit, puisqu'il s'agit du plus important couloir aérien entre le nord et le sud, qui traverse plusieurs pays. Ce projet permettra de prendre en charge le trafic du grand Sud, au-delà de Hassi Messaoud jusqu'à la limite de l'extrême Sud algérien, avec des moyens similaires à ceux d'Alger. Mais l'emplacement d'un système de gestion du trafic aérien complet est une opération complexe, qui devra être menée par étapes successives : le bon fonctionnement du système devra être vérifié, les utilisateurs devront recevoir la formation nécessaire et le niveau de sécurité requis devra être démontré.

Dans ce cas, on fait l'hypothèse que l'ACC de Tamanrasset sera doté d'un système ATC intégrant toutes les fonctions de traitement et d'exploitation multi surveillance. Il convient de prévoir les interfaces nécessaires au niveau de Tamanrasset afin que ce centre puisse recevoir les données de l'ACC d'Alger de manière à le secourir en cas de panne, c'est-à-dire que les deux centres auront à œuvrer en étroite collaboration pour pouvoir pallier aux éventuels problèmes que

l'un d'eux peut rencontrer et permettre par conséquent à l'autre d'assurer la continuité des missions dont ils ont la charge.

5.6 L'impact de l'implémentation sur la fourniture du service Radar :

Le système radar est destiné à fournir les services de contrôle, de surveillance et d'information radar en route dans les trois secteurs du nord de la FIR Alger (TMA Centre Alger, TMA Est et TMA ORAN) et le service radar d'approche en zone terminale de l'aérodrome d'Alger [26].

Le service radar en Algérie connaît actuellement une phase de transition de surveillance au contrôle radar. Le bureau de contrôle d'approche d'Alger assure le service de contrôle radar d'approche dans la CTA d'Alger avec un minimum de séparation de 7 NM. Le centre de contrôle régional d'Alger assure le service de contrôle radar régional, avec un minimum de séparation de 20 NM, dans les secteurs « TMA Centre Alger » inférieur et supérieur depuis le 12 Mars 2009 [3].

Les attentes de notre projet sur la fourniture du service radar seront concrétisées par :

- **La mise en œuvre du Contrôle Radar à Constantine, Ghardaïa, Hassi Messaoud et Tamanrasset** : Les moyens techniques seront fournis par la mise en place d'installations de l'ADS-B à Constantine, Ghardaïa, Hassi Messaoud et Tamanrasset, par l'installation d'équipements de traitement et de visualisation dans chaque APP et la fourniture de télécommunications VSAT, PTT ou réseau ENNA à partir des d'installations vers l'APP appropriée et les ACC Alger et Tamanrasset.
- **L'Extension de la Couverture en route par des pseudos radars ADS-B dans l'Espace Aérien** : La mise en place de télécoms VSAT/PTT à partir des installations ADS-B vers les ACC d'Alger et éventuellement du sud algérien. Ces capacités supplémentaires élargiront les services de trafic aérien et amélioreront les opérations de trafic aérien dans le la FIR d'Alger.

Dès que les services de communications air/sol et sol/sol seront améliorés, que les services radar seront mis en place et que le personnel contrôleur sera certifié pour l'ADS-B, les services de navigation aérienne devraient faire une transition du contrôle procédural conventionnel vers le contrôle radar.

5.7. Conclusion

La configuration de la couverture existante dans notre pays a été simulée et ces problèmes spécifiques ont été identifiés. La simulation a démontré la bonne couverture des principaux flux de trafic Est-Ouest et Nord-Sud.

En effet, elle permet non seulement d'illustrer la couverture totale de l'espace aérien algérien, mais aussi de justifier le choix des sites proposé, donc notre objectif - d'assurer une sécurité absolue du trafic aérien - est atteint.

CONCLUSION

À travers les projets TRAFCA (Traitement Automatique des Fonctions de la Circulation Aérienne) et PDGEA (Plan de Développement de la Gestion de l'Espace Aérien) l'Algérie montre sa volonté à suivre les recommandations de l'OACI par mettre à jour leurs infrastructures CNS pour une meilleur sécurité de son espace aérien.

Les fournisseurs de services de la navigation aérienne du monde entier sont de plus en plus conscients des avantages qu'apporte la multilatération. En effet, elle permet :

- Une souplesse du système ;
- Une étendue de ses applications ;
- Des avantages économiques.

La surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B) soit appelée à devenir un élément clé du futur système mondial de gestion du trafic aérien (ATM), selon l'OACI. Cette étude est une approche préliminaire à l'implémentation de ces deux nouvelles technologies en Algérie.

Après l'analyse de la situation actuelle de la surveillance aérienne en Algérie et la détermination des attentes de cette implémentation, nous avons abouti à la conclusion qu'à terme la multilatération pourra être un moyen approprié pour la surveillance dans les zones à moyenne et forte densité de trafic. C'est une solution adaptée à la phase de transition vers un environnement intégralement ADS-B et remplacer les radars existants.

Le but de cette étude est de proposer une stratégie de transition vers un contexte CNS/ATM plus amélioré avec l'utilisation des simulateurs qui permettent d'évaluer et d'optimiser le nombre et l'emplacement des stations sol, afin d'assurer une couverture radioélectrique continue et éviter ainsi un surcoût financier inutile.

Pour concrétiser cette étude :

- Notre intérêt c'est porté sur l'aéroport de Hassi-Messaoud pour donner un exemple de mise en place de la multilatération ;
- Nous avons développé un simulateur de conception et d'évaluation de ce système pour valider le placement de ses infrastructures, l'examiner et l'optimiser soigneusement avant déploiement ;
- Nous avons vérifié les sites ADS-B, avant confirmation d'un point de vue couverture radioélectrique.

L'avantage de notre simulateur de multilatération est la souplesse de définition de la couverture sur des choix prédéterminés de position des récepteurs ou de déploiement de récepteurs supplémentaires (voir de reconfiguration). Tandis que son inconvénient réside dans la précision du calcul d'altitude géométrique qui se dégrade pour l'application de surveillance terminale de la multilatération.

Néanmoins, des études additionnelles peuvent apporter plus de détails au sujet du déploiement de ces systèmes, ces perspectives pourront être en matière de :

- ✓ Développement d'un algorithme pour évaluer et optimiser le positionnement des stations de multilatération ;
- ✓ Étude d'erreur de multilatération. Une étude détaillée sur des sources d'erreur dans un système de multilatération et leur impact sur la performance. Les systèmes de multilatération sont sujets à des erreurs systématiques et aléatoires différentes des systèmes radar et ces erreurs ont un impact sur la mesure de TDOA ;
- ✓ Une analyse coûts-avantages détaillée de multilatération avec comparaison à d'autres techniques de surveillance ;
- ✓ Essais pratiques. Essais pratiques de conception pour valider des résultats de ce travail.

APPENDICE A

LES MOYENS DE SURVEILLANCE MIS À DISPOSITION DE L'ATC ALGÉRIEN

Dans cet appendice, nous présentons les technologies qui sont déjà mises à la disposition du contrôle aérien algérien à savoir : les radars PSR, SSR et l'ADS-C en faisant ressortir les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

1. Le radar primaire :

Le radar primaire est un équipement de détection ayant une portée de 80NM à 100 NM (pour les radars civils), muni d'un faisceau fin balayant en azimut sur 360° autour de la station pour fournir la position d'une cible en coordonnées polaires (distance et azimut).

En contrôle de la circulation aérienne, cette visualisation des aéronefs dans un volume d'espace donné fournit aux contrôleurs une vue en plan du trafic considéré.

Toute fois la détection des mouvements au sol par radar primaire est plus délicate que celle des mouvements en vol, à cause de la présence plus marquée des échos de sol. Elle ne s'avère nécessaire que dans les cas de mauvaise visibilité de la plate forme aéroportuaire depuis la tour de contrôle ou dans les cas d'une forte complexité de circulation sur l'aire de manœuvre.

Un radar de surface apparaît apporter un complément de sécurité en permettant au contrôleur tour de vérifier que la piste est inoccupée, d'identifier les véhicules et les avions et de présenter une situation du trafic au sol équivalente à celle du trafic en vol.

Le radar PSR, installé à proximité (environ 5 Km) de l'aérodrome d'Alger, est destiné principalement au contrôle d'approche compte tenu du volume de trafic relativement important traité par cet aérodrome. Il possède une portée théorique de 80 NM et détecte les aéronefs jusqu'à FL270.

– **Ses avantages sont :**

- La détection de tous les aéronefs ;
- Aucun équipement bords nécessaire (surveillance indépendante) ;
- L'excellente résolution, intéressante pour le guidage.

– **Ses inconvénients sont :**

- La non détection, lorsque le seuil de décision est choisi trop haut, on ne voit pas un certain nombre d'échos ;
- La fausses détections, lorsque des signaux provenant du sol ont une puissance considérable du fait de la taille des surfaces de réflexion et masquent les échos utiles des avions et ce principalement à moyenne surfaces et courte distance (fouillis ou clutter) ;
- Le coût d'infrastructure très élevé ;
- Pas d'identification des avions, ni d'altitude.

2. Le radar secondaire :

Le radar secondaire, de technique mono impulsion, localise les avions sur le même principe que le radar primaire sauf qu'ici, l'onde émise sollicite un équipement de bord "le transpondeur" qui répond aux interrogations du radar. La collaboration de l'avion est donc impérative pour ce système qui offre en outre la possibilité d'accès aux modes A et C essentielles au contrôle de la circulation aérienne.

Les radars SSR installés en Algérie sont destinés au contrôle en route et d'approche.

– **Ses avantages sont :**

- La possibilité d'avoir des informations d'identifications de l'aéronef (mode A) et d'altitude (mode C) ;
- La portée qui peut atteindre 250 NM à 280 NM.

– **Ses inconvénients majeurs sont :**

- Le chevauchement synchrone ou garbling consistant en la superposition des réponses de deux avions se trouvant à la même distance du radar ;

- Les réponses asynchrones ou fruit correspondant à la réception d'une réponse qu'un avion fait à l'interrogation d'un autre radar, et pouvant créer un plot fictif ;
- Le coût d'infrastructure élevé ;
- Le nombre limité de "code A", ce qui pose problème dans les zones denses, dans la logique SSR, chaque avion se voit allouer un code constitué de 4 chiffres (chiffre strictement inférieur à 8). Il se trouve que le nombre de combinaisons possibles (4096) peut devenir insuffisant dans les zones de trafic très denses.

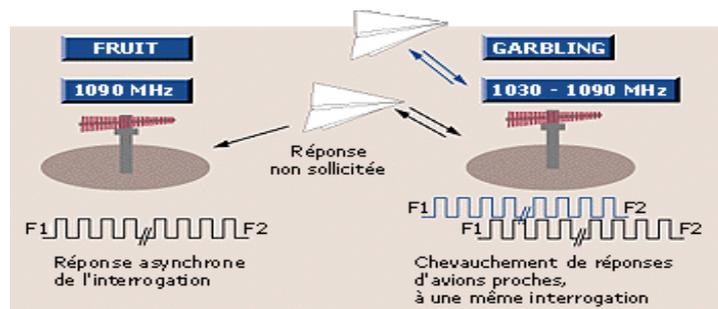


Figure 1 : Limitations du radar secondaire.

3. La Surveillance Dépendante Automatique - Contract (ADS-C) :

L'ADS-C est une technique de surveillance air/sol pour laquelle l'avion transmet au sol automatiquement, dans le cadre d'un ou plusieurs contrats établis entre bord et sol, un report périodique de sa position et tout autre paramètre demandé par le contrôle via une liaison de données point à point. Il existe trois médiums de communication air/sol qui peuvent être utilisés : le SatCom, la VHF data link mode 2 (VDL mode 2), et la HF data link.

On note, qu'aujourd'hui seul la VDL mode 2 et le Satellite sont recommandés par l'OACI.

L'ADS-C nécessite un réseau de télécommunication mobile capable de maintenir une connexion "point à point" entre un aéronef en vol et une station fixe au sol. Il y a deux réseaux susceptibles de remplir cette exigence. Il s'agit de l'ACARS (aircraft communication addressing and reporting system) et de l'ATN (aeronautical telecommunication network).

Les données transmises incluent au minimum : l'identification de l'aéronef, sa position 4D (position 3D et le temps de génération du message ADS time stamp) et la précision des reports ADS-C calculés, appelée FOM. Des données additionnelles peuvent être aussi transmises telles que le cap, la vitesse, etc.

Le contrat ADS-C est le mécanisme par le quel, un centre ATC équipé spécifie les conditions dans lesquelles les reports entre le système bord et la fonction sol doivent s'exécuter.

Les contrats peuvent être soit de type périodique soit de type événementiel:

- Dans le cadre d'un contrat périodique, l'avion transmet des messages ADS-C dont la teneur et la fréquence d'émission sont prédéfinies par les utilisateurs sol. Le contrat périodique demeure actif jusqu'à l'émission de message d'annulation;
- Dans le cas d'un contrat événementiel, l'avion émet un message ADS-C lorsque l'avion détecte une condition de déclenchement, il peut s'agir : du passage à la verticale d'un point de compte rendu de position ou d'un de cheminement "waypoint", du début d'exécution d'une manœuvre de changement d'altitude ou de cap, de la déviation latérale par rapport à la route...etc. Ces événements sont prédéfinis par le contrôleur.

On parle également du contrat à la demande pour lequel l'avion émet des messages ADS-C à la demande des utilisateurs sol.

Un aéronef peut avoir plusieurs contrats simultanément avec plusieurs fonctions sol distinctes (par exemple avec le centre ATC et les opérations aériennes de la compagnie). Un maximum de cinq correspondants est possible à ce jour. Néanmoins, chaque contrat ADS-C est spécifique entre une fonction sol et un aéronef.

– **Avantages de l'ADS-C :**

Il permet de :

- Assurer la fonction de surveillance là où le SSR n'est pas économiquement envisageable ni possible. C'est le cas des vastes espaces aériens océaniques et par similitude les vastes étendues désertiques comme ceux du sud Algérien.

- Acquérir automatiquement au niveau de système ATC certaines données bords comme la route vraie, la vitesse etc.... Cette acquisition a pour effet d'améliorer la connaissance de la situation aérienne par le contrôleur et de réduire les minima de séparation. À cet effet, EUROCONTROL estime que l'ADS-C a le potentiel de réduire les normes de séparations appliquées dans les espaces aériens procéduraux.
- Lorsque l'ADS-C repose sur la liaison des données par satellite, il permet au contrôle sol d'acquérir des données de surveillance en basse altitude et dans les autres zones où le radar et la VHF, du fait de leur limitation de portée optique est aveugle.
- La gestion de vol : les données ADS peuvent être utilisées dans les techniques d'économie de carburant. Par exemple : en améliorant l'utilisation des routes flexibles en zone océanique par l'optimisation des taux de changement de niveau de vol qui permet au avions d'évoluer a leurs niveau de vol optimal.

– **Ses limites sont :**

- Le délai de transmission, sol air (up-link) et air sol (down-link) reste élevé. Ce délai, en moyenne, supérieur à 30 secondes, interdit l'utilisation de l'ADS-C en approche et dans les zones à forte et moyenne densité de trafic;
- Le système est tributaire des prestataires de services ACARS (ARINC ou SITA) ;
- Selon le type d'équipement, le FOM peut fournir un cercle d'incertitude plus ou moins précis ;
- Les coûts de connexion au réseau ACARS et des communications restes relativement importants.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ACARS: Aircraft Communication Addressing and Reporting System
- ACAS: Airborne Collision Avoidance System
- ACC: Area Control Center
- ADS: Automatic Dependant Surveillance
- ADS-B: ADS-Broadcast
- ADS-C: ADS-Contract
- AFI: Afrique océan Indien
- AFTS: Aerodrome Flight Information Service
- AGDP: Air Ground Data Processing
- AIP : Aeronautic Information Publication
- ATP : Aeronautical Information Publication
- AOC : Airline Operational Communication
- APP : centre de contrôle d'APProche
- ARINC: Aeronautical Radio INC
- ASAS: Airborne Separation Assurance System
- A-SMGCS: Advanced SMGCS
- ASEP: Airborne Separation
- ATC: Air Traffic Control
- ATM: Air Traffic Manangement
- ATN: Aeronautical Telecommunication Network
- ATS: Air Trafic Service
- ATSA: Airborne Trafic Situation Awareness
- CDTI: Cockpit Display of Traffic Information
- CFL: Cleared Flight Level
- CIV: Centre d'Information de Vol
- CLAM: Cleared Level Adherence Monitoring
- CNS/ATM : Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management
- CPDLC: Controller-Pilot Data Link Communication
- CTR : Centre de contrôle Régional
- DCA : Direction de la Circulation Aérienne
- DCDU : Data Communication Display Unit
- DDNA : Direction de Développement De La Navigation Aérienne
- EADS: European Aeronautic Defence and Space Company;
- ENNA : Etablissement National de la Navigation Adrienne
- ETD: Estimated Time of Departure
- EUROCAE: European Organisation for Civil Aviation Electronic
- FAA: Federal Aviation Agency
- FANS: Future Airborne Navigation System
- FIR : Région d'Information de Vol Flight Information Region
- FIS: Flight Information Service
- FL: Flight Level
- FMS: Flight Management System
- FOM: Figure Of Merit
- FRUIT: False Replies Unsynchronised Interrogator Time
- GND/MSL: Ground/Medal Sea Level
- GNSS: Global Navigation Satellite System

- GPS: Global Positioning System
- HF: High Frequency
- HMI: Human Machine Interface
- HMU: High Monitoring Unit
- ICAO: International Civil Aviation Organisation
- IFF: Identification Friend or Foe
- INC: Institut National de Cartographie
- INS/IRS: Inertial Navigation System/Inertial Reference System
- MASPS: Minimum Aviation System Performance Standard
- MCDU: Multi purpose Cockpit Display Unit
- MITRE: Massachusetts Institute for Technology Research and Engineering
- MLAT: Multilatération
- MOPS: Minimum Operational Performance Standard
- MSAW: Minimum Safe Altitude Warning
- NEAN: North European ADS-B Network
- OACI : Organisation de 'Aviation Civile Internationale
- PDGEA : Plan de Développement de la Gestion de l'Espace Aérien
- PSR: Primary Surveillance Radar
- RAM: Route Adherence Monitoring
- RNAV: Area Navigation
- RSP : Required Surveillance Performance
- RSFTA : Réseau du Service Fixe des Télécommunications Aéronautique
- RVSM: Reduced Vertical Separation Minimum
- RWY: RunWay
- SAR: Search And Rescue
- SARPs: Standards And Recommended Practices
- SICASP: SSR Improvements and Collision Avoidance System Panel
- SID : Standards Instruments Departure
- SITA : Société Internationale de Télécommunication Aéronautique
- SMGCS: Surface Movement Guidance and Control System
- SNMAP: Safety Net Monitoring and Alert Processing
- SSR : Secondary Surveillance Radar
- SSR-S : Secondary Surveillance Radar-Selectif
- STAR: Standard Arrivals
- TCAS: Traffic Collision Avoidance System
- TIS-B: Traffic Information Service-Broadcast
- TMA: Terminal Area
- TWY: TaxiWay
- UAT: Universal Access Transceiver
- UPS: Uninterrupted Power System
- VDL: VHF Data Link
- VHF: Very High Frequency
- VOR: VHF Omni Range
- VSAT: Very Small Aperture System
- WAM: Wide Area Multilateration
- WGS: World Geodesic System

RÉFÉRENCES

1. Mr. SEBAIHI Mustapha, « Étude d'implémentation de l'ADS-B en Algérie », Thèse Mastère en exploitation aéronautique et gestion du trafic aérien, SOFREAVIA Toulouse ENAC, (2004).
2. Mr. DJEMMALI Mohamed, « Support à la mise en œuvre du CNS-ATM en AFI-MID », Thèse Mastère en exploitation aéronautique et gestion du trafic aérien, SOFREAVIA Toulouse ENAC, (2005).
3. AIP Publication d'Information Aéronautique ALGERIE, (12 MAR 09).
4. OACI ANNEXE 11, « Service de la circulation aérienne », Treizième édition, (2001).
5. Mr. REKKAH Mohamed, « Etude de sectorisation de l'espace aérien algérien en environnement radar sur la partie Nord et amélioration du réseau de routes », Thèse Mastère en exploitation aéronautique et gestion du trafic aérien, ENAC, (2004).
6. ENNA/DDNA / Département statistiques, « Rapport annuel d'activités », (2013).
7. Rapport d'étude, « L'espace Aérien Algérien », L'équipe Northrop Grumman et de Jerry Thompson & Associates, (2003).
8. DOC OACI, « Guidance material on comparison of surveillance technologies », (Septembre 2007).
9. Mr. SIMONETTI André et Mr. PONNAU Mikael, « Revue technique N° 57 - POEMS le radar mode S pré-opérationnel », DGAC, (1999).
10. ERA Corporation, « multilateration executive reference guide », US, (2010).
11. DOC OACI, « ANNEXE 10 Télécommunication aéronautique », volume IV, 4^{ème} Edition, (Juillet 2007).
12. Multilateration technologie overview Ron Turner SENSIS Corp. USA ; (2008) ;
13. Mr. GILMORE M., « Understanding OM1, OM2, OM3, OS1, OS2 and more! », Fiber optic Industry Association, Hertfordshire, UK, (2008).
14. Mr. CORREIA L.M., « Mobile Communications Systems Lecture Notes », IST-TUL ; Lisbon, Portugal, (September 2009).

15. YEKATERIA TROFIMOVA, « Transport and telecommunication », TTI, Volume 8, (2007).
16. Gérard Besombes et Jean-Charles Vallée, «Revue technique N°3 - Multilatération», DGAC, (2006).
17. W.H.L. Neven (NLR), T.J. Quilter (RMR), R. Weedon (RMR) et R.A. Hogendoorn (HITT), «Wide Area Multilateration», Report on EATMP TRS 131/04, Version 1.1, (2004).
18. DOC OACI, « Surveillance Dépendante Automatique - mode diffusion (ADS-B) concept d'utilisation », 11^{ème} conférence de navigation aérienne, MONTREAL, (2003).
19. ENNA/DDNA, « Étude descriptive du concept ADS-B et sa mise en œuvre dans la FIR Alger », (2007).
20. Mr. Jean-Marc Loscos, « ADS-B à l'étranger », DGAC, (2004).
21. DOC OACI, « Report of ADS-B seminar and the sixth meeting of automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) study and implementation task force (ADS-B SITF/6) », Seoul, Republic of Korea, (23-27 Avril 2007).
22. ALEX SMITH et RUSSELL HULSTROM, « La technologie de multilatération se prête à une large gamme d'applications », journal OACI, Volume 62, Numéro 3, (MAI/JUIN 2007).
23. ENNA/DDNA, « Rapport sur la journée de présentation ADS-B », (2006).
24. Présentation DGAC: « Activités ADS-B » DSNA/DTI, (2005).
25. Mr. BOUDANI Abdelkader, « Couverture de l'espace aérien Algérien par des moyens CNS-ATM », Thèse Magister, DAB, (2009).
26. Circulaire d'Information Aéronautique AIC, « Projet de mise en œuvre du contrôle radar dans la FIR Alger », Série A, NR° 02 / 06 Algérie, (2006).